

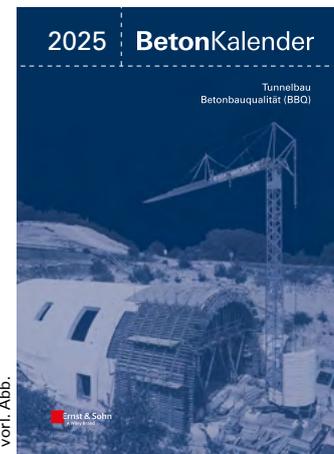
Konrad Bergmeister, Frank Fingerloos,  
Johann-Dietrich Wörner (Hrsg.)

# Beton-Kalender 2025

**Schwerpunkte: Tunnelbau;  
Betonbauqualität (BBQ)**

- **Stand der Technik für Konventionellen Tunnelbau bei geringer Überlagerung und Maschinellen Tunnelvortrieb**
- **Sensorik und Langzeitmonitoring**
- **Erläuterungen zum neuen Konzept der Betonbauqualitätsklassen in der DIN 1045er-Reihe**

Themenschwerpunkte sind der Tunnelbau und die Betonbauqualität (BBQ) in der Normenreihe DIN 1045 aus 2023. Die Beiträge zum Themenschwerpunkt „Tunnelbau“ umfassen eine breite Palette von Themen, die von technischen Verfahren bis hin zu digitalen Technologien und Nachhaltigkeitsaspekten reichen.



vorl. Abb.

Teile 1 + 2, 12/ 2024 · ca. 1066 Seiten ·  
ca. 122 Abbildungen

Hardcover

**ISBN 978-3-433-03441-5** ca. € 184\*

**Fortsetzungspreis** ca. € 164\*

eBundle (Print + ePDF)

**ISBN 978-3-433-03444-6** ca. € 234\*

**Fortsetzungspreis eBundle** ca. € 194\*

**Bereits vorbestellbar.**

## BESTELLEN

+49 (0)30 470 31-236

marketing@ernst-und-sohn.de

[www.ernst-und-sohn.de/3441](http://www.ernst-und-sohn.de/3441)



## Vorwort

Der Beton-Kalender 2025 ist ein aktuelles Nachschlagewerk und eine Fundgrube für die spezifischen Themen des Tunnelbaus, der Energiebauwerke und der Betonbauqualität. Wissend, dass in der „Kürze die Würze“ liegt, soll dieses Vorwort gezielt knapp gehalten werden.

Im Teil 1 werden aktuelle Aufgabenfelder des Tunnelbaus aufgegriffen. Im Beton-Kalender 2014 wurde letztmalig der Themenschwerpunkt des „Unterirdischen Bauens“ und der „Geotechnik“ behandelt. In diesem Jahrgang werden einige Beiträge aktualisiert und neue relevante Themen aufgegriffen. Diese sind:

- I Konventioneller Tunnelbau bei geringer Überlagerung – Stand der Technik unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten von Robert Galler, Elisabeth Hauzinger, und Alexandros Evangelatos
- II Maschinelles Tunnelvortrieb – Verfahrenstechniken, Planungsgrundlagen und Herausforderungen von Matthias Flora und Markus Thewes
- III Tübbingfertigteile im Tunnelbau von Gereon Behnen und Oliver Fischer
- IV Injektionen im Tunnelbau von Conrad Boley, Yashar Forouzandeh, Paul Pratter und Götz Tintelnot
- V Unterirdische gleisgebundene Verknüpfungsstellen: Konzeption, Funktionalität, Sicherheitsaspekte, normative Regelungen von Konrad Bergmeister, Andreas Busslinger, Frank Leismann, Jan Erik Döhler, Roland Leucker, Christoph Rudin und Elisabeth Stierschneider
- VI BIM-basierte Nachhaltigkeitsbewertung von Infrastrukturbauprojekten am Beispiel von Tunnelbauprojekten von Michelle Kaus, Sabine Hartmann, Jan-Iwo Jäkel, Theresa Maier und Katharina Klemm-Albert
- VII Tunnel Information Modeling auf dem Weg zum digitalen Zwilling von Matthias Flora, Georg Frösch, Hannah Salzgeber und Larissa Schneiderbauer
- VIII Digitalisierung im Tunnelbau – Planung, Ausführung, Betrieb von Günther Meschke, Markus König, Markus Thewes, Steffen Freitag, Götz Vollmann, Gerrit Emanuel Neu, Abdullah Al-sahly und Ba Trung Cao
- IX Sensorik und Langzeitmonitoring im Tunnelbau von Werner Lienhart, Christoph Martin Monsberger, Johannes Fleckl-Ernst und Bernd Moritz
- X Risikomanagement im Tunnelbau und die integrierte Projektabwicklung (IPA) von Simon Christian Becker, Konrad Bergmeister und Philip Sander

Der Teil 2 widmet sich insbesondere der Betonbauqualität sowie den Windenergieanlagen und der oberflächennahen Geothermie. Mit dem Blick auf die Verbesserung der Betonbauqualität (BBQ) in DIN 1045-2

wurde das Kapitel zum Beton aktualisiert. Der Beton-Kalender 2025 enthält auch weitere Erläuterungen zu den neuen Normen DIN 1045-1000, DIN 1045-1 und DIN 1045-3 mit den Betonbauqualitätsklassen und zur Herstellung von klinkerarmen Betonen mit besonderer Relevanz für die Nachhaltigkeit. Die Übersicht der Normen und Regelwerke wird in aktualisierter Form dargestellt und die DAfStb-Richtlinie „Betondecken und -dächer aus Fertigteilhohlplatten“ abgedruckt. Die spezifischen Themen sind:

- XI Windenergieanlagen in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise von Jürgen Grünberg, Joachim Göhlmann, Vincent Oettel, Boso Schmidt und Hendrik Bock
- XII Oberflächennahe Geothermie von Christian Moormann und Till Kugler
- XIII Erläuterungen zur neuen DIN 1045-1000 und DIN 1045-1 – Betonbauqualität (BBQ) von Rolf Breitenbücher, Frank Fingerloos, Josef Hegger und Udo Wiens
- XIV Beton von Udo Wiens und Frank Dehn
- XV Die neue DIN 1045-3 „Bauausführung“ mit ihren wesentlichen Änderungen von Roland Pickhardt und Thomas Richter
- XVI Beton im Tunnelbau von Rolf Breitenbücher und Sven Plückelmann
- XVII Renaissance der calcinierten Tone – Herausforderungen und Leistungsfähigkeit von klinkerarmen Betonen der Zukunft von Nancy Beunter, Julian Link, Steffen Overmann, Christiane Rößler, Corinna Rozanski, Tobias Schack, Sebastian Scherb, Thomas Sowoidnich, Ricarda Sposito, Torben Gädt, Michael Haist, Horst-Michael Ludwig, Thomas Matschei und Christian Thienel
- XVIII Normen und Regelwerke von Frank Fingerloos und die DIN 1045-1000 sowie die DAfStb-Richtlinie „Betondecken und -dächer aus Fertigteilhohlplatten“

Der Beton-Kalender 2025 mit den Themenschwerpunkten „Tunnelbau“ und „Betonbauqualität“ bietet viel Fachwissen mit Beispielen aus der Ingenieurpraxis. Dieser Beton-Kalender ist nicht nur ein wissenschaftlich fundiertes Nachschlagewerk für die Ingenieurpraxis, sondern beinhaltet durch die vielen Literaturzitate auch wertvolle Informationen für die Forschung. Ein erfolgreiches Studieren, Forschen und Konstruieren wünschen die Herausgeber.

Wien,  
Berlin,  
Darmstadt,  
im September 2024

Konrad Bergmeister  
Frank Fingerloos  
Johann-Dietrich Wörner

## Inhaltsverzeichnis Teil 1

Vorwort III

### I Konventioneller Tunnelbau bei geringer Überlagerung – Stand der Technik unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten 1

Robert Galler, Elisabeth Hauzinger, Alexandros Evangelatos

1	Einleitung	3	4	Nachhaltigkeitsaspekte im konventionellen Tunnelbau	14
2	Zukünftiger Bedarf an unterirdischer Infrastruktur	3	4.1	Verwertung von Tunnelausbruch	14
3	Konventioneller Tunnelbau bei seichter Überlagerung – Technische Aspekte	4	4.1.1	Rechtliche Rahmenbedingungen	14
3.1	Erforderliche Erkundungsmaßnahmen	4	4.1.2	Schadstoffeintrag während des Vortriebs – Auswirkungen und Lösungsansätze	15
3.2	Instrumentierung und Überwachung	5	4.1.2.1	Verunreinigung von Ausbruchmaterial	15
3.3	Bodenverbesserungsmaßnahmen	7	4.1.2.2	Lungengängiger Quarzstaub in der Tunnelluft	16
3.3.1	Entwässerungsmaßnahmen	7	4.1.3	Echtzeit-Analyse des Aushubmaterials	16
3.3.2	Injektionsmaßnahmen	8	4.1.4	Möglichkeiten der Verwendung von Ausbruchmaterial	17
3.3.3	Gefrierverfahren	8	4.1.4.1	Recycling-Baustoffe	17
3.3.4	Vorauselende Sicherungsmaßnahmen	8	4.1.4.2	Rohstoffe für Industrieminerale	19
3.4	Mögliche Wechselwirkungen mit bestehenden Gebäuden	9	4.1.4.3	Substitution von sekundären Baurohstoffen	19
3.5	Risikomanagement	10	4.2	Einsatz von Faserbeton	20
3.6	Empfehlungen hinsichtlich vertraglicher Anforderungen	11	4.2.1	Vorteile von Faserbeton	21
3.6.1	Risikoteilung	12	4.2.2	Faserarten	21
3.6.2	Vertragsmodelle	12	4.2.3	Nachhaltigkeitsaspekte von Faserbeton	21
3.6.2.1	Design-Bid-Build (DBB)	13	4.2.4	Dauerhaftigkeit von Faserbeton	22
3.6.2.2	Design-Build (DB)	13	4.2.5	Einschalige Tunnelauskleidung	23
			5	Zusammenfassung und Ausblick	25
				Literatur	26

### II Maschineller Tunnelvortrieb – Verfahrenstechniken, Planungsgrundlagen und Herausforderungen 31

Matthias Flora, Markus Thewes

1	Einleitung	33	2.3.2	Erddruckschilde (EPB)	42
2	Verfahrenstechniken im maschinellen Tunnelvortrieb	33	2.3.2.1	Betriebsmodus	43
2.1	Einteilung der Tunnelbohrmaschinen	33	2.3.2.2	Einsatzbereiche und Boden-konditionierung	44
2.2	Festgesteins-Tunnelbohrmaschinen	34	2.3.3	Variable Density Schild (VDS)	47
2.2.1	Tunnelbohrmaschinen ohne Schild (Gripper-TBM)	35	2.3.4	Hybride Schilde für unterschiedlichen Modus	47
2.2.2	Einfachschildmaschinen (OPS)	36	2.3.5	Systemwahl Flüssigkeitsschild (Hydro) – Erddruckschild (EPB) – Variable Density	48
2.2.3	Doppelschildmaschinen (DOS)	36			
2.2.4	Systemwahl: Gripper-TBM vs. Einfachschildmaschine vs. Doppelschildmaschine	36	3	Ringspalthinterfüllung	50
2.3	Schildmaschinen für Lockergestein	37	3.1	Mörtel	50
2.3.1	Flüssigkeitsschild	38	3.2	Perlkies	51
2.3.1.1	Einsatzbereiche	39	3.3	Zwei-Komponenten-(2-K-) Ringspaltverfüllung	52
2.3.1.2	Herstellung und Überwachung der Suspension	40	3.4	Verfahrenstechnik zur Verfüllung des Ringspalts	52

4	Herausforderungen und Erschwernisse	53	4.2.4	Verlängerung Versorgungsleitungen	66
4.1	Herausforderungen aufgrund geologischer und geotechnischer Gegebenheiten	54	4.3	Umwelt	66
4.1.1	Verklebungen	54	4.3.1	Wiederverwertung von Ausbruchmaterial und Deponierung	66
4.1.2	Verschleiß	56	4.3.2	Separierung	67
4.1.3	Mixed-face	57	5	Bedarf an künftigen Entwicklungen	69
4.1.4	Blockige Ortsbrust	59	5.1	Digitalisierung	69
4.1.5	Drückendes Gebirge	60	5.2	Automatisierung	70
4.2	Maschinentechnische Herausforderungen	61	5.3	Prozessbasierte Auswahl der Tunnelvortriebsmethode	70
4.2.1	Mechatronik	61	5.4	Nachhaltigkeit und CO <sub>2</sub> -Bilanzierung	72
4.2.2	Ringbau und Ringspaltverfüllung	61		Literatur	72
4.2.3	Inspektion und Werkzeugwechsel	62			
4.2.3.1	Inspektion und Wartung bei hohem Stützdruck	62			
4.2.3.2	Einfluss des Durchmessers	64			
<b>III</b>	<b>Tübbingfertigteile im Tunnelbau</b>	<b>77</b>			
	Gereon Behnen, Oliver Fischer				
1	Einleitung	81	2.4.5	Ringfugenausbildung	106
1.1	Überblick, Entwicklung der Bauweise	81	2.4.6	Schlussstein kinematik und Pressenhub	108
1.2	Bezeichnungen	82	2.5	Einbauteile in Tübbings	108
2	Herstellung und Konstruktion von Tübbings	83	2.5.1	Verbindungsmittel (Verschraubungen, Steckdübel)	108
2.1	Grundlagen	83	2.5.2	Montagehilfen	110
2.1.1	Definition	83	2.5.3	Dichtungssysteme	110
2.1.2	Anwendungsgebiete, Vorteile und Grenzen des Tübbingausbaus	84	3	Statische Berechnung einschaliger Tübbingausbauten	112
2.1.3	Querschnittsgestaltung	84	3.1	Grundlagen	112
2.1.4	Einschaliger oder zweischaliger Tübbingausbau	85	3.2	Einwirkungen	113
2.1.5	Tübbingsysteme – Profilformen	86	3.2.1	Einwirkungen im Endzustand	113
2.1.6	Tübbings im Bereich von Querschlagsöffnungen	90	3.2.2	Einwirkungen aus Bauzuständen	113
2.2	Herstellung und Einbau	90	3.3	Statische Systeme und Berechnungsmodelle (Tübbingring und Boden-Bauwerk-Interaktion)	115
2.2.1	Herstellung im Werk	90	3.3.1	Übersicht Berechnungsmodelle	115
2.2.2	Qualitätssicherung	91	3.3.2	Einzelfragen zu den Modellierungsannahmen	116
2.2.3	Toleranzen	92	3.3.2.1	Modellierung von Stabzügen (allgemein)	116
2.2.4	Betontechnologie	93	3.3.2.2	Ersatzsteifigkeit nach Muir-Wood	116
2.2.5	Transport und Einbau der Tübbings	93	3.3.2.3	Drehfedersteifigkeit der Längsfugen nach Janßen und Leonhard/Reimann	116
2.2.6	Interaktion zwischen Tübbingfertigteilen und Tunnelvortriebsmaschine	94	3.3.2.4	Modellierung gekoppelter Ringe/Koppelfedern	118
2.2.7	Ringspaltverpressung	94	3.3.2.5	Ansatz der Bettungsfedern bei Gebetteten-Stabzug-Systemen	118
2.3	Funktionale Anforderungen an den Tübbingausbau	95	3.3.2.6	Anmerkungen zur Kopplung der Tunnel-schale an den Baugrund/Ringspaltverfüllung	118
2.3.1	Tragfähigkeit	95	3.3.2.7	Anmerkungen zum Ansatz der Grundwasserstände und des Grundwasserdrucks	119
2.3.2	Dauerhaftigkeit	95	3.4	Nachweiskonzepte (Gesamtsystem)	119
2.3.3	Gebrauchstauglichkeit	96	3.4.1	Nachweiskonzepte (Gesamtsysteme)	120
2.3.4	Brandschutzanforderungen	96	3.4.2	Anmerkungen zur Sicherheitsdefinition im Tunnelbau	121
2.3.5	Bauzustände	97			
2.3.6	Nachhaltigkeit	97			
2.4	Entwurfselemente und Geometrie	97			
2.4.1	Entwurfssgrundsätze	97			
2.4.2	Ringgeometrie	98			
2.4.3	Ringkeilform (Ringkonizität)	102			
2.4.4	Längsfugenausbildung	104			

3.5	Analytische Detailnachweise	122	4	Vermeidung von Tübbingschäden	131
3.5.1	Nachweis der Teilflächenpressung an den Längsfugen	122	5	Faser- und Stahlfaserbetontübbings (SFB-Tübbings)	136
3.5.2	Spaltzugnachweise an den Längsfugen	126	5.1	Einführung, Regelwerke	136
3.5.3	Nachweis der Pressenkraftdurchleitung an den Ringfugen	127	5.2	Statische Wirkung von Stahlfasern in Tübbingfertigteilen	139
3.5.4	Nachweis der Übertragung von Koppelkräften	128	5.3	Nachweisverfahren für Tübbings	140
3.5.5	Nachweisformate für Herstell-, Transport- und Montagezustände	129	5.3.1	Allgemeines	140
3.5.6	Nachweis der Scheibenbeanspruchung (Fugenversätze, Pressenkraftdurchleitung)	130	5.3.2	Ergänzende Regelungen gemäß den DAUB-Empfehlungen	140
3.6	Bewehrungsbildung	131	6	Nachhaltigkeitsbetrachtungen	142
3.6.1	Allgemeines	131	6.1	Allgemeines	142
3.6.2	Betondeckung	131	6.2	Nachhaltigkeitsbilanzierungen	143
3.6.3	Flächenbewehrung	131	6.3	Berechnungsmethodik des CO <sub>2e</sub> -Ausstoßes für Tübbingfertigteile/Tübbingtunnel	143
3.6.4	Fugenbewehrung	131	6.4	Optimierungspotenziale	144
3.6.5	Bewehrungsgehalt	131		Literatur	147
<b>IV</b>	<b>Injektionen im Tunnelbau</b>	<b>151</b>			
	Conrad Boley, Yashar Forouzandeh, Paul Pratter, Götz Tintelnot				
1	Einleitung	153	5.2	Eigenschaften des Injektionsmaterials	165
1.1	Geschichte und Bedeutung	153	5.2.1	Rheologische Eigenschaften des Injektionsmaterials	165
1.2	Begriffe und Bezeichnungen	153	5.2.2	Verdünnungseffekt des Injektionsmaterials (Diffusion)	166
2	Aktuelle Regelwerke und Empfehlungen	154	5.3	Baugrund-/Gebirgsparameter	167
3	Injektionsmaterial	155	5.3.1	Durchlässigkeit	167
3.1	Partikuläre Injektionsmaterialien	155	5.3.2	Porosität	168
3.1.1	Organische Injektionsmaterialien	155	5.3.3	Saugspannung	169
3.1.2	Mineralische Injektionsmaterialien	156	5.4	Injektionsverfahren ohne Verdrängung	170
3.2	Chemische Injektionsmaterialien	157	5.4.1	Injizierbarkeit des Untergrunds	170
3.2.1	Silikate	157	5.4.2	Reichweite und Ausbreitungsverhalten	173
3.2.2	Acrylate	157	5.4.3	Mechanische und hydraulische Eigenschaften	175
3.2.3	Polyurethane	158	5.5	Injektionsverfahren mit Verdrängung	176
3.2.4	Epoxide	158	5.6	Düsenstrahlverfahren	179
3.3	Hybridinjektion	159	5.6.1	Anwendbarkeit und Einwirkungsbereich	179
4	Injektionstechnik	159	5.6.2	Mechanische und hydraulische Eigenschaften	179
4.1	Injektionslanzen	159	6	Anwendungen im Tunnelbau	180
4.1.1	Art der Lanzen	159	6.1	Tunnelvortrieb	182
4.1.2	Anordnung der Lanzen und Beschränkungen	160	6.2	Sanierung	184
4.2	Bohrverfahren	160	6.3	Nachhaltigkeit und Dauerhaftigkeit	184
4.3	Mischtechnik	162	6.4	Deponie- und Recyclingfähigkeit	186
4.4	Pumpentechnik	163		Literatur	186
4.5	Monitoring	164			
5	Entwurf und Bemessung	164			
5.1	Erforderliche Nachweise	164			

## V Unterirdische gleisgebundene Verknüpfungsstellen: Konzeption, Funktionalität, Sicherheitsaspekte, normative Regelungen 191

Konrad Bergmeister, Andreas Busslinger, Jan Erik Döhler, Frank Leismann, Roland Leucker, Christoph Rudin, Elisabeth Stierschneider

- |         |  |     |        |  |     |
|---------|--|-----|--------|--|-----|
| 1       | Einleitung   | 193 | 4      | Unterirdische Verknüpfungsstellen – systemische Überlegungen                                   | 203 |
| 1.1     | Vorbemerkungen   | 193 | 4.1    | Einführung und Übersicht   | 203 |
| 1.2     | Definition der Verknüpfungsstellen                                 | 193 | 4.2    | Variante 1: Einbindung 1 × 2-gleisig ohne Überleitstelle (Strecken-zusammenführung)            | 204 |
| 2       | Normative Vorgaben zur Sicherheit von Tunnelanlagen                | 193 | 4.2.1  | Beschreibung   | 204 |
| 2.1     | Einleitung   | 193 | 4.2.2  | Spezifische Sicherheitsmaßnahmen   | 204 |
| 2.2     | Verordnungen der Europäischen Union zur Tunnelsicherheit           | 194 | 4.3    | Variante 2: Einbindung 2 × 1-gleisig ohne Überleitstellen (Strecken-zusammenführung)           | 204 |
| 2.3     | Nationales Recht europäischer Staaten zur Tunnelsicherheit         | 194 | 4.3.1  | Beschreibung   | 204 |
| 2.3.1   | Deutschland  | 195 | 4.3.2  | Spezifische Sicherheitsmaßnahmen   | 205 |
| 2.3.2   | Österreich   | 196 | 4.4    | Variante 3: Einbindung 1 × 2-gleisig (Strecken-zusammenführung)                                | 206 |
| 2.3.3   | Schweiz  | 196 | 4.4.1  | Beschreibung   | 206 |
| 2.3.4   | Italien  | 196 | 4.4.2  | Spezifische Sicherheitsmaßnahmen   | 206 |
| 2.3.5   | Frankreich   | 196 | 4.5    | Variante 4: Einbindung 2 × 1-gleisig (Strecken-zusammenführung)                                | 206 |
| 2.3.6   | Belgien  | 197 | 4.5.1  | Beschreibung   | 206 |
| 2.3.7   | Niederlande  | 197 | 4.5.2  | Spezifische Sicherheitsmaßnahmen   | 208 |
| 2.3.8   | Schweden   | 197 | 4.6    | Variante 5: Einbindung 2 × 1-gleisig mit Überleitstellen in Kaverne (Strecken-zusammenführung) | 209 |
| 2.3.9   | Portugal   | 197 | 4.6.1  | Beschreibung   | 209 |
| 2.3.10  | Spanien  | 197 | 4.6.2  | Spezifische Sicherheitsmaßnahmen   | 209 |
| 2.3.11  | Dänemark   | 197 | 4.7    | Variante 6: 2 × 2-gleisig ohne Überleitstellen   | 211 |
| 2.3.12  | Zusammenfassung der anzuwendenden Regelwerke                       | 197 | 4.7.1  | Beschreibung   | 211 |
| 2.4     | Zusammenfassung und Schlussfolgerungen                             | 198 | 4.7.2  | Spezifische Sicherheitsmaßnahmen   | 211 |
| 3       | Flucht- und Rettungskonzepte – Einflussfaktoren auf die Sicherheit | 198 | 4.8    | Variante 7: 4 × 1-gleisig ohne Überleitstellen   | 211 |
| 3.1     | Allgemeines  | 198 | 4.8.1  | Beschreibung   | 211 |
| 3.2     | Ereignisfälle  | 198 | 4.8.2  | Spezifische Sicherheitsmaßnahmen   | 211 |
| 3.3     | Angestrebte Schutzziele  | 198 | 4.9    | Variante 8: 4-gleisig ohne Überleitstelle  | 214 |
| 3.4     | Selbstrettung  | 199 | 4.9.1  | Beschreibung   | 214 |
| 3.5     | Fremdrettung   | 199 | 4.9.2  | Spezifische Sicherheitsmaßnahmen   | 214 |
| 3.6     | Maßnahmen zur Unterstützung der Selbst- und Fremdrettung           | 200 | 4.10   | Variante 9: 2 × 2-gleisig  | 215 |
| 3.6.1   | Vorbeugung und Ausmaßverminderung                                  | 200 | 4.10.1 | Beschreibung   | 215 |
| 3.6.2   | Bauliche Maßnahmen   | 201 | 4.10.2 | Spezifische Sicherheitsmaßnahmen   | 215 |
| 3.6.3   | Anlagentechnische Maßnahmen  | 201 | 4.11   | Variante 10: 2 × 2-gleisig mit Überleitstellen in Kaverne                                      | 215 |
| 3.6.3.1 | Beleuchtung  | 201 | 4.11.1 | Beschreibung   | 215 |
| 3.6.3.2 | Lüftung in unterirdischen Bahnanlagen                              | 202 | 4.11.2 | Spezifische Sicherheitsmaßnahmen   | 217 |
| 3.6.3.3 | Löschsysteme und Brandbekämpfungsanlagen                           | 202 | 4.12   | Variante 11: 4 × 1-gleisig   | 217 |
| 3.6.4   | Organisatorische Maßnahmen   | 202 | 4.12.1 | Beschreibung   | 217 |
|         |  |     | 4.12.2 | Spezifische Sicherheitsmaßnahmen im Bereich der Verknüpfungsstelle                             | 217 |

4.13	Variante 12: 4 × 1-gleisig mit Überleitstellen in Kaverne	220	4.15	Bewertung der Varianten von unterirdischen Verknüpfungsstellen	222
4.13.1	Beschreibung	220	4.15.1	Kriterien und Verfahren der Bewertung	222
4.13.2	Spezifische Sicherheitsmaßnahmen	221	4.15.2	Vergleichende Darstellung der Bewertung der einzelnen Varianten	224
4.14	Variante 13: 4-gleisig	221	5	Zusammenfassende Feststellungen	226
4.14.1	Beschreibung	221		Literatur	227
4.14.2	Spezifische Sicherheitsmaßnahmen	222			
<b>VI</b>	<b>BIM-basierte Nachhaltigkeitsbewertung von Infrastruktursystemen am Beispiel von Tunnelbauwerken</b> 229				
	Michelle Kaus, Sabine Hartmann, Jan-Iwo Jäkel, Theresa Maier, Katharina Klemt-Albert				
1	Einleitung	231	3.2.2	Nachhaltigkeitsbewertungssysteme im Hochbau und in der Infrastruktur	236
2	Aufbau des Beitrags	231	3.2.3	Nachhaltigkeitsbewertungen und Pilotstudien im Rahmen von BAsT-Berichten	238
3	Theoretische Grundlagen	231	3.2.4	Das Rechenverfahren nach DIN EN 17472	240
3.1	Definitionen und Begriffsabgrenzungen	231	3.2.5	Art der Bewertung	242
3.1.1	Ingenieurbauwerke	231	3.2.6	Stand der Wissenschaft	244
3.1.2	Ingenieur- und Tunnelbauwerke in der Infrastruktur	233	4	Fallbeispiel einer Tunnel-Nachhaltigkeitsbewertung	248
3.1.3	Tunnelbauwerke	233	4.1	Modellinformationen	248
3.1.4	Nachhaltigkeit	234	4.2	Durchführung der Untersuchung	249
3.1.5	Dreiklang der Nachhaltigkeit	234	4.3	Ergebnisse	251
3.1.6	Building Information Modeling	235	5	Fazit und Ausblick	254
3.2	Grundlagen der Nachhaltigkeitsbewertung von Infrastruktur	236		Literatur	255
3.2.1	Stand der Technik – eine Untersuchung nach dem Schneeballprinzip	236			
<b>VII</b>	<b>Tunnel Information Modeling auf dem Weg zum digitalen Zwilling</b> 261				
	Matthias Flora, Georg Fröch, Hannah Salzgeber, Larissa Schneiderbauer				
1	Einleitung	263	4	Der Weg zum digitalen Zwilling im Tunnelbau – aktueller Stand	272
2	Vision	263	4.1	Ein Blick in andere Branchen	272
2.1	Definition und Einflussfaktoren von Visionen des digitalen Bauens	263	4.2	Digitale Zwillinge in der Baubranche	273
2.2	Entwicklung der Vision des digitalen Bauens im Tunnelbau	263	4.3	Der digitale Zwilling im Tunnelbau	276
3	Tunnel Information Modeling – Stand in Forschung und Praxis	265	4.4	Hypothesen für den digitalen Zwilling Tunnel	276
3.1	Aktuelle Normative Grundlagen und Standards	265	5	Mission	277
3.2	Baugrundmodell	266	5.1	Digitales Modell	277
3.3	Bauwerksmodell	269	5.2	Digitaler Schatten	278
3.4	Baustellenmodell	271	5.3	Digitaler Zwilling	280
			5.4	Ökosystem von digitalen Zwillingen	282
			6	Fazit und Ausblick	283
				Literatur	284

**VIII Digitalisierung im Tunnelbau – Planung, Ausführung, Betrieb 287**

Günther Meschke, Markus König, Markus Thewes, Steffen Freitag, Götz Vollmann, Gerrit Emanuel Neu, Abdullah Alsahly, Ba Trung Cao

- |       |   |     |       |  |     |
|-------|---|-----|-------|--|-----|
| 1     | Einleitung  | 289 | 4.2   | Echtzeitsimulationen zur Unterstützung der TBM-Vortriebssteuerung  | 351 |
| 2     | Informationsmanagement im Tunnelbau   | 292 | 4.2.1 | Ersatzmodelle für Echtzeitprognosen  | 352 |
| 2.1   | Tunnel Information Modeling (TIM)   | 292 | 4.2.2 | POD-RBF-Ersatzmodell zur Echtzeitsimulation von Setzungen, Tunnelschalbeanspruchungen und Gebäudeschadensrisiken | 353 |
| 2.1.1 | Hybrides Bodendatenmodell   | 293 | 4.2.3 | Hybride Ersatzmodelle zur Echtzeitsetzungsprognose unter Einbeziehung von Unschärfen                             | 360 |
| 2.1.2 | Tunnelbauwerksmodell  | 294 | 4.2.4 | Update der Echtzeitprognosemodelle mit Monitoring-Daten  | 364 |
| 2.1.3 | Modell der Tunnelvortriebsmaschine (TVM)  | 294 | 4.2.5 | SMART-Application zur Unterstützung der Vortriebssteuerung   | 365 |
| 2.2   | Interaktionsplattform auf Grundlage des TIMs  | 295 | 5     | Tunnelbetrieb  | 367 |
| 2.2.1 | Verknüpfung und Visualisierung von Tunnelvortrieb und Setzungen                             | 295 | 5.1   | Grundlagen zur Vergabe von BIM-Leistungen  | 367 |
| 3     | Digitales Design  | 296 | 5.1.1 | Allgemeines  | 367 |
| 3.1   | Digitale Tools für die Tunnelplanung  | 296 | 5.1.2 | BIM-basiertes Handover zum Betriebsmodell  | 369 |
| 3.1.1 | Interaktive Exploration von Planungsvarianten   | 298 | 5.1.3 | Hinweise zur Umsetzung der BIM-Methode für den Straßentunnelbetrieb  | 371 |
| 3.2   | Numerische Simulation und digitale Planungsprozesse am Beispiel des maschinellen Tunnelbaus | 302 | 5.2   | Muster-Auftraggeber-Informationsanforderungen für die Betriebsphase von Straßentunneln                           | 371 |
| 3.2.1 | Numerisches Tunnelvortriebsmodell ekate   | 303 | 5.2.1 | BIM-Ziele und Anwendungsfälle  | 371 |
| 3.2.2 | Automatisierte BIM-basierte Modellgenerierung (BIM-to-FEM-Workflow)                         | 309 | 5.2.2 | Bereitgestellte digitale Grundlagen  | 374 |
| 3.2.3 | Simulationsstrategien für eine nahtlose Anbindung an TIM-Geometriemodelle                   | 310 | 5.2.3 | Digitale Liefergegenstände und Lieferzeitpunkte  | 374 |
| 3.2.4 | Analyse von Trassierungsvarianten in Echtzeit   | 313 | 5.2.4 | Organisation und Rollen  | 374 |
| 3.3   | Digitale Werkzeuge zur Unterstützung des Entwurfs segmentierter Tunnelschalen               | 316 | 5.2.5 | Strategie der Zusammenarbeit   | 375 |
| 3.3.1 | Tübbingentwurf im „Virtual Lab“   | 317 | 5.2.6 | Qualitätssicherung   | 375 |
| 3.3.2 | Sicherheitskonzepte für nichtlineare Berechnungsmodelle                                     | 322 | 5.2.7 | Modellstruktur und Modellinhalte   | 375 |
| 3.3.3 | Berücksichtigung von Unschärfe im Tübbingentwurf  | 325 | 5.2.8 | Technologien   | 378 |
| 3.3.4 | Optimierung und Design Tools für Tübbinge auf Basis von Surrogatmodellen                    | 331 | 5.3   | Empfehlungen zur Umsetzung eines praxisgerechten Modells für die Betriebs- und Erhaltungsphase                   | 379 |
| 4     | Digitale Zwillinge zur Unterstützung des Tunnelvortriebs                                    | 336 | 5.3.1 | Anforderungen an die kollaborative Zusammenarbeit  | 379 |
| 4.1   | Simulation von Logistik- und Produktionsprozessen   | 336 | 5.3.2 | Hinweise zur Standardisierung  | 380 |
| 4.1.1 | Modellierung und Prozesssimulation  | 338 | 5.4   | Grundsätze zur Entwicklung und Nutzung digitaler Zwillinge für den Tunnelbetrieb                                 | 380 |
| 4.1.2 | Optimierung von Instandhaltungsstrategien   | 343 | 5.4.1 | Stand von Wissenschaft und Technik   | 380 |
| 4.1.3 | Prozesssimulation während der Projektdurchführung   | 348 | 5.4.2 | Tunnelleitzentralen und mögliche Einsatzbereiche von digitalen Zwillingen  | 381 |
|       |   |     |       | Literatur  | 382 |

**IX Sensorik und Langzeitmonitoring im Tunnelbau 393**

Werner Lienhart, Christoph Martin Monsberger, Johannes Fleckl-Ernst, Bernd Moritz

- |       |  |     |       |   |     |
|-------|--|-----|-------|---|-----|
| 1     | Einleitung   | 395 | 6     | Spezielle Aspekte im<br>Langzeitmonitoring  | 405 |
| 2     | Messgrößen und Messsysteme   | 395 | 6.1   | Genauigkeit und Präzision<br>von Sensoren   | 405 |
| 3     | Messkonfigurationen  | 398 | 6.2   | Datenverfügbarkeit  | 406 |
| 3.1   | Messungen in Querschnittsrichtung  | 398 | 6.3   | Verifikation von Messergebnissen  | 409 |
| 3.2   | Messungen in Tunnellängsrichtung   | 398 | 6.3.1 | Kalibrierung von Sensoren   | 409 |
| 4     | Langzeitmonitoring mit geodätischen<br>Sensoren                                      | 398 | 6.3.2 | Verifikation ohne zusätzlichen Sensor   | 409 |
| 4.1   | 3D-Verschiebungsmessungen von<br>Einzelpunkten mit Totalstationen<br>und Nivellement | 398 | 6.3.3 | Verifikation mit Sensor des gleichen<br>Typs  | 409 |
| 4.2   | Oberflächenerfassung   | 401 | 6.3.4 | Verifikation mit zusätzlichen Sensoren<br>mit gleicher Messgröße, aber anderem<br>Messprinzip | 409 |
| 4.2.1 | Laserscanning  | 401 | 6.3.5 | Verifikation mit zusätzlichen Sensoren<br>mit unterschiedlicher Messgröße                     | 409 |
| 4.2.2 | Bildbasierte Messverfahren   | 402 | 6.3.6 | Externe Bestimmung von<br>Langzeiteffekten  | 410 |
| 4.2.3 | Radarmessungen InSAR   | 402 | 6.3.7 | Überblick der Verifikations-<br>möglichkeiten   | 410 |
| 5     | Langzeitmonitoring mit eingebetteten<br>geotechnischen Sensoren                      | 403 | 7     | Zusammenfassung   | 411 |
|       |  |     |       | Literatur   | 412 |

**X Risikomanagement im Tunnelbau und die Integrierte Projektabwicklung (IPA) 415**

Simon Christian Becker, Konrad Bergmeister, Philip Sander

- |       |  |     |       |   |     |
|-------|--|-----|-------|---|-----|
| 1     | Einleitung   | 419 | 4     | Fiktives Beispiel Tunnelprojekt   | 437 |
| 2     | Grundlagen des Risikomanagements                                     | 419 | 4.1   | Projektbeschreibung   | 437 |
| 2.1   | Strukturierung von Risiken<br>im Tunnelbau                           | 419 | 4.2   | Basiskosten   | 437 |
| 2.2   | Risikomanagement nach AHO  | 420 | 4.3   | Einzelrisikobetrachtung   | 440 |
| 2.3   | Risikovorsorge nach den<br>ÖGG-Richtlinien                           | 420 | 4.3.1 | Kategorisierung der Risiken   | 440 |
| 2.4   | Risikovorsorge für Großprojekte                                      | 420 | 4.3.2 | Identifizieren von Risiken  | 440 |
| 2.5   | Projektkosten und Budgetierung                                       | 421 | 4.4   | Modellierungstechniken für Spezialthemen<br>im Tunnelbau (z. B. Vortriebsklassen-<br>verschiebung und TBM Deadlock) | 442 |
| 2.6   | Kostenbestandteile   | 422 | 4.5   | Verknüpfung von Risiken mit<br>dem Terminplan   | 444 |
| 2.7   | Berücksichtigung von Unsicherheiten und<br>Bewertung des Unbekannten | 424 | 4.6   | Risikobewältigung   | 444 |
| 3     | Statistische Modellierung und Integrales<br>Risikomanagement         | 425 | 4.6.1 | Verfahren zur Risikobewältigung   | 444 |
| 3.1   | Statistische Modellierung verschiedener<br>Einflussfaktoren          | 425 | 4.6.2 | Sensitivitätsanalyse und Berücksichtigung<br>der Risikobewältigung in der Termin-<br>planung                        | 447 |
| 3.2   | Unbekanntes  | 428 | 4.7   | Vorausvalorisierung und Mittelabfluss   | 448 |
| 3.3   | Integrale Modellierung von Kosten,<br>Terminen und Risiken           | 429 | 4.7.1 | Mittelabfluss   | 448 |
| 3.4   | Digitale Projektrisiko-Zwilling                                      | 430 | 4.7.2 | Prognostizierte Inflationsrate  | 448 |
| 3.5   | Ergebnisse – Auswertung<br>und Darstellung                           | 433 | 4.8   | Allgemeine Geschäftskosten<br>und Gewinn  | 451 |
| 3.5.1 | Auswertung der Ergebnisse  | 433 | 5     | Integrierte Projektabwicklung und das<br>gemeinsame Risikomanagement  | 451 |
| 3.5.2 | Darstellung der Ergebnisse   | 434 | 5.1   | Grundlagen der Integrierten<br>Projektabwicklung  | 451 |

5.2	Ablauf der IPA	453	5.5.5	Vergütungsmodelle für die gemeinsame Entwicklung von Bauaufgabe und Zielkosten der IPA	467
5.3	Gemeinsames Risikomanagement	454	5.5.6	Vergütungsmodelle für die Realisierungsphase der IPA	468
5.4	Zielkostenfindung und Anreizgestaltung	455	5.6	Progressiver Partnerschaftsvertrag Tiefbau	468
5.4.1	Grundlagen zur Anreizgestaltung	455	5.6.1	Motivation für den Progressiven Partnerschaftsvertrag Tiefbau	468
5.4.2	Beispiel 1: Anreizmechanismus mit gedeckten HK	455	5.6.2	Phasen des PPT	469
5.4.3	Beispiel 2: Anreizmechanismus mit gedeckten AGK und HK	457	5.6.3	Planungsphase	469
5.4.4	Anreizsystem mit zusätzlicher Bonusausschüttung auf die Termine	457	5.6.4	Vergabephase	469
5.4.5	Anreizsystem mit zusätzlicher Bonusausschüttung auf die Qualität	458	5.6.5	Ausführungsphase und Interimsphase	469
5.4.6	Anreizgestaltung für einen Mehrparteienvertrag	460	5.6.6	Übersicht nach Projektphasen	472
5.5	Weitere mögliche Vergütungsformen für die IPA	461	5.6.7	Organisation bei dem PPT	472
5.5.1	Diskussion weiterer Vergütungsmodelle für die IPA	461	5.6.8	Musterkalkulation in der Vergabephase	472
5.5.2	Firm Fixed-Price (FFP) – Pauschalpreisvertrag	463	5.6.9	Vertragsschluss ohne Bau-Soll	473
5.5.2.1	Fixed Price with Economic Price Adjustment (FPEPA)	463	5.6.10	Einteilung in Bauabschnitte	473
5.5.2.2	Fixed-Price with Incentive Fee (FPIF)	463	5.6.11	Projektabschlussreport	474
5.5.2.3	Fixed Price with Prospective Redetermination (FPRP)	463	5.6.12	Auswahl des Vergütungsmodells je Bauabschnitt	474
5.5.2.4	Garantierter Maximalpreis (GMP)	464	5.6.13	Schlussbetrachtung und Ausblick zum PPT	475
5.5.3	Cost Plus Contracts – Kostenzuschlagsverträge	464	5.7	Gegenüberstellung der Vortriebsdauern von Einheitspreisvertrag und Allianzvertrag	475
5.5.3.1	Cost and Cost Sharing (CS) – Kostenzuschlagsvertrag mit Kostenbeteiligung	465	5.7.1	Gegenstand der Analyse	475
5.5.3.2	Cost-Plus Incentive Fee (CPIF) – Kostenzuschlagsvertrag mit Anreiz	465	5.7.2	Motivation für die Untersuchung	475
5.5.3.3	Cost Plus award Fee (CPAF) – Kostenzuschlagsvertrag mit Prämienzahlung	466	5.7.3	Analysegegenstand	475
5.5.3.4	Cost Plus Fixed Fee (CPFF) – Kostenzuschlagsvertrag mit Gewinnaufschlag auf Selbstkosten	466	5.7.4	Forschungsfragen	476
5.5.3.5	Cost Plus Percent of Cost Contracts (CPCC) – Kostenzuschlagsvertrag mit Anteil der Kosten	466	5.7.5	Methodisches Vorgehen	476
5.5.4	Analyse und Zuordnung der Vergütungsmodelle für die IPA	467	5.7.6	Analyse der Risiken	476
			5.7.7	Vergleich der Vertragsformen	477
			5.7.8	Ergebnisse der Studie	477
			6	Kommunikation und gesellschaftliche Interaktion	478
			6.1	Wahrnehmung von Risiken	478
			6.2	Kommunikationsarten und deren Wirkung	478
			6.2.1	Wirkung der Kommunikation	479
			7	Zusammenfassung und Ausblick	481
				Literatur	482

## Inhaltsverzeichnis Teil 2

<b>XI</b>	<b>Windenergieanlagen in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise</b>	<b>487</b>
	Jürgen Grünberg, Joachim Göhlmann, Vincent Oettel, Boso Schmidt, Hendrik Bock	
1	Allgemeines	489
2	Einwirkungen auf Windenergieanlagen	490
2.1	Ständige Einwirkungen	490
2.2	Anlagenbetrieb (Rotor und Gondel)	490
2.3	Windlasten	490
2.4	Temperatureinwirkungen	500
2.5	Vereisung von Bauteilen	500
3	Nichtlineares Werkstoffverhalten	501
3.1	Einführung	501
3.2	Stoffgesetze für Stahlbeton und Spannbeton	502
3.3	Biegemoment-Verkrümmungs-Beziehungen	505
3.3.1	Stahlbetonquerschnitte allgemein	505
3.3.2	Spannbetonquerschnitte allgemein	505
3.3.3	Stahlbeton-Kreisringquerschnitte	506
3.4	Verformungen und Biegemomente nach Theorie II. Ordnung	508
3.5	Beispiel zur Anwendung der Momenten-Verkrümmungs-Beziehung	509
3.5.1	Ortbetonturm	509
3.5.2	Fertigteilturm	511
3.5.3	Fertigteilturm mit vertikalen Fugen	513
3.6	Querschnittsbemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit	513
3.7	Räumliche mechanische Modelle für Beton	515
3.7.1	Spannungszustände und Bruchbedingungen	515
3.7.2	Versagensmodelle für Beton	516
3.7.3	Konstitutive Modelle	518
4	Tragkonstruktionen und Bemessung	518
4.1	Berechnungsgrundlagen	518
4.2	Strukturmodell für den Turmschaft	518
4.3	Schwingungsuntersuchung	520
4.3.1	Ein- und Mehrmassenschwinger	520
4.3.2	Energiemethode	521
4.3.3	Eigenfrequenzuntersuchung der Tragkonstruktion	523
4.4	Vorspannung	524
4.5	Auslegung von Windenergieanlagen	526
4.5.1	Gesamtdynamische Berechnung	526
4.5.2	Vereinfachte Berechnung	526
4.5.3	Einwirkungskombinationen nach DIBt-Richtlinie	527
4.5.4	Teilsicherheitsbeiwerte nach DIBt-Richtlinie	527
4.6	Grenzzustand der Tragfähigkeit	530
4.6.1	Verformungsberechnung nach Theorie II. Ordnung	530
4.6.2	Lineare Berechnung der Schnittgrößen	532
4.6.3	Nachweis der Spannungen im Turmschaft	532
4.6.4	Besonderheiten bei der Segmentbauweise	533
4.7	Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	538
4.7.1	Beanspruchung des Turmschafts durch äußere Einwirkungen	538
4.7.2	Beanspruchung der Schaftwand durch Zwang	538
4.7.3	Besonderheiten bei der Segmentbauweise	539
4.8	Grenzzustand der Ermüdung	539
4.8.1	Ermüdungswirksame Einwirkungen auf Tragkonstruktionen für Windenergieanlagen	539
4.8.2	Ermüdungsnachweise nach der DIBt-Richtlinie für Windenergieanlagen	541
4.8.2.1	Vereinfachte Nachweise für Beton	541
4.8.2.2	Direkter Nachweis nach DIBt-Richtlinie	543
4.8.3	Ermüdungsnachweise nach DIN 18088-2 für Windenergieanlagen	544
4.8.3.1	Vereinfachter Nachweis für Beton	544
4.8.3.2	Direkter Nachweis für Beton	546
4.8.4	Mehrstufige Ermüdungsbeanspruchungen	547
4.8.5	Bruchschwingspielzahlen für mehraxiale Ermüdungsbeanspruchungen	547
4.8.5.1	Vorgehen	547
4.8.5.2	Ableitung der Schädigungsvariablen $\kappa_c^{fat}$ und $\kappa_t^{fat}$	549
4.8.5.3	Bruchumhüllende unter Ermüdungsbeanspruchung	551
4.8.5.4	Versagenskurven unter zweiaxialer Ermüdungsbeanspruchung	551
4.8.6	Bemessungsvorschlag bei mehraxialer Ermüdung	555
4.8.6.1	Vorgehen bei der Bemessung auf Basis der linearen Akkumulationshypothese	555
4.8.6.2	Herleitung von Modifikationsfaktoren $\lambda_{e3}(N, r)$ für Ermüdungsbeanspruchungen am Druckmeridian	555
4.8.6.3	Herleitung von Modifikationsfaktoren $\lambda_{e2}(N, \alpha)$ für zweiaxiale Ermüdungsbeanspruchung	557
4.9	Bemessung von Knotenpunkten	559
4.10	Bemessung der Gründung	563

5	Herstellung von Türmen aus Spannbeton 565	5.2	Hybride Tragwerke aus Stahl und Spannbeton 565
5.1	Einleitung 565		Literatur 567
<b>XII</b>	<b>Oberflächennahe Geothermie 571</b> Christian Moormann, Till Kugler		
1	Überblick 573	5	Planung und Projektablauf 615
1.1	Einführung 573	5.1	Grundlagenermittlung 616
1.2	Begriffserklärung Geothermie 573	5.2	Vorplanung 616
1.2.1	Tiefe Geothermie 574	5.3	Entwurfsplanung 617
1.2.2	Mitteltiefe Geothermie 574	5.4	Genehmigungsplanung 617
1.2.3	Oberflächennahe Geothermie 574	5.5	Ausführungsplanung 617
2	Physikalische Grundlagen 576	5.6	Vorbereitung der Vergabe 617
2.1	Wärmetransportvorgänge in Böden 576	5.7	Mitwirkung bei der Vergabe 617
2.1.1	Konduktion 576	5.8	Objektüberwachung (Bauüberwachung oder Bauoberleitung) 617
2.1.2	Konvektion (freie vs. erzwungene) 576	5.9	Objektbetreuung und Dokumentation 618
2.1.3	Strahlung (Radiation) 579	6	Geothermische Exploration und Bemessung 618
2.1.4	Dispersion 579	6.1	Einleitung 618
2.1.5	Wärmetransportgleichung 579	6.2	Geschlossene Anlagen 618
2.2	Thermische Eigenschaften von Böden 580	6.2.1	Erdwärmesonden 618
2.2.1	Idealisierung und Annahmen 580	6.2.1.1	Geothermal Response Test (TRT) 618
2.2.2	Wärmekapazität 581	6.2.1.2	Thermischer Bohrlochwiderstand 620
2.2.3	Wärmeleitfähigkeit 582	6.2.1.3	Bemessung 620
2.2.4	Temperaturleitfähigkeit 583	6.2.2	Erdwärmekollektoren 621
3	Systeme der oberflächennahen Geothermie 587	6.2.3	Erdwärmekorb 622
3.1	Einleitung 587	6.2.4	Energiepfahl 622
3.2	Technische Baugrundausrüstung (TBA) 588	6.3	Offene Anlagen – Grundwasserbrunnen 622
3.2.1	Geschlossene Systeme 588	7	Herstellung und Betrieb 622
3.2.2	Offene Systeme 597	7.1	Bohrverfahren 622
3.2.3	Wärmeträgermedium 599	7.2	Einbau der Wärmetauscher in den Untergrund 623
3.3	Technische Gebäudeausrüstung 599	7.3	Horizontale Anbindung 625
3.4	Wärmepumpe 600	7.4	Direkte Grundwassernutzung 625
3.5	Optimale Betriebsweisen 601	8	Rechtliche und politische Rahmenbedingungen 625
4	Beispiele 604	8.1	Bundesberggesetz (BBergG) 626
4.1	Hans Rehn Stift, Erdwärmesonden 604	8.2	Wasserhaushaltsgesetz (WHG) und Wassergesetze der Länder (WG) 627
4.2	Geothermische Versorgung von Park- und Rastanlagen an Autobahnen 605	8.3	Bodenschutzrecht 627
4.3	Tunnelgeothermie Fasanenhoftunnel 606	8.4	Lagerstättengesetz 627
4.4	Aktivierung Mixed-in-Place 607	8.5	Weitere rechtliche Vorgaben 627
4.5	Tunnelgeothermie Füssen, direkte passive Freiflächenheizung 608	8.6	Technische Regelwerke und Empfehlungen 627
4.5.1	Überblick 608		Literatur 628
4.5.2	Technikum „Temperierte Freifläche“ 608		
4.5.3	Erfahrungen aus dem Betrieb des Technikums 613		

<b>XIII</b>	<b>Erläuterungen zur neuen DIN 1045-1000 und DIN 1045-1 – Betonbauqualität (BBQ)</b>	<b>633</b>
	Rolf Breitenbücher, Frank Fingerloos, Josef Hegger, Udo Wiens	
1	Konzept für eine verbesserte Betonbauqualität – Anlass und Motivation	635
1.1	Die Ausgangssituation	635
1.2	Die Initiative des DAfStb zur Verbesserung der Qualität im Betonbau	635
1.3	Die aktuelle Struktur der DIN-1045-Normenreihe	636
2	Erläuterungen zu DIN 1045-1000	637
2.1	Einführung	637
2.2	Die BBQ-Klassen	637
2.3	Die Betonfachgespräche	639
2.4	Das Betonbaukonzept	640
3	Erläuterungen zu DIN 1045-1	641
3.1	Einführung	641
3.2	Die Planungsklassen PK	641
	Literatur	645
<b>XIV</b>	<b>Beton</b>	<b>649</b>
	Frank Dehn, Udo Wiens	
1	Einführung und Definition	653
1.1	Allgemeines	653
1.2	Definition	653
1.3	Klassifizierung von Beton	656
1.3.1	Betonarten	656
1.3.2	Betonbauqualitätsklassen und Betonklassen	656
1.3.3	Betonfamilie	662
2	Ausgangsstoffe	663
2.1	Zement	663
2.1.1	Arten und Zusammensetzung	663
2.1.2	Bautechnische Eigenschaften	667
2.1.3	Bezeichnung, Lieferung und Lagerung	669
2.1.4	Anwendungsbereiche	670
2.1.5	Zementhydratation	674
2.1.6	Der Zementstein	674
2.2	Gesteinskörnungen für Beton	677
2.2.1	Allgemeines	677
2.2.2	Art und Eigenschaften des Gesteins	678
2.2.3	Schädliche Bestandteile	679
2.2.4	Kornform und Oberfläche	683
2.2.5	Größtkorn und Kornzusammensetzung	683
2.3	Betonzusatzmittel	686
2.3.1	Definition	686
2.3.2	Arten von Betonzusatzmitteln	686
2.3.3	Anwendungsregeln für Betonzusatzmittel	689
2.4	Betonzusatzstoffe	690
2.4.1	Definitionen	690
2.4.2	Inerte Stoffe und Pigmente	690
2.4.3	Puzzolanische Stoffe	691
2.4.4	Latent-hydraulische Stoffe	696
2.4.5	Kunststoffdispersionen	697
2.4.6	Fasern	697
2.5	Zugabewasser	697
3	Frischbeton und Nachbehandlung	697
3.1	Allgemeine Anforderungen	697
3.2	Mehlkorngehalt	698
3.3	Rohdichte und Luftgehalt	698
3.4	Verarbeitbarkeit und Konsistenz	699
3.5	Transport und Einbau	701
3.6	Entmischen	703
3.7	Nachbehandlung	705
3.7.1	Nachbehandlungsarten	705
3.7.2	Dauer der Nachbehandlung	706
3.7.3	Zusätzliche Schutzmaßnahmen	708
4	Junger Beton	708
4.1	Bedeutung und Definition	708
4.2	Hydrationswärme	708
4.3	Verformungen	709
4.4	Dehnfähigkeit und Rissneigung	709
4.5	Bestimmung der Festigkeit von jungem Beton	711
5	Lastunabhängige Verformungen	711
5.1	Allgemeines	711
5.2	Temperaturdehnung	712
5.3	Schwinden	713
5.3.1	Ursachen	713
5.3.2	Mathematische Beschreibung	714
6	Festigkeit und Verformung von Festbeton	715
6.1	Strukturmerkmale	715
6.2	Druckfestigkeit	716
6.2.1	Spannungszustand und Bruchverhalten von Beton bei Druckbeanspruchung	716
6.2.2	Einflüsse auf die Druckfestigkeit	716
6.2.2.1	Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung	716
6.2.2.2	Erhärtungsbedingungen und Reife	718
6.2.2.3	Prüfeinflüsse	721
6.2.3	Festigkeitsklassen	722
6.3	Zugfestigkeit	722
6.3.1	Bruchverhalten und Bruchenergie	722
6.3.2	Einflüsse auf die Zugfestigkeit	723
6.3.3	Zentrische Zugfestigkeit	723
6.3.4	Biegezugfestigkeit	724
6.3.5	Spaltzugfestigkeit	724
6.3.6	Verhältniszerte für Druck- und Zugfestigkeit	724

- 6.4 Festigkeit bei mehrachsiger Beanspruchung 725
- 6.5 Spannungs-Dehnungsbeziehungen 726
  - 6.5.1 Elastizitätsmodul und Querdehnzahl 726
- 6.6 Einfluss der Zeit auf Festigkeit und Verformung 727
  - 6.6.1 Die zeitliche Entwicklung von Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul 727
  - 6.6.2 Verhalten bei Dauerstandsbeanspruchung 728
    - 6.6.3 Zeitabhängige Verformungen 728
      - 6.6.3.1 Definitionen 728
      - 6.6.3.2 Kriechverhalten von Beton 729
      - 6.6.3.3 Vorhersageverfahren 731
    - 6.6.4 Verhalten bei dynamischer Beanspruchung 732
    - 6.6.5 Ermüdung 733
    - 6.6.7 Brandverhalten 737
  - 7 Dauerhaftigkeit 737
    - 7.1 Überblick über die Umweltbedingungen, Schädigungsmechanismen und Mindestanforderungen 738
    - 7.2 Widerstand gegen das Eindringen aggressiver Stoffe 745
    - 7.3 Korrosionsschutz der Bewehrung im Beton 746
      - 7.3.1 Allgemeine Anforderungen 746
      - 7.3.2 Karbonatisierung 747
      - 7.3.3 Eindringen von Chloriden 749
    - 7.4 Frostwiderstand und Frost-Taumittel-Widerstand 751
    - 7.5 Widerstand gegen chemische Angriffe 753
    - 7.6 Verschleißwiderstand 754
    - 7.7 Feuchtigkeitsklassen nach DAFStb-Alkali-Richtlinie 755
    - 7.8 Wassereindringwiderstand 756
  - 8 Selbstverdichtender Beton 756
    - 8.1 Allgemeines 756
    - 8.2 Mischungsentwurf 756
    - 8.3 Prüfungen am Mörtel 757
    - 8.4 Prüfungen am Beton 758
    - 8.5 Eigenschaften 760
    - 8.6 Normative Anmerkungen 761
  - 9 Sichtbeton 761
    - 9.1 Einführung 761
    - 9.2 Planung und Ausschreibung 761
    - 9.3 Betonzusammensetzung und Betonherstellung 762
    - 9.4 Einbau und Nachbehandlung 763
      - 9.4.1 Schalung und Trennmittel 763
      - 9.4.2 Ausführung und Nachbehandlung 764
    - 9.5 Beurteilung 764
    - 9.6 Mängel und Mängelbeseitigung 764
      - 9.6.1 Sichtbetonmängel 764
      - 9.6.2 Mängelbeseitigung bei Sichtbeton 765
      - 9.6.3 Architektonisch bedeutsame Bausubstanz 766
    - 9.7 Sonder-Sichtbetone 766
  - 10 Leichtbeton 767
    - 10.1 Einführung und Überblick 767
    - 10.2 Konstruktionsleichtbeton nach DIN EN 1992-1-1 768
      - 10.2.1 Grundlegende Eigenschaften 768
      - 10.2.2 Leichte Gesteinskörnung 769
      - 10.2.3 Betonzusammensetzung 770
      - 10.2.4 Herstellung, Transport und Verarbeitung 772
      - 10.2.5 Festbetonverhalten von Konstruktionsleichtbeton 773
      - 10.2.6 Zur Planung von Bauwerken aus Konstruktionsleichtbeton 776
      - 10.2.7 Selbstverdichtender Konstruktionsleichtbeton 777
    - 10.3 Porenbeton 778
    - 10.4 Haufwerksporiger Leichtbeton 779
  - 11 Faserbeton 780
    - 11.1 Allgemeines 780
    - 11.2 Zusammenwirken von Fasern und Matrix 781
      - 11.2.1 Ungerissener Beton 781
      - 11.2.2 Gerissener Beton 782
    - 11.3 Fasern 787
      - 11.3.1 Stahlfasern 788
      - 11.3.2 Glasfasern 788
        - 11.3.3 Organische Fasern 788
          - 11.3.3.1 Kunststofffasern (Polymerfasern) 789
          - 11.3.3.2 Kohlenstofffasern 789
          - 11.3.3.3 Fasern natürlicher Herkunft – Zellulosefasern 790
      - 11.4 Zusammensetzung 790
        - 11.4.1 Beton 790
        - 11.4.2 Fasern 790
        - 11.5 Eigenschaften 791
          - 11.5.1 Verhalten bei Druckbeanspruchung 791
          - 11.5.2 Verhalten bei Zugbeanspruchung und bei Biegebeanspruchung 791
          - 11.5.3 Verhalten bei Querkraft- und Torsionsbeanspruchung 792
          - 11.5.4 Verhalten bei Explosions-, Schlag- und Stoßbeanspruchung 792
          - 11.5.5 Kriechen und Schwinden 792
          - 11.5.6 Dauerhaftigkeit 793
          - 11.5.7 Frost- und Taumittel-Widerstand 793
          - 11.5.8 Verhalten bei hoher Temperatur 793
          - 11.5.9 Verschleißwiderstand 794
        - 11.6 Normen und Grundlagen 794
      - 12 Ultrahochfester Beton 794
      - 13 Carbonbeton 794
      - 14 Betone unter Verwendung von Geopolymeren und alkalisch-aktivierten Bindemitteln 796
      - 15 Nachhaltigkeit im Betonbau 798
        - 15.1 Einführung 798
        - 15.2 Nachhaltigkeitsbewertung 799
        - 15.3 Klinkereffiziente Zemente 799

- 15.4 Ökobetone 800
- 15.5 Neue Bindemittel 801
- 16 Betonrecycling 802
- 16.1 Allgemeines 802
- 16.2 Rezyklierte Gesteinskörnungen aus Betonbruch 802
- 16.3 Betonbrechsande als Bindemittelkomponente 805
- 16.4 Frischbetonrecycling 806
- 17 Numerische Simulation des Betonverhaltens 806
- 18 Normative Entwicklungen und neue Richtlinien 808
- 18.1 Dauerhaftigkeitskonzept im neuen Eurocode 2 – Expositions-Widerstandsklassen 808
- XV Die neue DIN 1045-3 „Bauausführung“ mit ihren wesentlichen Änderungen 831**  
Roland Pickhardt, Thomas Richter
- 1 Regelwerksstand alt und neu – formale Änderungen 833
- 2 Maßgebliche Änderungen im Überblick 833
- 3 Umsetzung der Betonbauqualitätsklassen BBQ auf der Baustelle 834
- 3.1 Ausführungsklassen (AK) und Betonbauqualitätsklassen (BBQ) 834
- 3.2 BBQ-Ausführungsgespräche – Startgespräch und Bauverlaufgespräche 835
- 3.3 Maßnahmen und Anforderungen in Abhängigkeit der Ausführungsklasse 836
- 4 Qualitätssicherung und Überwachung 838
- 4.1 Überwachungsklassen 838
- 4.2 Überwachung des Betons und seines Einbaus – Anhänge 838
- 5 Traggerüste und Schalungen 843
- 6 Bewehren 843
- 7 Vorspannen 844
- 8 Betonieren und Oberflächenbearbeitung 844
- 8.1 Überblick 844
- 8.2 Vorbereitende Arbeiten und Betonannahme 844
- 8.3 Fördern, Einbringen, Verdichten 845
- 8.4 Nachbehandlung und Schutz des Betons 845
- 8.5 Oberflächenbearbeitung und Sichtflächen 848
- 9 Fugen 848
- 10 Bauen mit vorgefertigten Bauteilen 849
- 11 Maßtoleranzen 849
- Literatur 849
- XVI Beton im Tunnelbau 851**  
Rolf Breitenbücher, Sven Plückelmann
- 1 Einleitung 855
- 2 Aktuelle Regelwerke 855
- 3 Grundsätzliche Anforderungen an Tunnelauskleidungen 855
- 4 Spritzbeton im Tunnelbau 857
- 4.1 Grundsätze 857
- 4.2 Verfahren 859
- 4.2.1 Trockenspritzverfahren 859
- 4.2.2 Nassspritzverfahren 860
- 4.3 Ausgangsstoffe 860
- 4.3.1 Gesteinskörnung 860
- 4.3.2 Bindemittel 861
- 4.3.2.1 Normzemente (EN 197) 861
- 4.3.2.2 Spritzbindemittel nach ÖVBB-Richtlinie „Spritzbeton“ bzw. DIN 1164-11 862
- 4.3.3 Betonzusatzstoffe 862
- 4.3.3.1 Puzzolanische/latent-hydraulische Zusatzstoffe (Typ II) 862
- 4.3.3.2 Inerte Betonzusatzstoffe (Typ I) 863
- 4.3.4 Betonzusatzmittel 863
- 4.3.4.1 Fließmittel/Betonverflüssiger 863
- 4.3.4.2 Luftporenbildner/Mikrohohlkugeln 864
- 4.3.4.3 Erstarrungsverzögerer 864
- 4.3.4.4 Konsistenzregler 864
- 18.1.1 Allgemeines 808
- 18.1.2 Expositions-Widerstandsklassen nach neuem Eurocode 2 809
- 18.1.3 Umsetzung in Deutschland 810
- 18.2 Neue DAfStb-Richtlinien 811
- 18.2.1 Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung 812
- 18.2.2 Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton 812
- 18.2.2.1 Einordnung der Richtlinie in den Rahmen von EN 1990 und einschlägigen Klimaschutzziele 812
- 18.2.2.2 Konkrete Zielsetzungen der Richtlinie 813
- Literatur 813

4.3.4.5	Erstarrungsbeschleuniger	864	5.3.7.1	Betone mit wasserundurchlässigem Gefüge	891
4.3.4.6	Rückprallminderer	864	5.3.7.2	Chemischer Angriff	891
4.3.4.7	Zusammenwirken von mehreren Betonzusatzmitteln	865	5.3.7.3	Frostangriff mit/ohne Taumittel – Verwendung von Luftporenbeton	892
4.4	Anforderungen, Eigenschaften, Klassifizierung, Maßnahmen	866	5.3.7.4	Brandschutz	893
4.4.1	Allgemeines	866	5.3.7.5	Faserbeton	894
4.4.2	Frischbeton im Nassspritzverfahren	866	5.3.7.6	Helle Tunnelinnenschalen	894
4.4.3	Junger Spritzbeton – Frühfestigkeit	866	6	Offene Bauweise – Tunnelschalen	895
4.4.3.1	Klassifizierung und Einflüsse	866	7	Maschinelles Schildvortrieb – Tübbinge	895
4.4.3.2	Ermittlung der Frühfestigkeit	868	7.1	Grundsätzliche Bauweisen	895
4.4.4	Festbetoneigenschaften	869	7.2	Ring- und Tübbinggeometrie	896
4.4.4.1	Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul	869	7.3	Grundanforderungen an Tübbinge	896
4.4.4.2	Probenahmen für Festbetonprüfungen, Überwachung von Spritzbeton	870	7.4	Herstellung von Tübbingen	898
4.4.4.3	Dauerhaftigkeit – Expositionsklassen	871	7.5	Betontechnologie für Tübbinge	899
4.4.4.4	Versinterungspotenzial	871	7.5.1	Grundsätze für die Betonzusammensetzung und Anforderungen	899
4.4.5	Rückprall	872	7.5.2	Betonausgangsstoffe und Beton- zusammensetzung	899
4.4.6	Faserspritzbeton	874	7.5.3	Wärmebehandlung	900
4.4.7	Hinweise zu weiteren spezifischen Spritzbetoneigenschaften	875	7.5.4	Faserbeton	901
4.4.8	Einflüsse auf die maßgebenden Spritzbetoneigenschaften	877	7.6	Bewehrung von Tübbingen	902
4.5	Empfehlungen zur Wahl der Ausgangsstoffe und Zusammensetzungen	878	7.6.1	Stahlbetontübbinge	902
5	Bergmännische Bauweise	880	7.6.1.1	Allgemeines	902
5.1	Bauteile	880	7.6.1.2	Betondeckung	902
5.2	Sohlgewölbe und Sohlplatten	880	7.6.1.3	Flächenbewehrung	903
5.3	Innenschalen	881	7.6.1.4	Fugenbewehrung	903
5.3.1	Anforderungen	881	7.6.1.5	Bewehrungsgehalt	903
5.3.1.1	Generelle Anforderungen	881	7.6.2	Stahlfaserbetontübbinge	903
5.3.1.2	Verminderung der Rissbildung	881	7.6.3	Hybride Tübbinge	903
5.3.1.3	Ausschalfestigkeit	884	7.7	Nachgiebige Tübbingsysteme für druckhaftes Gebirge	904
5.3.1.4	Frischbetontemperatur	885	7.7.1	Allgemeines	904
5.3.1.5	Druckfestigkeit	886	7.7.2	Materialtechnologie	904
5.3.1.6	Verarbeitbarkeit	886	8	Ringspaltmörtel	906
5.3.2	Ausgangsstoffe	886	8.1	Aufgabe des Ringspaltmörtels	906
5.3.2.1	Gesteinskörnung	886	8.2	Differenzierung von Ringspaltmörteln	906
5.3.2.2	Zement	887	8.3	Anforderungen an Ringspaltmörtel	907
5.3.2.3	Betonzusatzstoffe und -zusatzmittel	887	8.4	Technologie der Einkomponenten- Ringspaltmörtel	908
5.3.3	Betonzusammensetzung	888	8.5	Zweikomponenten-Ringspaltmörtel	910
5.3.4	Verarbeitung	889	8.6	Ringspaltverfüllungen	912
5.3.5	Nachbehandlung	890	8.7	Stauchfähige Ringspaltmörtel	912
5.3.6	Firstspaltverpressung	890		Literatur	914
5.3.7	Betone für besondere Anwendungen	891			

**XVII Renaissance der calcinierten Tone – Herausforderungen und Leistungsfähigkeit von klinkerarmen Betonen der Zukunft** 923

Nancy Beuntner, Julian Link, Steffen Overmann, Christiane Rößler, Corinna Rozanski, Tobias Schack, Sebastian Scherb, Thomas Sowoidnich, Ricarda Sposito, Torben Gädt, Michael Haist, Horst-Michael Ludwig, Thomas Matschei, Karl-Christian Thienel

1	Einleitung	925	3	Tone und Tonminerale	926
2	Historie und aktuelle Anwendungen von calcinierten Tonen	926	4	Herstellung calcinierter Tone	927

- 
- 5 Eigenschaften calcinierter Tone im zementären System 929
  - 5.1 Reaktivität calcinierter Tone 929
  - 5.2 Physikalische Charakteristika calcinierter Tone und ihr Einfluss auf rheologische Eigenschaften von Bindemittelsystemen 930
  - 5.3 Hydratation und Gefügeentwicklung 932
    - 5.3.1 Interaktion mit der frühen Zementhydratation 932
    - 5.3.2 Puzzolanische Reaktion und Phasenentwicklung 934
    - 5.3.3 Mikrostruktur (und Gefügeentwicklung) 935
  - 6 Baustoffeigenschaften von Mörteln und Betonen mit calcinierten Tonen 938
    - 6.1 Rheologie und Verarbeitbarkeit 938
    - 6.2 Festigkeitsentwicklung 940
    - 6.3 Wechselwirkung mit Betonzusatzmitteln 942
    - 6.4 Verformungsverhalten 944
  - XVIII Normen und Regelwerke 973**  
Frank Fingerloos
  - 1 Einleitung 977
  - 2 Listen und Verzeichnisse 977
    - 2.1 Technische Baubestimmungen für den Beton- und Stahlbetonbau 977
    - 2.2 Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. (DAfStb): Richtlinien und Hefte 1000
    - 2.3 Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E. V. (DBV): Merkblätter, Sachstandberichte und Hefte 1003
    - 2.4 Österreichische Bautechnik Vereinigung (ÖBV): Richtlinien, Merkblätter und Sachstandberichte 1006
  - 3 DIN 1045-1000: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1000: Grundlagen und Betonbauqualitätsklassen (BBQ) 1009
  - Vorwort 1009
    - 1 Anwendungsbereich 1009
    - 2 Normative Verweisungen 1010
    - 3 Begriffe 1010
      - 3.1 Betonbaukonzept, vorläufiges Betonbaukonzept 1011
      - 3.2 Betonbauqualitätsklasse BBQ 1011
      - 3.3 Betonfachgespräche 1011
      - 3.4 Planungsklasse PK 1011
      - 3.5 Betonklasse BK 1011
      - 3.6 Ausführungsklasse AK 1011
      - 3.7 BBQ-Phase 1011
      - 3.8 Dokumentation 1011
    - 6.4.1 Schwinden 944
    - 6.4.2 Kriechen 946
    - 6.5 Dauerhaftigkeit 948
      - 6.5.1 Gefügeausprägung und Porosität von Systemen mit calcinierten Tonen 948
      - 6.5.2 Expositionen und Dauerhaftigkeitspotenzial der calcinierten Tone 950
    - 7 Normative Regelungen zum Einsatz und zur Prüfung calcinierter Tone 956
      - 7.1 Calcinierte Tone als Betonzusatzstoff 956
      - 7.2 Calcinierte Tone als Zementhauptbestandteil 956
    - 8 Prüfung der Reaktivität calcinierter Tone 957
    - 9 Ökobilanz beim Einsatz calcinierter Tone 957
    - 10 Zusammenfassung und Ausblick 959  
Literatur 962
    - 3.9 fachkundige Person 1011
    - 3.10 BBQ-Koordinator 1011
    - 3.11 Federführende 1012
    - 3.12 Fertigteil, Betonfertigteil 1012
    - 3.13 Kommunikation 1012
    - 4 Festlegung von Betonbauqualitätsklassen 1012
    - 5 Maßnahmen zur Sicherstellung der Betonbauqualität 1013
      - 5.1 Allgemeines 1013
      - 5.2 Anforderungen an die Kommunikation 1016
      - 5.3 Festlegungen und technische Anforderungen 1017
      - 5.4 Kenntnisse in der Betonbautechnik 1017
    - A Anhang A (normativ)  
Kommunikation im Rahmen der Qualitätssicherung für die Errichtung von Betonbauwerken in den Klassen BBQ-E und BBQ-S 1017
      - A.1 Allgemeines 1017
      - A.2 Bauwerke in Ortbetonbauweise 1017
        - A.2.1 BBQ-Ausschreibungsgespräch 1017
          - A.2.1.1 Aufgaben 1017
          - A.2.1.2 Teilnehmer 1017
        - A.2.2 BBQ-Ausführungsgespräche – Startgespräch 1018
          - A.2.2.1 Aufgaben 1018
          - A.2.2.2 Teilnehmer 1018
        - A.2.3 BBQ-Ausführungsgespräche – Bauverlaufgespräche 1018
          - A.2.3.1 Aufgaben 1018
          - A.2.3.2 Teilnehmer 1018
          - A.2.4 Dokumentation 1020



und damit der längste Tunnel der Jinghu-Hochgeschwindigkeitsbahn. Die LCA-Analyse berücksichtigt die CO<sub>2</sub>-Emissionen und den Energieverbrauch über die Bau- und Betriebsprozesse hinweg. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Energieverbrauch, verursacht durch Materialproduktion, Wartung und Materialtransport, wurden berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen, dass die während des Bauvorgangs verwendeten Materialien etwa 97,1 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Lebenszyklus ausmachen, während die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Betriebs- und Wartungsprozesses im Vergleich zum Bauprozess gering sind. In Bezug auf den Energieverbrauch benötigt der Wartungsprozess über 55 % der Lebenszyklusenergie. Der Energieverbrauch des Tunnelbauvorgangs beträgt etwa 44,3 %.

#### 4 Fallbeispiel einer Tunnel-Nachhaltigkeitsbewertung

Im Folgenden wird ein Fallbeispiel einer teilautomatisierten Nachhaltigkeitsbewertung von Tunnelbauwerken auf Basis eines digitalen Bauwerksmodells gegeben. Dies erfolgt in der Softwareanwendung Autodesk Revit mit der visuellen Schnittstelle Dynamo.

Dynamo fungiert als kostenfreie und Open-Source-Plattform von Autodesk, die visuelle Programmierung mit einer direkten Schnittstelle in die Modellautorensoftware „Autodesk Revit“ ermöglicht. Mit Dynamo können mathematische Berechnungen, Dataming und verschiedene Auswertungen nahtlos in ein Revit-Modell integriert werden. Des Weiteren ermöglicht Dynamo die Erstellung von einfachen sowie komplexen Geometrien im Rahmen des generativen Designs [106].

Die Plattform ermöglicht auch die Umsetzung parametrischer Systeme und die bidirektionale Synchronisation von Daten mit Datenbanken [107]. Insgesamt lassen sich die Anwendungen von Dynamo zur Unterstützung von Entwurfs- und Automatisierungsprozessen zusammenfassen. Dank der Open-Source-Natur von Dynamo wird die Plattform kontinuierlich von Anwendern weiterentwickelt. Mithilfe von Nutzer-Foren, Video-Tutorials und dem Leitfaden „Dynamo Primer“ [108] können Benutzer eigenständig mit Dynamo arbeiten, ohne auf aufwendige oder kostenpflichtige Schulungen angewiesen zu sein.

Unter dem Begriff „visuelle Programmierung“ versteht sich in Dynamo das logikbasierte Anordnen von Code-Blöcken im Arbeitsbereich durch Ingenieure und Architekten [107]. Der Datenfluss erfolgt in der Regel von links nach rechts, wobei durch die Verbindung der Code-Blöcke über Drähte ein Datenfluss von der Eingabe zur Ausgabe entsteht. Basisblöcke in der Objektbibliothek bieten vorinstallierte Anschlüsse für Drahtverknüpfungen sowie Ein- und Ausgänge. Die Community stellt darüber hinaus benutzerdefinierte Blöcke und Add-ons in Form von Paketen für erweiter-

te Anwendungen in Dynamo bereit. Generierte Outputs können im Hintergrund des Arbeitsbereichs visualisiert werden. Vorkenntnisse in der Programmierung sind nicht zwingend erforderlich, jedoch können verschiedene Programmiersprachen wie beispielsweise Python zur Integration von Abfragen oder Berechnungen genutzt werden.

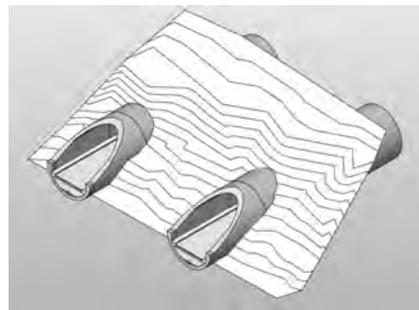
Der Untersuchungsgegenstand im Demonstrator soll die Nachhaltigkeitsbewertung von folgenden ökologischen Kriterien aus den BASt-Berichten [81, 89] sein, welche durch Integration von Nachhaltigkeitsinformationen aus der Datenbank ÖKOBAUDAT, bewertet werden sollen.

- Globales Erwärmungspotenzial – total (GWP – total),
- Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht (ODP),
- Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon (POCP),
- Versauerungspotenzial, kumulierte Überschreitung (AP),
- Überdüngungspotenzial bzw. Eutrophierungspotenzial – Land (terrestrial) (EP).

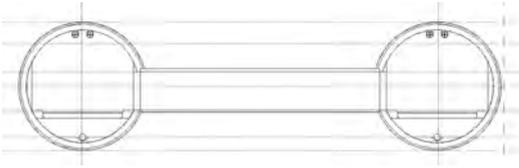
Ziel ist es, eine Bewertung exemplarisch durchzuführen, um Anforderungen an die Parametrisierung des Tunnelmodells zu identifizieren sowie mögliche Herausforderungen bei der digitalen und modellbasierten Nachhaltigkeitsbewertung herauszustellen. Die Berücksichtigung der Nutzungsdauer des Bauwerks und der einzelnen Bauteile inklusive Erhaltungs- und Ersatzzyklus bleiben vorerst in dieser Betrachtung außer Acht.

##### 4.1 Modellinformationen

Als Demonstrator wird ein einfaches Bespieltunnelobjekt gewählt, welches vorab zu diesem Zweck modelliert wird. Da die Tunnelkonstruktion im Fokus steht, welche auf die Gesamtröhrenlänge als konstant angenommen wird, ist das Modell verkürzt dargestellt. Es handelt sich um zwei Richtungstunnel, sodass kein Gegenverkehr in einer Tunnelröhre geplant ist, siehe Bild 6.



**Bild 6.** Demonstrator aus zwei Tunnelrichtungsrohren (eigene Modellierung, ICoM)



**Bild 7.** Querschnitt des Demonstratortunnels (eigene Modellierung, ICoM, RWTH)

**Tabelle 8.** Beispielhafte Darstellung der Parametrisierung im Demonstratortunnel (eigene Modellierung, ICoM, RWTH)

Text	
Baumaterial	Stahlbeton
LevelOfGeometry_LoG	300
LevelOfInformation_LoI	300
MittlereEbene	Außenschale
ObereEbene	Tunnelröhre
Objektebene	Portal
Materialien und Oberflächen	
Betonstahlsorte	B500A
Bewehrungsgrad	150 000
Festigkeitsklasse	C35/45
Bemaßungen	
Volumen	563 407 m <sup>3</sup>

Diese zwei Tunnelröhren sind zudem über einen Verbindungstunnel verbunden. Für die Durchführung einer beispielhaften Nachhaltigkeitsbewertung zur Darstellung der Machbarkeit über Autodesk Dynamo, ist die realitätsnahe Konstruktionswahl und Modellierung nicht im Fokus der Untersuchungen. Vielmehr spielt sich die Nachhaltigkeitsbewertung auf Ebene der semantischen Informationen ab, weshalb hier die Rolle sowie die Auswahl verschiedener Parameter und ihrer Eigenschaften vordergründlich untersucht wird. Wie Abstraktionsmodelle von Bauwerken über den Lebenszyklus entwickelt und welchen Nutzen sie für parametrisch fokussierte Untersuchungen haben, wird in [109] beschrieben.

Der Querschnitt des Beispieletunnelabschnitts ist in Bild 7 dargestellt. Er setzt sich zusammen aus dem linken und rechten Richtungstunnel sowie dem Längsschnitt des Verbindungstunnels.

Die einzelnen Richtungstunnelröhren sind spiegelverkehrt identisch aufgebaut. Neben der Tunnelschale und der Fahrbahn ist der Tunnel von unten nach oben wie folgt aufgebaut: Unten liegt die Drainage-Schüttung aus Kies, worin das Drainagerohr eingebettet ist. Darauf liegt eine Schotterauffschüttung, dann folgt der Fahrbahnunterbau und der Straßenbelag. An beiden Seiten neben der Fahrbahn ist ein Gehweg angeordnet.

Ventilatoren zur Tunnelbelüftung sind an der Tunneldecke jeweils paarweise angebracht. Die Tunnelschale ist mit Stahlbetonfertigteilen und einer Außenschale modelliert. Zum Verbindungstunnel sind Notausgangszugänge angeordnet.

Neben der Geometrie werden Eigenschaften der Bauteile in den semantischen Informationen, wie in Tabelle 8 exemplarisch für das Tunnelportal gezeigt, berücksichtigt. Das Tunnelportal ist 15 m, die Tunnelröhre 35 m lang und beide haben einen Innendurchmesser von knapp 10 m.

## 4.2 Durchführung der Untersuchung

Zunächst werden die Bauwerksobjekte zur Untersuchung gewählt, welche sich in ihrer Materialart unterscheiden. Damit die Ergebnisse übersichtlich mit der Gesamtmasse auf die Bezugsgröße Tunnellänge übertragen werden können, werden die Objekte mit den größten Massen gewählt (Tunnelportal und Tunnelröhre aus Stahlbeton), wobei eine Repräsentanz der Werte nur bei Berechnung aller Bauteile je Meter Tunnellänge sichergestellt werden kann. Um auch weitere Materialwahlen untersuchen zu können, werden das Drainagerohr, die Schotterauffüllung und der Straßenbelag ebenso ausgewählt. Eine Übersicht der gewählten Objekte und der für die Bewertung relevanten Parameter zeigt Tabelle 9.

Die Volumina der Stahlmassen im Stahlbeton müssen über den Parameter des Bewehrungsgrads durch eine Berechnung im Dynamo-Skript bestimmt werden. Dazu wird das Betonvolumen mit dem Bewehrungsgrad multipliziert.

Für die Verknüpfung der Bauteilmaterialien im Revit-Bauwerksmodell mit den Umweltinformationen der ÖKOBAUDAT werden zunächst die entsprechenden Materialien, gemäß EN 15804 + A2, in der ÖKOBAUDAT identifiziert. Eine Auflistung der Umwelt-Materialparameter der ÖKOBAUDAT liefert Tabelle 10.

Des Weiteren fließen für einen späteren Vergleich von unterschiedlichen Materialien für das gleiche Bauteil noch alternative Materialien für das Beton und die Stahlbewehrung der Stahlbetonbauteile von Tunnelportal und Tunnelröhre ein. Die alternativen Materialien und ihre Umweltparameter der ÖKOBAUDAT sind in der Tabelle 11 dargestellt. Es zeigt sich beispielsweise direkt, dass die Umweltkalkulationswerte für GWP-Berechnungen für die Stahlbewehrung stark abweichen, je nachdem, ob in der ÖKOBAUDAT das Material „Stahlbewehrung“ oder „Betonstahlmatten und Gitterträger“ gewählt wird. Dies gründet unter anderem darauf, dass die Umweltkalkulationswerte auf unterschiedliche Massen referenziert in der ÖKOBAUDAT dargestellt werden. So wird für die „Stahlbewehrung“ die Umweltdaten je 1 · 1 kg [112] Masse angegeben und für die „Betonstahlmatten und Gitterträger“ eine Masse von 1000 · 1 kg [115] referenziert.

Somit gründet sich die Nachhaltigkeitsbewertung im Demonstrator auf die Revit-Parameter des Modells

**Tabelle 9.** Auswahl der zu untersuchenden Objekte im Demonstrator (eigene Modellierung, ICoM, RWTH)

Objektname	GUID im Modell	Element	Materialname im Modell	Volumen im Modell [m <sup>3</sup> ]	Weitere relevante Parameter
Schotterauffüllung	2tgscVX6n1KKBkZLzp63wF	2569187	Schotter	1080,41	–
Portal Außenschale	11 nt_n_EXAn9W8GP2_Ysmt	2542983	Stahlbeton	563,41	Betonstahlsorte: B500A Bewehrungsgrad: 150 Festigkeitsklasse: C35/45
Tunnelröhre Außenschale	0qdOEQPXb0yRkZH4_VxwCC	2512777	Stahlbeton	1135,26	siehe Portal
Drainagerohr	2tgscVX6n1KKBkZLzp64cn	2573533	Kunststoff	28,27	–
Straßenbelag	2tgscVX6n1KKBkZLzp63LI	2570302	Gussasphalt	84,00	–

**Tabelle 10.** Umweltkalkulationswerte der ÖKOBAUT für die gewählten Bauteile im Demonstrator [110–114]

Materialname ÖKOBAUDAT	Lebenszyklus	GWP (total) [kg CO <sub>2</sub> eq.]	ODP [kg CFC-11 eq.]	POCP [kg NMVOC eq.]	AP [Mole of H <sup>+</sup> eq.]	EP (terrestrial) [Mole of N eq.]
Beton C35/45 UUID: bb694d91-46f5-44f1-9693-6a9e56ea10d3	A1–A3	163,8	3,806E-13	0,4462	0,4186	1,797
	A4	3,302	1,195E-15	0,05506	0,03794	0,2112
	A5	1,296	8,627E-16	0,01265	0,009048	0,04849
	B1	–1,418	0	0	0	0
	C1	8,64	2,96E-15	0,143	0,0975	0,544
	C2	9,549	3,206E-15	0,02836	0,03183	0,1644
	C3	4,39	9,492E-16	0,03843	0,02847	0,1465
	C4	0	0	0	0	0
	D	–9,561	–1,266E-10	–0,01618	–0,02051	–0,08403
Bewehrungsstahl UUID: 8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dd3	A1–3	0,6154	1,007E-11	0,001328	0,001339	0,004135
	C1	0,00032	5,53E-17	0,000005874	0,000004309	0,00002159
	C2	0,003551	6,171E-16	0,00000953	0,00001055	0,00005478
	D	0,1445	–2,946E-13	0,0002603	0,0003256	0,0008461
Schotter 16/32 UUID: 85fc79d8-ba39-4236-993e-eeb928d9ae6f	A1–A3	0,007841	1,229E-13	0,00001833	0,00001954	0,00008851
	C1	0,0002932	5,069E-17	0,000005384	0,00000395	0,00001979
	C2	0,003254	5,656E-16	0,000008736	0,000009667	0,00005022
	C3	0,006766	1,887E-14	0,0000401	0,00004268	0,0001543
	D	–0,001575	–1,327E-14	–0,000005881	–0,000006343	–0,00002905
Regenabflussrohr SML UUID: 0ff1831a-bca2-44d0-a277-e416eb8a9b5a	A1–A3	0,6412	8,63E-12	0,003749	0,001375	0,004305
	C1	0,00032	5,53E-17	0,000005874	0,000004309	0,00002159
	C2	0,003551	6,171E-16	0,00000953	0,00001055	0,00005478
	D	0,1204	–2,455E-13	0,0002169	0,0002714	0,0007051
Gussasphalt UUID: 2d7f6993-c585-4674-b030-348434efeaca	A1–A3	0,1023	1,919E-13	0,0001794	0,000183	0,000572
	A5	0,0008579	1,493E-16	0,0004337	0,000001222	0,000005628
	C1	0,0005676	7,438E-16	0,000001665	0,000003973	0,000014
	D	–0,01701	–6,287E-14	–0,0003252	–0,00003476	–0,00006561

**Tabelle 11.** Umweltkalkulationswerte der ÖKOBAUDAT für den Materialvergleich [115, 116]

Materialname ÖKOBAUDAT	Lebenszyklus	GWP (total) [kg CO <sub>2</sub> eq.]	ODP [kg CFC-11 eq.]	POCP [kg NMVOC eq.]	AP [Mole of H+ eq.]	EP (terrestrial) [Mole of N eq.]
Beton C35/45 UUID: 2763644a-7b32- 409c-ab00- 0ad0a862fcd	A1–A3	183,1	4,868E-13	0,2877	0,3259	1,172
	A4	3,339	1,208E-15	0,05568	0,03836	0,2135
	A5	11,7	2,631E-14	0,03351	0,03074	0,1348
	B1	-4,315	0	0	0	0
	C1	8,64	2,96E-15	0,143	0,0975	0,544
	C2	9,657	3,242E-15	0,02868	0,03219	0,1662
	C3	3,474	9,598E-16	0,03886	0,02879	0,1482
	C4	0	0	0	0	0
	D	-9,668	-1,281E-10	-0,01636	-0,02074	-0,08498
Betonstahlmatten und Gitterträger UUID: 065c4bb7- df48-458d-87f2- 37e237a6ab90	A1–A3	544,3	1,659E-11	0,9461	1,388	3,335
	C1	2,233	1,047E-14	0,008347	0,011	0,02783
	C2	0,1267	2,486E-17	0,0001099	0,0001275	0,0004714
	C3	0	0	0	0	0
	C4	0,7363	2,936E-15	0,004236	0,005386	0,01536
	D	469,5	-2,2E-12	0,902	1,299	2,923

**Bild 8.** Dynamo-Skript zur ökologischen Nachhaltigkeitsbewertung (eigene Programmierung, ICoM, RWTH)

und die ÖKOBAUDAT-Umweltdaten. Das erstellte Dynamo-Skript für die Demonstratorrestung des Tunnels ist in Bild 8 veranschaulicht.

Damit eine Berechnung in Dynamo stattfinden kann, werden die Revit-Bauteile ausgewählt (siehe Gruppen-Codeblöcke in (1)), die in csv exportierte ÖKOBAUDAT-Daten im Excelformat importiert und die einzelnen relevanten Spalten, Zeilen und Zellen der Exceltabelle referenziert (siehe Gruppen-Codeblöcke in (2)). Die Berechnung, beispielsweise des GWP-Wertes er-

folgt dann durch Integration der Berechnungsformel, des ÖKOBAUDAT-Umweltkalkulationswerts und des Revit-Objektvolumens in einem Codeblock in Dynamo (siehe Gruppen-Codeblöcke in (3)).

$$\text{GWP} \left[ \frac{\text{kg CO}_2}{\text{m}} \right] = \text{GWP}_{\text{ÖKOBAUDAT}} [\text{kg CO}_2 \text{ eq.}] \cdot \frac{\text{Masse} [\text{kg}]}{L_{\text{Tunnel}} [\text{m}]} \quad (4)$$

GWP Global Warming Potential als Kriterium der Umweltauswirkung  
 $\text{GWP}_{\text{ÖKOBAUDAT}}$  Umweltkalkulationswert  
 $L_{\text{Tunnel}}$  Tunnellänge als BezugsgröÙe

Dies erfolgt dann für alle Phasen des Lebenszyklus von A1–A2 bis D (siehe Gruppen-Codeblöcke in (4)). Zum Schluss werden je Kriterium die Werte über den Lebenszyklus addiert (siehe Gruppen-Codeblöcke in (5)) und in einer Tabelle die Ergebnisse zusammengetragen.

### 4.3 Ergebnisse

Im Demonstrator für die Nachhaltigkeitsbewertung eines exemplarischen Tunnels sind fünf ökologische Nachhaltigkeitskriterien über den Lebenszyklus der Phasen A1–A3 bis D berechnet und zudem summiert. Aufgrund der Division durch die BezugsgröÙe der Tunnellänge (hier 35 m) sind die Werte des GWP, ODP, POCP, AP und EP je Meter Tunnel dargestellt. Eine Übersicht der Ergebnisse je Bauteil, je Kriterium und je Lebenszyklusphase ist in Tabelle 12 gegeben. Da in der ÖKOBAUDAT nicht für jedes Material Umwelt-

**Tabelle 12.** Bewertungsergebnisse der ökologischen Kriterien im Demonstrator (eigene Berechnung, ICoM, RWTH)

Ergebnis	Einheit	A1-A3	A4	A5	B1	C1	C2	C3	D	Summe	Bezug Tunnellänge
Tunnelportal - Material: Beton C35/45											L=35m
GWP	[kgCO2/a]	106767,52	2148,39	848,53	-867,45	5638,39	6228,65	2873,66	-6231,26	117406,44	6708,939429
ODP	[kgR11/a]	2,48E-10	7,79E-13	5,7E-13	0	1,93E-12	2,09E-12	6,18E-13	-6,52E-08	-6,5E-08	-3,7143E-09
POCP	[kgC2H4/a]	291,34	35,87	8,26	0	93,14	18,51	25,06	-10,55	461,63	26,37885714
AP	[kgSO2/a]	273,08	24,73	5,9	0	63,58	20,75	20,75	-13,38	395,4	22,59428571
EP	[kgPO4/a]	1172,03	137,88	31,65	0	354,74	107,16	107,16	-54,86	1855,75	106,0428571
Tunnelportal - Material: Stahlbewehrung B 500A											
GWP	[kgCO2/a]	60201,56				31,3	347,4			14133,52	4269,358857
ODP	[kgR11/a]	9,85E-07				5,41E-12	6,04E-11		-2,88E-08	9,57E-07	5,46857E-08
POCP	[kgC2H4/a]	129,92				0,57	0,93		25,46	156,89	8,965142857
AP	[kgSO2/a]	131,04				0,42	1,03		31,86	164,35	9,391428571
EP	[kgPO4/a]	404,57				2,11	5,36		82,77	494,82	28,27542857
Tunnelschale - Material: Beton C35/45											
GWP	[kgCO2/a]	215134,73	4328,98	1709,78	-1747,9	11361,27	12550,62	5790,37	-12555,88	236571,98	6759,199429
ODP	[kgR11/a]	4,999E-10	1,57E-12	1,15E-12	0	3,89E-12	4,21E-12	1,25E-12	-1,31E-07	-1,31E-07	-3,7429E-09
POCP	[kgC2H4/a]	587,05	72,27	16,65	0	187,67	37,3	50,49	-21,25	930,18	26,57657143
AP	[kgSO2/a]	550,26	49,82	11,89	0	128,11	41,8	41,8	-26,95	796,73	22,76371429
EP	[kgPO4/a]	2362	277,82	63,77	0	714,79	41,8	41,8	-110,55	3391,06	96,88742857
Tunnelschale - Material: Stahlbewehrung B 500A											
GWP	[kgCO2/a]	121305,11				63,08	700,01		28478,8	150546,99	4301,342571
ODP	[kgR11/a]	0,00000199				1,09E-11	1,22E-10		-5,81E-08	0,00000193	5,51429E-08
POCP	[kgC2H4/a]	261,78				1,16	1,88		51,31	316,13	9,032285714
AP	[kgSO2/a]	264,04				0,85	2,08		64,19	331,16	9,461714286
EP	[kgPO4/a]	815,21				4,26	10,8		166,79	997,05	28,48714286
Drainagerohr - Material: SML											
GWP	[kgCO2/a]	20,99				0,01	0,12		3,94	25,06	0,716
ODP	[kgR11/a]	2,82E-10				1,81E-15	2,02E-14		-8,03E-12	2,74E-10	7,82857E-12
POCP	[kgC2H4/a]	0,12				0,00019	0,00031		0,0071	0,13	0,003714286
AP	[kgSO2/a]	0,045				0,00014	0,00034		0,0089	0,054	0,001542857
EP	[kgPO4/a]	0,14				0,00071	0,0018		0,023	0,17	0,004857143
Schotteraufschüttung - Material: Schotter											
GWP	[kgCO2/a]	9,81				0,37	4,07	8,46	-1,97	20,74	0,592571429
ODP	[kgR11/a]	1,54E-10				6,34E-14	7,07E-13	2,36E-11	-1,66E-11	1,61E-10	4,6E-12
POCP	[kgC2H4/a]	0,02				0,0067	0,011	0,05	-0,0074	0,083	0,002371429
AP	[kgSO2/a]	0,024				0,0049	0,012	0,05	-0,0079	0,087	0,002485714
EP	[kgPO4/a]	0,11				0,025	0,063	0,19	-0,036	0,35	0,01
Asphaltdeckschicht - Material: Gussasphalt											
GWP	[kgCO2/a]	9,95		0,083		0,055			-1,65	8,43	0,240857143
ODP	[kgR11/a]	1,87E-11		1,45E-14		7,23E-14			-6,11E-12	1,26E-11	3,6E-13
POCP	[kgC2H4/a]	0,017		0,042		0,00016			-0,032	0,028	0,0008
AP	[kgSO2/a]	0,018		0,00012		0,00039			-0,0034	0,015	0,000428571
EP	[kgPO4/a]	0,056		0,00055		0,0014			-0,0064	0,051	0,001457143
Gesamtsumme											
GWP	[kgCO2/a]	503449,67	6477,37	2558,393	-2615,3	17094,475	19830,87	8672,49	23825,5	579293,42	22040,38971
ODP	[kgR11/a]	2,9762E-06	2,349E-12	1,735E-12	0	2,227E-11	1,894E-10	2,547E-11	-2,831E-07	2,6914E-06	1,02384E-07
POCP	[kgC2H4/a]	1270,247	108,14	24,952	0	282,54705	58,63131	75,6	44,9377	1865,071	70,95974286
AP	[kgSO2/a]	1218,507	74,55	17,79012	0	192,96543	65,67234	62,6	55,7176	1687,796	64,2156
EP	[kgPO4/a]	4754,116	415,7	95,42055	0	1075,9271	165,1848	149,15	84,1306	6739,251	259,7091714

**Tabelle 13.** Bewertungsergebnisse des Demonstrators mit einer andere Materialwahl (Beton und Stahlbewehrung neu gewählt) (eigene Berechnung, ICoM, RWTH)

Ergebnis	Einheit	A1-A3	A4	A5	B1	C1	C2	C3	D	Summe	Bezug Tunnellänge	
Tunnelportal - Material: Beton C35/45											L=35m	
GWP	[kgCO <sub>2</sub> /a]	119420,48	2173,18	7624,39	-2817,6	5638,39	6299,74	2263,84	-6302,35	134300,11	7674,292	
ODP	[kgR11/a]	3,18E-10	7,89E-13	1,72E-11	0	1,93E-12	2,11E-12	6,25E-13	-6,52E-08	-6,49E-08	-3,7086E-09	
POCP	[kgC <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /a]	107,64	36,28	21,84	0	93,14	18,73	25,35	-10,67	372,3	21,27428571	
AP	[kgSO <sub>2</sub> /a]	212,49	25,01	20,03	0	63,58	20,98	20,98	-13,53	349,55	19,97428571	
EP	[kgPO <sub>4</sub> /a]	765,05	139,44	87,92	0	354,74	108,33	108,33	-55,49	1508,32	86,18971429	
Tunnelportal - Material: Stahlbewehrung B 500A												
GWP	[kgCO <sub>2</sub> /a]	53245986,3				218503,54	12392,32			0	53476882,1	3055821,835
ODP	[kgR11/a]	0,00000162				1,02E-09	2,43E-12			0	0,00000162	9,25714E-08
POCP	[kgC <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /a]	92556,61				816,56	10,75			0	93383,93	5336,224571
AP	[kgSO <sub>2</sub> /a]	135807,16				1075,74	12,47			0	136895,38	7822,593143
EP	[kgPO <sub>4</sub> /a]	326259,04				2722,85	46,11			0	329028,01	18801,60057
Tunnelschale - Material: Beton C35/45												
GWP	[kgCO <sub>2</sub> /a]	240630,23	4378,92	15363,01	-5677,4	11361,27	12693,67	4561,59	-12699,13	270612,41	7731,783143	
ODP	[kgR11/a]	6,4E-10	1,59E-12	3,46E-11	0	3,89E-12	4,27E-12	1,26E-12	-1,31E-07	-1,31E-07	-3,7429E-09	
POCP	[kgC <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /a]	378,1	73,1	44,01	0	187,67	37,73	51,07	-21,5	750,17	21,43342857	
AP	[kgSO <sub>2</sub> /a]	428,17	50,4	40,36	0	128,11	42,28	42,28	-27,26	784,33	22,40942857	
EP	[kgPO <sub>4</sub> /a]	1541,56	288,98	177,15	0	714,79	42,28	42,28	-111,81	2687,23	76,778	
Tunnelschale - Material: Stahlbewehrung B 500A												
GWP	[kgCO <sub>2</sub> /a]	107289751				440280,89	24970,31			0	107755002	3078714,352
ODP	[kgR11/a]	0,00000327				2,06E-09	4,9E-12			0	0,00000327	9,34286E-08
POCP	[kgC <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /a]	186499,99				1645,36	21,67			0	188167,02	5376,200571
AP	[kgSO <sub>2</sub> /a]	273649,1				2167,6	25,14			0	275841,84	7881,195429
EP	[kgPO <sub>4</sub> /a]	657406,39				5486,5	92,92			0	662985,88	18942,45371
Gesamtsumme												
GWP	[kgCO <sub>2</sub> /a]	160895829	6552,1	22987,483	-8494,9	675784,53	56360,23	6833,89	-19001,16	161636851	6149943,812	
ODP	[kgR11/a]	4,8914E-06	2,379E-12	5,181E-11	0	3,086E-09	1,444E-11	2,549E-11	-1,962E-07	4,6945E-06	1,78561E-07	
POCP	[kgC <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /a]	279542,497	109,38	65,892	0	2742,7371	88,89131	76,47	-32,2023	282673,661	10755,13974	
AP	[kgSO <sub>2</sub> /a]	410097,007	75,41	60,39012	0	3435,0354	100,88234	63,31	-40,7924	413871,256	15746,17674	
EP	[kgPO <sub>4</sub> /a]	985972,346	428,42	265,07055	0	9278,9071	289,7048	150,8	-167,3194	996210,011	37907,03831	

daten für alle Lebenszyklusphasen gegeben sind, bleiben einige Felder leer. Teilweise verzeichnen sich negative Werte in den berechneten Kriterien.

Dies ist auf die Vorzeichen der ÖKOBAUDAT-Umweltkalkulationswerte zurückzuführen, vergleiche Tabelle 10 und Umweltkalkulationswerte der ÖKOBAUDAT für den Materialvergleich [115, 116]. Die einzelnen Prozesse in den Lebenszyklusphasen bzw. -modulen sind in der ÖKOBAUDAT unter „Anwendungshinweis für Datensatz“ in den Prozess-Datenblättern [110–116] zu finden. Darin ist enthalten, ob sich der Prozess der jeweiligen Lebenszyklusphase positiv oder negativ auf die Umweltauswirkung auswirkt. Negative Werte sind demnach „Gutschriften“ [117] für die Umweltauswirkung und wirken sich positiv in der Nachhaltigkeitsbewertung aus. Die Ergebnisse der Testung im Demonstrator zeigen, dass das Material Beton in diesem Vergleich unter den Materialien die größten GWP-, POCP-, AP- und EP-Werte sowie die kleinsten ODP-Werte vorweist. Teilweise ergeben sich Rechenergebnisse zu „0“, wenn zwar ein ÖKOBAUDAT-Umweltkalkulationswert angegeben, aber gleich null ist. Insgesamt verzeichnet das Kriterium GWP die größ-

ten Umweltauswirkungen in Form von CO<sub>2</sub>-Emission je Meter Tunnellänge.

Ein Vergleich von Tabelle 12 mit den Ergebniswerten in Tabelle 13 offenbart die abweichenden Ergebniswerte der einzelnen Kriterien für die Wahl jeweils eines alternativen Datensatzes für das Betonmaterial und den Stahl. Mit den alternativen Umweltkalkulationswerten für Beton fallen die Ergebniswerte für GWP und ODP größer und für POCP, AP und EP kleiner als in Tabelle 12 aus. Für die alternativen Umweltkalkulationswerte für Stahl ergeben sich deutlich größere Ergebniswerte als in Tabelle 12.

Das gründet auf der abweichenden Massenreferenz mit dem Differenzfaktor von 1000. Es zeigt sich, dass ohne Berücksichtigung der Massenreferenz das Ergebnis, auch der Gesamtsumme, stark verzerrt wird. Deshalb ist es umso wichtiger, bei der Wahl der Umweltkalkulationswerte die richtigen Referenzdaten eines Materials, bspw. aus der ÖKOBAUDAT, zu wählen und auf Eigenarten zu überprüfen. Damit kann die Eigenart, bspw. ausgedrückt durch eine abweichende Massenreferenz, bei der Berechnung der Umweltauswirkungen berücksichtigt werden.

Für das Drainagerohr des Demonstratortunnels ist das Material „Kunststoff“ als Eigenschaft hinterlegt. Dazu sind jedoch keine Kunststoffrohre, wie Polypropylen (PP) oder (PVC) in den Nenndurchmessern von 600 mm, wie im Tunnelmodell hinterlegt, in der ÖKOBAUDAT gegeben, vergleiche Anwendungsbereiche des Datenblattes von „Abwasserrohr PP“ [118]. Statt des gewünschten Materials (PP) wird auf das Material „Regenabflussrohr aus SML“ [110] zurückgegriffen, wobei es sich um Graugussrohre handelt. Eine Verfügbarkeit der richtigen Umweltdaten zur Bewertung der vorhandenen Materialien eines Tunnelbauwerkmodells muss geprüft und im Zweifel hergestellt werden. Bei Ausweichen auf alternative Materialdatenblätter kann sich eine unzureichende Repräsentanz tatsächlicher Materialeigenschaften des zu betrachtenden Tunnelbauteils ergeben. Bei Bedarf müssen gegebenenfalls mehr als nur eine Datenbank für Umweltdaten durchsucht und damit Umweltwerte unterschiedlichen Ursprungs importiert oder verknüpft werden. Weitere mögliche Schwierigkeiten bei der modellbasierten Nachhaltigkeitsbewertung können aufgrund einer fehlerbehafteten semantischen Information im Bauwerksmodell entstehen. Im Zuge der semantischen Benennung der Bauteileigenschaften für den vorliegenden Demonstrator ist die Benennung des „Bewehrungsgrad“ [s] fälschlich als „Bewehrungsgrad“ vorgenommen worden. Dadurch kann die Eigenschaft durch Abfrage von „Bewehrungsgrad“ nicht erfolgreich abgefragt werden und die Berechnung der Stahlmassen auf Basis der Stahlbetonparameter scheitert. Eine korrekte und maschinenlesbare Pflege von semantischen Informationen im Bauwerksmodell sind demnach unabdingbar für die automatische Abfrage und darauf aufbauende Berechnung von ökologischen Umweltauswirkungen. Zudem kann durch fehlende hinterlegte Eigenschaften auch keine automatische Abfrage erfolgen, sodass die automatischen Berechnungsschritte Fehler oder die Zahl Null anzeigen. Deshalb ist auf eine ganzheitliche Modellierung der semantischen Informationen für die Zwecke der Nachhaltigkeitsbewertung zu achten. Erforderliche Parameter sind in Tabelle 9 gelistet und müssen bei Erweiterung auf weitere Kriterien voraussichtlich ergänzt werden, vergleiche Berechnungsschritte weiterer Kriterien in [81].

Eine Betrachtung von Nachhaltigkeitskriterien, die sich nicht als berechnete Werte äußern, sondern Checklisten und Erläuterungsberichte enthalten, können mit dem angegebenen Vorgehen in Dynamo nicht ohne Weiteres stattfinden. Diese werden auch „nicht messbare Kriterien“ genannt [81]. Kriterien, die sich nicht als Zahlenwert äußern, können voraussichtlich nicht ohne Weiteres durch einen Vergleich mit anderen Ergebniswerten eines vergleichbaren Untersuchungsgegenstands in Relation für eine Bewertung gebracht werden. Dimensionslose und textbasierte Kriterien bedürfen einer Skala zur Setzung einer Relation, um die Nachhaltigkeit positiv oder negativ durch einen Vergleich mit einem Referenzwert zu bewerten. Für die Be-

wertung eines berechneten Kriteriums bedarf es jedoch zunächst belastbare Referenzwerte.

Eine repräsentative Nachhaltigkeitsbewertung ist nicht ganzheitlich erfolgt. Jedoch können die herausgestellten Herausforderungen einen Ansatz bei der Implementierung von digitalen, modellbasierten Nachhaltigkeitsbewertungen bieten. Da Tunnelbauwerke nicht rückgebaut und dementsprechend nicht entsorgt werden können, wird eine Berechnung der Kriterien im Lebenszyklusmodul D bzw. laut BAST-Berichten „R“ nicht empfohlen [81].

## 5 Fazit und Ausblick

Mit diesem Beitrag wird die modellbasierte Nachhaltigkeitsbewertung von Tunnelbauwerken auf Bewertungssysteme, bestehende Forschungsinhalte, praktische Umsetzungen in Pilotprojekten und die digitale Umsetzbarkeit auf Bauteilebene mit Autodesk Dynamo und ÖKOBAUDAT-Umweltdaten untersucht. Die ökologische Nachhaltigkeit mit der Berechnung von Treibhausgasemissionen steht klar im Fokus. Die Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche zur Darstellung des aktuellen Stands der Wissenschaft zeigen auf, dass es bereits Ansätze für die Nachhaltigkeitsbewertung von Tunnelbauwerken gibt, die auch in der Praxis angewandt werden. Die Analyse zeigt insbesondere in China viele Fallbeispiele auf. Auffallend ist jedoch, dass in den meisten Fällen nur die Bauphase und nicht der gesamte Lebenszyklus betrachtet wird. In den analysierten Publikationen unterscheiden sich die Methoden zur Bewertung der Nachhaltigkeit stark, was darauf hindeutet, dass ein internationaler Standard bisher nicht implementiert ist. Die in diesem Beitrag aufgeführten bestehenden Bewertungsverfahren geben keine ganzheitliche sowie standardisierte Berechnungs- und Bewertungsgrundlage für eine digitale Umsetzung.

Für Letzteres wird an eine notwendige Parametrisierung der Bauwerksmodelle verwiesen, welche Eingangsparameter für die Nachhaltigkeitsbewertung berücksichtigt und möglichst einheitlich benannt werden. Dadurch sollen automatische Abfragen, die die Bauwerksparameter referenzieren, vereinfacht werden. Auf eine korrekte Wahl von repräsentativen Umweltdaten aus Datenbanken sowie die Bewertung aller in einer Nachhaltigkeitsdimension enthaltenen Kriterien ist zu achten, sodass eine Verzerrung der Ergebnisse vermieden wird.

Mit der Machbarkeit der modellbasierten Nachhaltigkeitsbewertung in der Umgebung Autodesk Dynamo hat sich bereits das Forschungsprojekt „BIM und Nachhaltigkeit“, gefördert vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr, auseinandergesetzt [119]. Da die Machbarkeit für die modellbasierte Bewertung einiger ökologischer Kriterien dargestellt ist, gilt es, dieses Wissen zu vertiefen und die Untersuchungen auf

gigen Planungs- und Ausführungsunternehmen durchgeführt. Jede dieser Parteien erzeugt ihre eigenen Daten über den Bauprozess, mit geringer Bereitschaft, diese mit weiteren Stakeholdern zu teilen. Der temporäre, ortsgebundene Charakter von Baustellen erschwert das Monitoring zusätzlich. Auch der vermeintlich prototypische Charakter von Bauwerken und das damit verbundene „Unikatsdenken“ stellen Herausforderungen dar.

### 4.3 Der digitale Zwilling im Tunnelbau

Der Einsatz von digitalen Zwillingen im Tunnelbau verspricht nicht nur effizientere Betriebsabläufe, sondern kann bereits während der Ausführungsphase entscheidende Vorteile bieten. Die gezielte Definition von Zielen und Anwendungsfällen legt den Rahmen für den Umfang des zu betrachtenden realen und virtuellen Raums fest – sei es für einzelne Anlagen, Maschinen, Prozesse, das Tunnelbauwerk selbst oder eine kombinierte Betrachtung.

Die Anwendung von digitalen Zwillingen im Tunnelbau bietet eine Vielzahl von Vorteilen, die sich über verschiedene Phasen des Tunnelbauprojekts erstrecken:

- Verbesserung und Automatisierung von Entscheidungen: Digitale Zwillinge erlauben eine gründliche Analyse von Daten und die Simulation unterschiedlicher Szenarien. Basierend auf diesen Erkenntnissen können fundierte Entscheidungen getroffen und automatisierte Prozesse implementiert werden, um eine optimale Umsetzung der verschiedenen Lebenszyklusphasen eines Tunnelbauwerks zu gewährleisten.
- Frühzeitige Fehlererkennung: Die kontinuierliche Überwachung und Analyse des digitalen Zwillings ermöglichen die frühzeitige Identifikation potenzieller Probleme und Abweichungen. Dadurch wird eine rechtzeitige Maßnahmenetzung erleichtert und trägt maßgeblich zur Sicherheit des Tunnelbauwerks bei.
- Effizienterer Betrieb: Die Integration von Echtzeitdaten aus dem realen Tunnelbauwerk mithilfe des digitalen Zwillings ermöglicht eine präzise Steuerung und Optimierung der Bau- und Betriebsabläufe. Dadurch eröffnen sich Möglichkeiten zur verbesserten Ressourcennutzung und detaillierten Kapazitätsplanung. In der Ausführungsphase ermöglichen digitale Zwillinge die frühzeitige Erkennung von Wartungsbedarfen an Tunnelbohrmaschinen.
- Optimierung der Nachhaltigkeit: Digitale Zwillinge bieten die Möglichkeit, Nachhaltigkeitsaspekte wie Energieeffizienz und Umweltbelastung zu optimieren. Durch die Simulation und Analyse verschiedener Szenarien können gezielte Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs und zur Verbesserung der Umweltverträglichkeit entwickelt und umgesetzt werden. Als Beispiel kann die effiziente Nutzung von Energiequellen während des Bauprozesses genannt werden.

- Smartes Betriebsmanagement: Digitale Zwillinge können für eine intelligente und dynamische Verkehrssteuerung eingesetzt werden, um den Verkehrsfluss basierend auf Echtzeitdaten zu optimieren. Im Notfall kann der digitale Zwilling zudem dazu verwendet werden, Evakuierungs- und Rettungsmaßnahmen intelligent zu steuern und unterstützen.

Um die verschiedenen Formen der Integritätsebenen von digitalen Zwillingen im Tunnelbau zu verstehen, werden das digitale Modell, der digitalen Schatten und der digitale Zwilling im Detail betrachtet.

Für jede dieser Formen dient ein digitales dreidimensionales Gesamtmodell als Grundlage, das den Baugrund, das Bauwerk und die Baustelle umfasst (vgl. Abschnitt 3.2), welches durch die Anwendung der TIM-Methode erstellt wird.

Ein praxisnahes Beispiel für das digitale Modell im Tunnelbau kann die manuelle Anpassung eines digitalen Baugrundmodells sein. Diese Anpassung kann aufgrund unerwarteter geologischer Bedingungen während des Tunnelvortriebs erforderlich sein. In diesem Fall erfolgt keine automatische Übertragung von Daten vom realen Baugrund zu seinem digitalen Abbild. Stattdessen werden die Anpassungen des Modells manuell anhand von Ortbrustaufnahmen und Kernbohrungsdaten vorgenommen.

Im Gegensatz dazu erfolgt beim digitalen Schatten ein automatisierter Datenaustausch vom realen zum virtuellen Objekt. Ein konkretes Beispiel hierfür wäre die Überwachung einer Tunnellüftungsanlage im Betrieb. Der digitale Schatten kann den Anlagenbetreibern Einblicke in den Zustand der Lüftungsanlage liefern, ermöglicht jedoch keine direkten Maßnahmen vor Ort.

Die höchste Integritätsebene ist der digitale Zwilling. Hierbei erfolgt ein vollständig automatisierter bidirektionaler Datenaustausch zwischen dem realen und virtuellen Objekt. Durch die Integration von Daten aus dem digitalen Zwilling können nicht nur Probleme automatisiert erkannt, sondern auch vorhergesehen und proaktiv angegangen werden. Im Tunnelbau bedeutet dies beispielsweise in einem Baustellen-Zwilling, dass mithilfe des digitalen Zwillings Unregelmäßigkeiten im Bauprozess automatisch erkannt und darauf reagiert werden können. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Optimierung der Bau- und Betriebsabläufe, was zu einer Effizienzsteigerung und Kosteneinsparungen führt.

### 4.4 Hypothesen für den digitalen Zwilling Tunnel

Auf der Basis der Erkenntnisse aus den vorhergehenden Abschnitten werden nachfolgend charakterisierende Eigenschaften von digitalen Zwillingen von Bauwerken in Form von 10 Hypothesen angeführt. Diese sollen einen Beitrag zur derzeit laufenden Diskussion hinsichtlich der Definition digitaler Zwillinge für den Tunnelbau leisten. Die Verifikation dieser Hypothesen wird letztlich nur in Form von empirischen Untersuchungen erfolgen können, welche jedoch einen gewis-

sen Zeitraum in Anspruch nehmen werden. In der Zwischenzeit sollen diese die Basis für weitere Prototypen und Untersuchungen darstellen und helfen ein einheitlicheres Verständnis für digitale Zwillinge zu verbreiten.

1. Digitale Zwillinge von Bauwerken weisen einen bidirektionalen und automatisierten Datenfluss zu ihrer physikalischen Repräsentanz auf.
2. Für den Aufbau eines digitalen Zwillings im Bauwesen ist jedenfalls ein digitales BIM- bzw. TIM-Modell erforderlich und wird häufig als Basis im Generierungsprozess verwendet.
3. Folglich basieren digitale Zwillinge im Tunnelbau auf mithilfe der TIM-Methode erstellten Baugrund-, Bauwerks- oder Baustellenmodellen (geometrische und alphanumerische Informationen eines Bauwerkes unabhängig von ihrem Format). Diese werden sowohl in Abhängigkeit des Anwendungsfalls um zusätzliche Informationen als auch um Links bzw. Datenintegration aus anderen Datenbanken, Repositories, (ERP) Systemen und Sensorik erweitert.
4. Ein Großteil der Aufgabe bei der Generierung und Implementierung von digitalen Zwillingen besteht aus der Organisation und dem Management von Informationen und Daten (Informationen sollen in Form von Daten vorliegen). Dabei umfasst dies einerseits die strukturierte Bereitstellung (betrifft Planung – Bau – Betrieb) und andererseits die Verarbeitung dieser Daten (betrifft Informatik).
5. Ein digitaler Zwilling enthält in der Regel dynamische und statische Daten.
6. Ein ganzheitlicher digitaler Zwilling setzt sich jedenfalls aus verschiedenen Fach-, Sub- bzw. Teilzwillingen zusammen. Durch die Aggregation dieser kann ein ganzheitlicher digitaler Zwilling entstehen. Einzelne Teilzwillinge werden für einen oder mehrere Use-cases generiert und können auch einzeln genutzt werden.
7. Subzwillinge können auch aus unterschiedlichen Fachrichtungen stammen; z. B. konstruktiver Teil eines Bauwerks in Kombination mit Fachrichtungen wie Maschinenbau, Elektrotechnik etc. – und können Teil eines Fachzwillings sein – System-of-Systems.
8. Der Anwendungsfall bestimmt den Informations- und Funktionsgehalt eines digitalen Zwillings; hierdurch wird auch festgelegt, ob es sich dabei um einen digitalen Schatten bzw. Zwilling handelt.
9. Ein digitaler Zwilling ist in jeder Phase des Lebenszyklus eines Bauwerkes einsetzbar.
10. Ein digitaler Zwilling liefert die Datenbasis für weitergehende Simulations-, Analyse- oder Steuerungstools bzw. können diese Werkzeuge integraler Bestandteil des digitalen Zwillings sein.

Die Rolle der Stakeholder in der Bauwirtschaft liegt vorrangig darin, strukturierte Daten für die Planung, den Bau und den Betrieb von Bauwerken bereitzustellen oder die Anforderungen an die Daten zu definie-

ren, ihre Struktur zu gestalten und Funktionalitäten zu bestimmen. Das eigentliche Sammeln und Verarbeiten der Daten sollte in die Zuständigkeit der Informatik fallen. Am Markt sind bereits vereinzelt Softwareprodukte verfügbar, die diese Funktionalitäten erfolgreich bereitstellen.

## 5 Mission

In Anlehnung an die in Abschnitt 2 skizzierte Vision erfolgt im Folgenden nun eine vertiefte Betrachtung der Mission hin zum digitalen Zwilling im Tunnelbau. Dieser Abschnitt dient dazu, die Vision weiter zu konkretisieren und in praxisorientierte Handlungsfelder zu überführen. Diese Entwicklung von Vision zu Mission markiert den Übergang von ambitionierten Zielen zu konkreten Schritten, die erforderlich sind, um die Vision in die Realität umzusetzen. Dabei werden spezifische Handlungsfelder identifiziert, die in Bild 10 dargestellt sind. Die nachfolgenden drei Abschnitte vertiefen diese Handlungsfelder und setzen sie in Bezug zu den verschiedenen Abstufungen und Integrationslevels: digitales Modell, digitaler Schatten und digitaler Zwilling.

### 5.1 Digitales Modell

Die Etablierung von TIM als unverzichtbare Grundlage für die Schaffung eines digitalen Zwillings markiert einen bedeutenden Meilenstein im Bereich der Tunnelplanung und -verwaltung. Dabei steht die Mission im Fokus, das TIM-Modell als Schlüsselkomponente für die Realisierung und Optimierung des digitalen Zwillings zu etablieren. In diesem Kontext werden die zugrunde liegenden Ziele, Herausforderungen und potenziellen Nutzen dieses Vorhabens detailliert betrachtet. Die nachfolgenden zentralen Herausforderungen bei der Implementierung von TIM wurden durch die Ana-



**Bild 10.** Handlungsfelder für die Entwicklung von Vision zur Mission für digitale Zwillinge

lyse aktueller Pilotprojekte und Konzepte im aktuellen Entwicklungsstand identifiziert [17, 25–27]:

- fehlende Normen und offene rechtliche Fragen,
- mangelnde BIM-Fähigkeiten,
- fehlende einheitliche und standardisierte Datenstrukturen,
- Informationsverwaltung, -management und -weitergabe,
- Software-Schnittstellen und Datenformate,
- ausstehende Objektkataloge, effiziente Modellierlösungen.

Um die Herausforderungen zu bewältigen und die Mission der erfolgreichen Umsetzung des digitalen Modells für den Tunnelbau zu erreichen, bedarf es verschiedener Maßnahmen. Die Förderung von Standardisierung sollte durch die Entwicklung von Normen und internationaler Zusammenarbeit vorangetrieben werden. Dabei sollte stets der ganzheitliche Lebenszyklus des zukünftigen digitalen Zwillings berücksichtigt werden, um dessen Verwendung und Anwendung über alle Phasen zu etablieren.

Intensive interne Schulungsprogramme auf Unternehmensebene sowie sektorübergreifende Schulungen zu Beginn von Projekten sind von zentraler Bedeutung, um die BIM-Fähigkeiten zu verbessern. Dies stellt sicher, dass sämtliche Projektbeteiligte die notwendigen Kenntnisse und Fertigkeiten – auch projektspezifisch – erwerben und somit eine einheitliche Grundlage geschaffen wird. Die Etablierung konsistenter Datenstrukturen erfordert eine koordinierte Anstrengung, um Standards zu schaffen, die von allen Beteiligten akzeptiert werden. Die Optimierung von Informationsmanagement und -weitergabe erfordert die Implementierung effizienter Prozesse und moderner Tools.

Die Entwicklung standardisierter Software-Schnittstellen und Datenformate ist von entscheidender Bedeutung, um eine nahtlose Integration verschiedener Softwarelösungen im Tunnelbau zu gewährleisten und somit eine reibungslose Zusammenarbeit zu ermöglichen. Eine enge Kooperation zwischen Tunnelbauexperten und BIM-Spezialisten ist unerlässlich, um umfassende Objektkataloge und effiziente Modellierungslösungen zu schaffen. Hierbei steht die Gestaltung von Modellen im Vordergrund, die nicht nur höchste Präzision aufweisen, sondern auch eine Flexibilität und Anpassungsfähigkeit an verschiedene Anforderungen ermöglichen.

Die Einführung einheitlicher Konzepte, gemeinsamer Datenbanken und effizienter Prozesse verfolgt das Ziel, die Effizienz der Modellierung, Informationsintegration sowie Berechnung und Auswertung von Daten signifikant zu steigern. Ein möglicher Lösungsansatz zur Erhöhung des Automatisierungsgrades bei der Modellerstellung von wiederkehrenden Bauteilen entlang der Tunnelachse könnte in der Implementierung einer strukturierten Datenbank oder auch die von *Alsayh* et al. angesprochene Interaktionsplattform als führendem System bestehen [27]. Diese innovative Herangehensweise ermöglicht nicht nur eine präzisere Model-

lierung, sondern trägt auch dazu bei, standardisierte Daten zu generieren, die über Projekte hinweg wieder verwendbar sind (s. Bild 11).

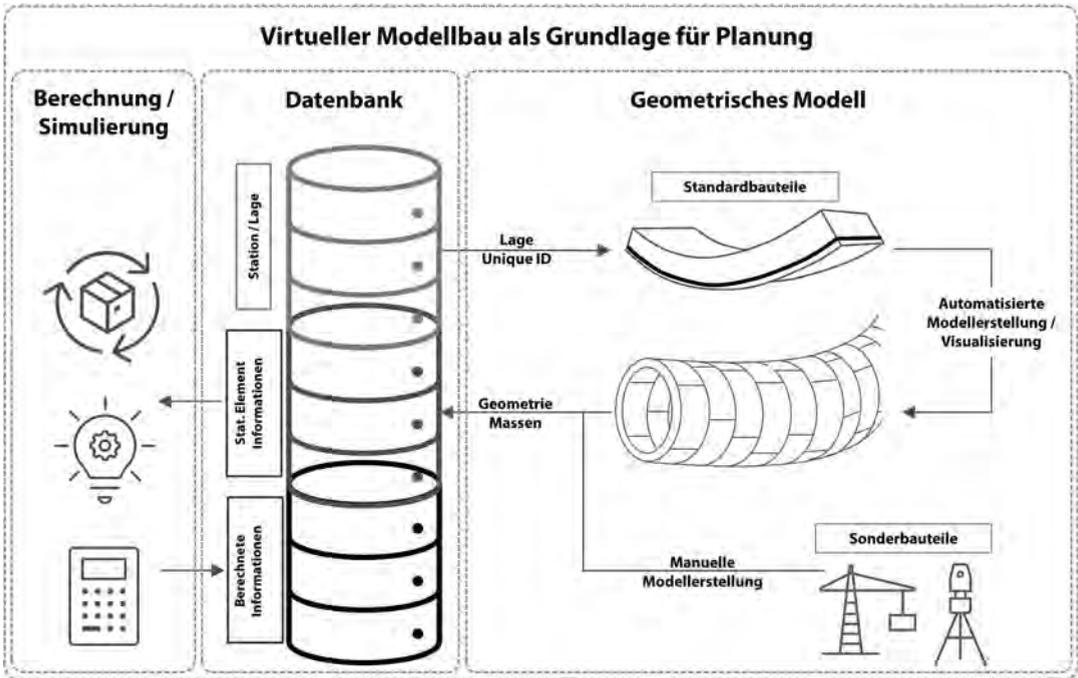
Modelle sollten in Standardbauteile unterteilt werden, wobei diese als wiederverwendbare Elemente konzipiert sind, die projektübergreifend genutzt werden können. Gleichzeitig ermöglichen individuell erstellte Sonderbauteile eine Anpassung an die spezifischen Anforderungen eines Projekts. Wiederkehrende geometrische Strukturen, beispielsweise Tübbing-Segmente, werden als geometrisches Element entlang einer in der Datenbank hinterlegten Achse modelliert und mit einer eindeutigen Identifikationsnummer versehen. Nach der Erstellung des Modells und der Definition der Bauteileigenschaften können projektbezogene Massen der Modellseite (Elementeigenschaften) durch eine Live-Verknüpfung in der Datenbank abgegriffen werden. Die Anreicherung der Datenbank mit projektübergreifenden, aber auch projektspezifischen Kennwerten ermöglicht zudem Simulationen und Berechnungen, beispielsweise zur Kosten- und Zeitermittlung, deren Ergebnisse wiederum in der Datenbank gespeichert werden können.

Die Entstehung einer strukturierten Datenbank während der Planungsphase im Rahmen einer TIM-Umsetzung, die planungsrelevante Informationen zum Baugrund, zum Bauwerk und zur Baustelle enthält, führt zur Schaffung eines digitalen Modells im Sinne eines virtuellen Replikats des umzusetzenden Bauwerks und somit ein Bestandteil des digitalen Zwillings. Wenn die Datenbank um einen sogenannten Modelviewer ergänzt wird, können die maschinenlesbaren und strukturierten Daten auch für den Nutzer auf anschauliche Weise am Modell sichtbar gemacht werden. Durch eine logische und abgestimmte Strukturierung, beispielsweise in Anlehnung an den LOIN, können Informationen anwendungsfall- und nutzergerecht aufbereitet werden. Bei erforderlichen Aktualisierungen des realen Objekts am virtuellen Gegenstück, zum Beispiel bei der Generierung eines Facility Managements aus dem As-built-Modell, muss der Datenaustausch manuell erfolgen. Das bedeutet, dass die Datenlage als statisch betrachtet werden kann.

Dies schafft die ideale Grundlage, um das Modell von einer statischen Datenlage zu einer dynamischen zu transformieren und es somit zu einem digitalen Schatten zu erweitern.

## 5.2 Digitaler Schatten

Die Entwicklung von digitalen Schatten oder Zwillingen kann auf verschiedenen Komplexitätsebenen stattfinden, abhängig von der Definition der Anwendungsfälle und den daraus abgeleiteten Anforderungen an die Datenmodelle. Die Erweiterung des digitalen Modells zum digitalen Schatten, durch einen automatisierten Datenfluss vom Realobjekt und seinem virtuellen Gegenstück, erfordert die Einbindung von Systemen, die dynamische Daten produzieren. Diese dy-



**Bild 11.** Konzept zur Förderung des Automatisierungsgrades der Modellerstellung durch eine Datenbank

namischen Daten können aus Sensorik, Prozessdaten oder Maschinendaten stammen.

Die Einbindung in den digitalen Schatten erfordert strukturierte Daten und eine Verbindung zum digitalen Modell. Die Verknüpfung der Datenmodelle kann auf Bauteilebene, räumlicher Ebene (z. B. über Tunnelmeter oder Koordinaten) und/oder zeitlicher Ebene geschehen. In Bezug auf die Echtzeit-Überwachung der gebauten Umwelt ist es aus heutiger Sicht möglich, mithilfe von IoT-Technologien wie Wi-Fi, WSN, 5G, LP-WAN und Überwachungskameras Daten von Baustellen oder vom Betrieb des Tunnels sammeln [55].

Ein Beispiel dafür ist die Tunnelbohrmaschine, bei der Sensoren und Maschinendaten automatisiert erfasst und in einer Datenbank gespeichert werden. Über Dashboards inklusive Modelviewer werden diese Daten sichtbar und für den Maschinenführer interpretierbar gemacht. Dies funktioniert bereits gut für die Tunnelbohrmaschine und kann als Teilaspekt des digitalen Produktionsschattens im Vortrieb betrachtet werden, welcher in Bild 12 dargestellt wird. Die Echtzeit-Visualisierung des Maschinenstatus ermöglicht eine informationsreiche Sicht auf den Bauprozess, was zu einem effizienteren und zielgerichteten Eingreifen der Maschinensteuerung führt.

Die Einbindung weiterer Teilsysteme wie das Förderband oder die Tübbing-Produktion ermöglicht eine umfassendere Steuerung des Gesamtprozesses auf der Baustelle. Hierbei müssen die notwendigen Informationen und Schnittstellen klar definiert werden.

Eine Herausforderung besteht im Umgang mit großen Datenmengen und der Strukturierung dieser Daten, wofür eine enge Zusammenarbeit mit der IT erforderlich ist. Angesichts der stetig wachsenden Datenflut im Baubereich ist es unerlässlich, effiziente Methoden zur Datenerfassung, -speicherung und -verarbeitung zu entwickeln. Die Zusammenarbeit mit erfahrenen IT-Experten ist dabei von entscheidender Bedeutung, um innovative Lösungen für die Herausforderungen des Datenmanagements zu finden. Es gilt, nicht nur die richtigen Technologien zu implementieren, sondern auch sicherzustellen, dass die Datenstrukturen aufeinander abgestimmt sind und den Anforderungen aller beteiligten Systeme gerecht werden. Hierbei spielt die Standardisierung von Datenformaten und Schnittstellen eine zentrale Rolle, um eine nahtlose Interoperabilität zwischen verschiedenen Systemen zu gewährleisten.

Der Mehrwert zeigt sich besonders, wenn Echtzeitdaten über das digitale 3D-Modell zugänglich sind. Dieses dient dabei mehr als Kommunikationswerkzeug und Visualisierungstool für den Nutzer, anstatt für die eigentliche Datenverarbeitung herangezogen zu werden. Insgesamt wird die Baubranche aufgefordert, die notwendigen Informationen und Zusammenhänge zu definieren und klar darzulegen.



Bild 12. Digitaler Schatten einer Tunnelbohrmaschine

### 5.3 Digitaler Zwilling

Der digitale Zwilling kann auch im Tunnelbau in jeder Phase des Lebenszyklus – in Planung, Bau und Betrieb eingesetzt werden und nicht nur in der Betriebsphase, wie häufig angenommen. Analog zu BIM ist ein über den Lebenszyklus durchgängiger Einsatz vorteilhaft und ökonomischer, da die Implementierung eines digitalen Zwillings einen gewissen Aufwand bedeutet, der sich bei durchgängiger Anwendung auf die einzelnen Phasen bzw. Anwendungsfälle verteilt. Ebenfalls ähnlich der Herangehensweise bei BIM ist die Strukturierung der Daten bzw. Aufteilung der Teilzwillinge nach Anwendungsfällen. Erst dadurch kann sichergestellt werden, dass die benötigten Daten im erforderlichen Umfang und in der benötigten Qualität für die Weiterverarbeitung vorhanden sind.

In der Planungsphase werden in Ermangelung eines physikalischen Gegenstücks, gemäß dem Verständnis dieser Arbeit, Mockups oder Simulationen jeglicher Art eingesetzt. Die Anwendungsfälle in dieser Phase befinden sich im Bereich der Optimierung des Planungsergebnisses sowohl im Hinblick auf den Betrieb, den Bau als auch die Herstellung, Instandhaltung sowie die Demontage. Dabei können Simulationen das Planungsergebnis direkt beeinflussen oder es werden unterschiedliche Szenarien durchgespielt, deren Ergebnisse in die Planung eingearbeitet werden. Dabei kann auch der Einsatz von künstlicher Intelligenz herangezogen werden. Es soll dabei jedoch nicht eine „automatisierte“ Planung entstehen, sondern es soll jeweils den Planer:innen überlassen sein, die Ergebnisse zu beurteilen und einzuarbeiten. Beispielhaft werden an dieser Stelle Anwendungsfälle angeführt, die im Tunnelbau über die zuvor beschriebenen Simulationssituationen abgedeckt werden können. Es ist noch anzumerken, dass diese teilweise auch über herkömmliche TIM/BIM-Modelle abgewickelt werden können, jedoch wird durch den Einsatz eines digitalen Zwillings ein qualitativ besseres Ergebnis sowie eine Vereinfachung der Anwendung aufgrund des höheren Automatisierungsgrades erwartet. Darüber hinaus besteht in einigen An-

wendungsfällen die Möglichkeit der Integration der Simulationsprozesse in weitere Phasen wie den Betrieb. Ein Anwendungsfall in diesem Zusammenhang ist die Entfluchtung von Tunneln im Notfall. Dabei wird der digitale Zwilling die Datenbasis für die Simulation der Entfluchtung bereitstellen und eine Simulationssoftware das reale Gegenstück zur virtuellen Instanz darstellen. Auf diese Weise entsteht wiederum ein bidirektionaler, automatisierter Datenfluss. Ein weiterer und aufgrund der langen Nutzungsphase von Tunnelbauwerken höchst relevanter Anwendungsfall ist die Optimierung des Betriebsmanagements über die Simulation von Szenarien, in denen unterschiedliche Materialität, Konstruktionen oder Aufbauten hinsichtlich ihrer Lebensdauern, Wartungsintensität, Sanierbarkeit etc. analysiert werden können. Diese Simulationen bieten erstmals das Potenzial, die häufig propagierte Optimierung der Betriebskosten ganzheitlich umsetzen zu können. Um diese Simulationsergebnisse weiter zu verbessern, sollten Daten aus digitalen Zwillingen von Bestandstunnelbauwerken integriert werden.

In der Bauphase kann im maschinellen Vortrieb die Weiterentwicklung des digitalen Schattens aus Abschnitt 5.2 zum digitalen Zwilling der TBM bzw. aller Prozesse bis zur Baustelleneinrichtung ein wesentlicher Anwendungsfall sein. Als Basis für den digitalen Zwilling dient ein Modell der TBM sowie der ergänzenden Systeme, welches sowohl über einen automatisierten Datenfluss von der TBM in den Zwilling als auch umgekehrt verfügt. In einer Steuerungssoftware werden die Daten der Maschine sowie deren Sensorik interpretiert und verarbeitet. Als weitere Eingangsparameter für die Steuerung der TBM werden die geotechnischen Daten bzw. jene einer allenfalls vorhandenen Vortriebssimulation integriert und gemeinsam verarbeitet. Das Ergebnis sind „vorausschauende“ Steuerungsdaten im Sinne einer „predictive Control“, die einen effizienteren und weniger störungsanfälligen Betrieb der TBM ermöglichen. Werden in die Steuerungssoftware zukünftig auch Komponenten einer KI integriert, wäre das Ergebnis eine (teil)autonome TBM.

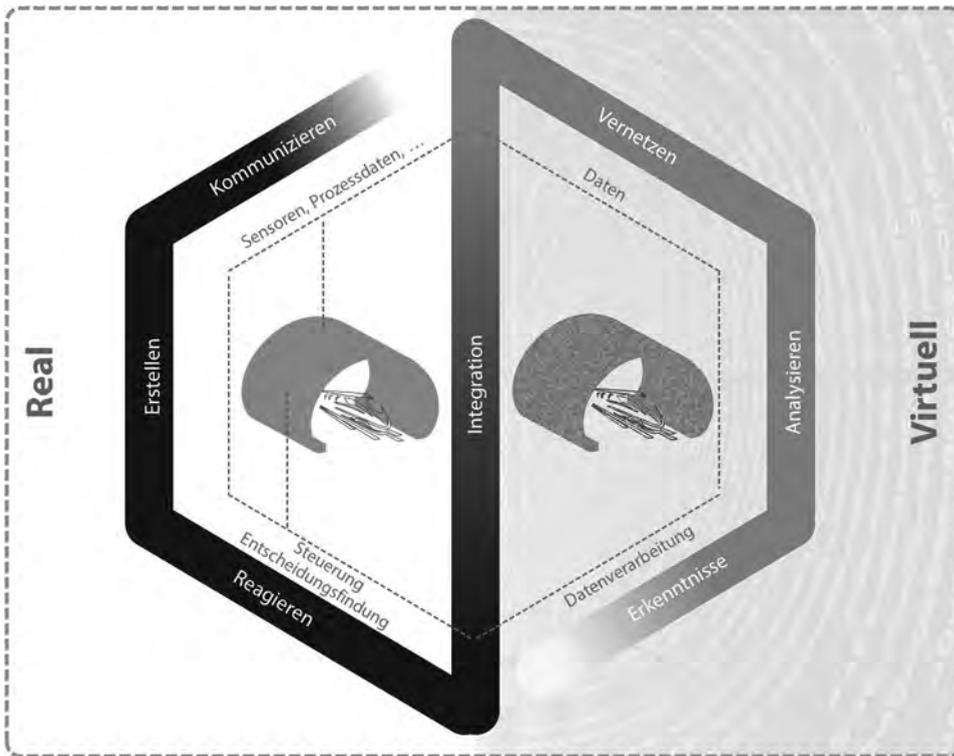


Bild 13. Datenerfassung, -integration und -verarbeitung am Konzept des digitalen Zwillings (in Anlehnung an [56])

Vor allem in der Betriebsphase sind die Anwendungsmöglichkeiten eines digitalen Zwillings im Tunnelbau breit gefächert. Aufgrund der unterschiedlichen Anwendungsfälle wird der größte Mehrwert wiederum durch eine möglichst ganzheitliche Betrachtungsweise erzielt werden können, die jedoch eine umfassende Aggregation oder auch Vernetzung aller Teilzwillinge bedingt. Es ist auch denkbar und erwünscht, dass Aspekte und Software aus der Planungssimulation in die Steuerung integriert werden. Als Anwendungsfall wird die Steuerung einer Lüftungsanlage eines Tunnels angeführt, die über Sensoren die Luftqualität in einem Tunnel misst und anschließend automatische Steuerungsbefehle an die Anlage weitergibt. Dies ist auch durch eine konventionelle Anlage abgedeckt, daher muss der Mehrwert wiederum in einer vorausschauenden Steuerung liegen, die beispielsweise Daten aus Wetterberichten und dgl. integriert. Ferner könnte auch der Verkehrsfluss über Bilderkennungssoftware analysiert und in die Steuerungssoftware integriert werden. Anhand dieses Beispiels soll aufgezeigt werden, dass erst die Verknüpfung unterschiedlicher Systeme und Daten sowie deren gemeinsame Analyse einen Benefit bringen werden.

Die Integration von Simulation und Datenverarbeitung ist ein entscheidender Schritt in der Entwicklung und Anwendung von digitalen Zwillings. Die Frage,

ob die Simulation und Datenverarbeitung im digitalen Zwillings selbst oder extern erfolgen sollten, gilt es in weiteren Forschungsvorhaben zu klären. Aus heutiger Sicht kann angenommen werden, dass dies stark vom spezifischen Anwendungsfall abhängen wird und beide Möglichkeiten umgesetzt werden können. In einigen Szenarien kann es effizienter sein, bestimmte Simulationen und Datenverarbeitungsprozesse direkt im Zwillings durchzuführen, um Echtzeit-Feedback und schnelle Reaktionen auf Veränderungen zu ermöglichen. Andererseits können ressourcenintensive Simulationen auch extern durchgeführt werden, um die Datenlast im Zwillings zu reduzieren und eine bessere Skalierbarkeit zu erreichen.

Eine grundlegende Voraussetzung für den digitalen Zwillings ist die digitale Durchgängigkeit. Ohne eine nahtlose Integration aller relevanten Systeme, Sensoren und Datenquellen kann der Zwillings nicht sein volles Potenzial entfalten (s. Bild 13). Hier besteht vor allem die Herausforderung, bereits bestehende Systeme, sei es im Sinne von Bestandstunnels, welche digital erfasst und für den digitalen Zwillings aufbereitet werden sollen, oder auch bestehender FM- oder ERP-Systeme, welche nicht vornehmlich aus für eine solche Integration ausgelegt waren, in den Digitalisierungsprozess zu integrieren.

### 5.4 Ökosystem von digitalen Zwillingen

Gemäß den in Abschnitt 4.4 aufgestellten Hypothesen besteht ein digitaler Zwilling seinen Anwendungsfällen entsprechend aus unterschiedlichen Teil- bzw. Subzwillingen. Um zu einem umfassenden oder gar ganzheitlichen Zwilling zu gelangen, ist es erforderlich diese Teilzwillinge zu aggregieren.

Die damit einhergehende steigende Komplexität durch die Vernetzung der Teilzwillinge kann durch einen systemorientierten Ansatz vereinfacht werden. Ein System ist jede Gruppe von interagierenden oder miteinander verbundenen Entitäten, die gemäß einer Reihe von Regeln handeln, um ein vereinigtes Ganzes zu bilden. Ein System, umgeben und beeinflusst von seiner Umgebung, wird durch seine Grenzen, Struktur und seinen Zweck beschrieben und in seinem Funktionieren ausgedrückt [57].

Ein solcher Ansatz ermöglicht Zusammenarbeit innerhalb und zwischen Disziplinen – mechanisch, elektronisch und softwaretechnisch.

*„Ein einheitlicher systemzentrierter Rahmen kann Unternehmen, intelligente Produkte und Menschen als Systeme und Subsysteme modellieren, die in Echtzeit verbunden und interagieren, um ein vollständiges, voneinander abhängiges und interoperables Ökosystem zu bilden. Jedes einzelne System kann als unabhängig betreibbar definiert werden, kann aber für eine bestimmte Zeitspanne verbunden werden, um ein bestimmtes höheres Ziel zu erreichen“ [58].*

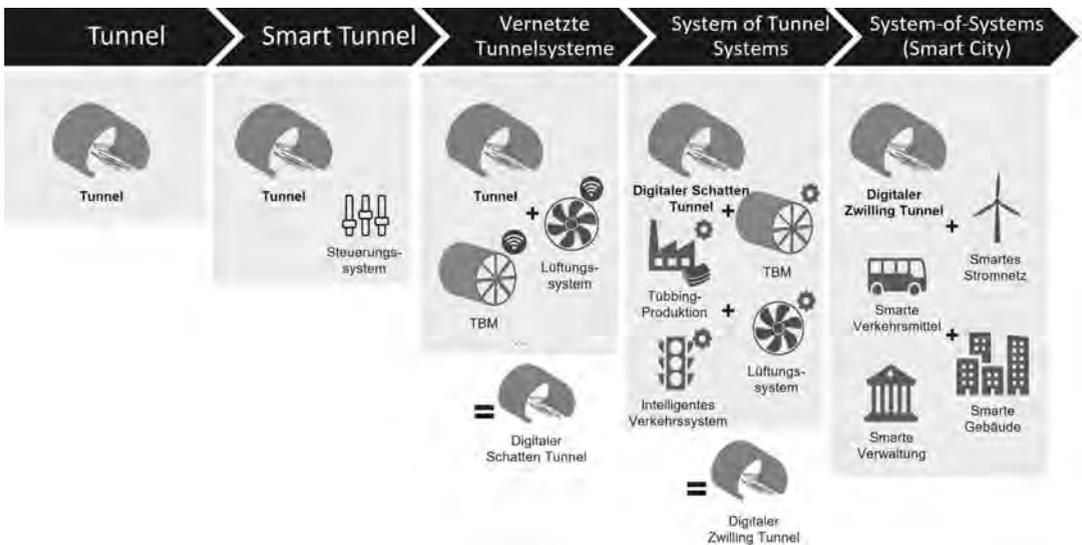
Im Kontext des Tunnelbaus ermöglicht dieser Ansatz die Entstehung von Systemen, die aus mehreren miteinander verbundenen Teilzwillingen bestehen. Diese Systeme reichen von Teilzwillingen auf

Komponenten-, Anlagen-, System- und Prozessebene. Um den vollen Nutzen aus diesen Systemen zu ziehen, ist es erforderlich, dass diese digitalen Zwillinge in der Lage sind, Informationen zu kombinieren. Dadurch können sie Einblicke und Analysen liefern, die über die Möglichkeiten der einzelnen Komponenten hinausgehen.

Das Konzept des „System-of-Systems“ (SoS) bietet einen Rahmen für die skalierbare Entwicklung von Systemen vernetzter digitaler Zwillinge. Diese Systeme sind in der Lage, einzigartige Erkenntnisse zu generieren, die nur auf kollektiver Ebene möglich sind.

Dies bedeutet, dass aus verschiedenen Tunnel- oder Bauprojekten bzw. Teilbereichen von Tunnelprojekten ein umfassender digitaler Zwilling für den gesamten Tunnel entstehen kann. Dieser beinhaltet nicht nur den digitalen Produktionszwilling für die Ausführung, der TBM und die Tübbingproduktion als smarte Produktionsstätte integriert, sondern auch betriebsrelevante Systeme wie Lüftungsanlagen und Verkehrssysteme als digitalen Performancezwilling in der Betriebsphase einbezieht. Ein umfassender Digitaler-Zwilling-Tunnel könnte wiederum als Teil eines breiteren Ökosystems von digitalen Zwillingen betrachtet werden, das eine Smart City bildet (s. Bild 14).

Ein wesentlicher Aspekt dieses Gesamtbildes ist das System von Systemen, das dafür sorgt, dass Informationen aus verschiedenen Quellen zusammengetragen werden können. Ohne ein solches System wäre es schwer, Entscheidungen auf Stadtebene zu treffen und eine effektive Reaktion auf die sich verändernde Stadtumgebung zu gewährleisten. Somit wird die Vision einer Smart City durch die koordinierte Zusammenarbeit von unterschiedlichen digitalen Zwillingen innerhalb eines umfassenden Ökosystems realisiert.



**Bild 14.** Entwicklungsstufen von digitalen Zwillingen für den Tunnelbau und deren Bedeutung im Konzept von System-of-Systems für Smart Cities

Auch im Kontext der Vernetzung von digitalen Zwillingen spielt die Informatik eine entscheidende Rolle. Die Baubranche generiert Anwendungsfälle und Funktionalitäten und stellt sicher, dass Daten in strukturierter Form bereitstehen. Hierbei liegt die Aufgabe der Informatiker darin, die Daten für die Migration von Systemen zusammenzuführen, um eine ganzheitliche und vernetzte Anwendung von Systems-of-Systems zu ermöglichen.

## 6 Fazit und Ausblick

Der Tunnelbau ist, ebenso wie andere Sparten der Baubranche, auf dem Weg zur Digitalisierung. Diese bietet zahlreiche Perspektiven in allen Phasen des Lebenszyklus von Bauwerken hinsichtlich nachhaltiger Optimierung und damit in der Regel einhergehender Steigerung der Effizienz in Planung, Ausführung und Betrieb. Mit diesem Ansatz kann auch die Bauwirtschaft in der derzeitigen Situation von Klimawandel, Ressourcenverknappung sowie weiteren wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Herausforderungen ihren Beitrag leisten. Darüber hinaus bietet die Digitalisierung der Bauwirtschaft ein probates Mittel, um die Strukturveränderungen besser bewältigen zu können.

Um die digitale Transformation im Tunnelbau in die reale Umsetzung zu bringen, ist eine vorausschauende Vorgehensweise erforderlich. Diese wird in Form einer Vision aufgezeigt, welche aus Sicht der Autor:innen einen Weg der Transformation anstatt der Revolution durch die technologischen Innovationen beschreiben soll. In diesem Zuge muss auf die derzeitigen Herausforderungen in der Bauwirtschaft und deren wirtschaftlichen Randbedingungen sowie den gesellschaftlichen Wandel reagiert werden. Es gilt auch die digitalen Innovationen zielführend und gewinnbringend einzusetzen, damit diese nicht zum Selbstzweck degradiert werden. Wie aus andere Branchen bereits zeigen, werden digitale Zwillinge zukünftig integrales Element im Lebenszyklus von Bauwerken sein und als Bestandteil der Digitalisierung der Bauwirtschaft mit dem Ziel von nachhaltiger Entwicklung eingehen.

Die Anwendung vom TIM bzw. BIM im Infrastrukturbau ist in Teilen bereits in der Praxis angekommen, jedenfalls ist im mitteleuropäischen Raum eine Steigerung der Implementierung festzustellen. Dies findet nicht zuletzt aufgrund der Einforderung durch die Auftraggeber, wie z. B. ÖBB oder DB, statt. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass die Motivation zum Einsatz digitaler Bauwerksmodelle auch mit dem Ziel der Optimierung projekt- oder unternehmensinterner Prozesse verbunden sein kann, wie dies Bauunternehmen aus dem Hochbau bereits veranschaulichen. Trotz aller bereits etablierten Möglichkeiten und Anwendungsfälle sind immer noch einige Herausforderungen und Probleme wie beispielsweise unzureichende und in Teilbereichen überbordende Standards, unzureichende Da-

tenkompatibilität oder auch ein Mangel an ausgebildeten Mitarbeitern für eine flächendeckende Anwendung zu lösen. Dabei sollen innovative Ansätze aus gemeinsamen Forschungsvorhaben zwischen Wirtschaft und Universitäten der Verbreitung weiteren Schwung verleihen. Im Tunnelbau ist im Gegensatz zum Hochbau verstärkt auf die drei unterschiedlichen Aspekte und damit auch Teilmodelle bzw. Teilzwillinge einer ganzheitlichen Modellierung einzugehen: Baugrund, Bauwerk und Baustelle. Wobei das Baugrundmodell aufgrund der Unsicherheiten in den Prognosen durch- aus spezielle Herangehensweisen erfordert. Das Bauwerk an sich weist viele Gemeinsamkeiten mit der Modellierung und der kollaborativen und integralen Projektabwicklung im Hochbau auf. Im Bereich der Baustelle muss der Fokus auf prozessgetriebene Ansätze mit dynamischen Modellen gelegt werden, insbesondere im maschinellen Vortrieb, welcher starken industriellen Charakter aufweist.

Die Umsetzung und der Begriff des digitalen Zwillings sind in anderen Branchen bereits etablierter und nehmen dort eine entsprechend größere Bedeutung ein. In der Baubranche wird häufig bereits ein digitales Bauwerksmodell als digitaler Zwilling bezeichnet. Dies stellt sich aus Sicht der Autoren als falsch und unzureichend dar, da gemäß der in diesem Beitrag propagierten Definitionen ein automatisierter bidirektionaler Datenfluss nicht besteht. Als Vorreiter des digitalen Zwillings stellt sich die Automobilindustrie heraus, bei der dieses Konzept lebenszyklusbezogen in Produkt-, Produktions- und Performancezwillinge strukturiert wird.

Den Erkenntnissen der Forschung und der Praxis folgend bestehen digitale Zwillinge aus mehreren Komponenten verschiedener Datenquellen, von denen digitale Modelle ein Teil sind. Dies stellt in der projektbezogenen Bauwirtschaft ein gewisses Problem dar, zumal dort eine relativ heterogene Planer-, Umsetzer-, und Betreiberstruktur vorhanden ist und folglich wenig homogene Daten bereitstehen. Doch auch hier bestehen schon technologische Lösungsansätze in Form von Datenplattformen, die mit Konvertern eine möglichst generische Datenbasis schaffen. Generell bieten das Konzept des digitalen Zwillings und innovative Datenanalysen im Tunnelbau bei durchgängiger Umsetzung enorme Möglichkeiten bei der Optimierung von Bauwerken, Prozessen und Nachhaltigkeit sowie Betrieb.

Im Rahmen dieser Veröffentlichung werden Hypothesen formuliert, die bei der Implementierung am Beginn unterstützen sollen. Eine der Hauptaufgaben bei der Umsetzung von digitalen Zwillingen ist neben der Bereitstellung strukturierter Daten, wofür die Bauwirtschaft zuständig ist, die Verarbeitung und das Aggregieren dieser, wobei dies in jedem Fall die Aufgabe der Informatik ist. Erste Prototypen bzw. Implementierungen sind bereits am Markt verfügbar. Aufgabe der Forschung in diesem Zusammenhang wird es sein, die Entwicklungen in diese Richtung weiterzutreiben.

Eine schrittweise Umsetzung des Konzeptes wird als zielführendste Möglichkeit angesehen, da die unmittelbare Umsetzung eines ganzheitlichen digitalen Zwillings weder realistisch noch machbar erscheint. Wesentlich ist zu Beginn stets die Definition des Anwendungsfalls und in weiterer Folge die Umsetzung als digitale Modelle, dann als digitaler Schatten und schließlich als digitaler Zwilling. Durch das Aggregieren von Anwendungsfällen und ihrer zugehörigen digitalen Repräsentanz entsteht sukzessive ein ganzheitlicher digitaler Zwilling. Das Resultat entspricht dann dem Konzept des „System-of-Systems“.

In Zusammenhang mit der Implementierung digitaler Zwillinge im Tunnelbau kann der Blick in andere Branchen durchaus einiges an Nutzen bringen. Dies nicht nur um Anleihen zu nehmen, sondern vor allem auch weil der Tunnelbau mit Fachbereichen wie Maschinenbau oder Elektrotechnik eng verknüpft ist.

Technische Innovationen im Allgemeinen und die Digitalisierung im Speziellen ermöglichen bzw. erfordern häufig auch alternative und innovative organisatorische und vertragliche Randbedingungen. Um den Rahmen dieses Beitrags nicht zu sprengen, wurde dieses Thema vorerst ausgeklammert und wird zu einem späteren Zeitpunkt publiziert.

Trotz aller digitalen Möglichkeiten wie Datenanalysen, künstlicher Intelligenz und dergleichen müssen die Akteur:innen der Bauwirtschaft selbst sicherstellen, dass sowohl die technologischen Entwicklungen als auch die darauf beruhenden Bauwerke der Gesellschaft und dem Individuum zugutekommen und keine neuen Gefahren darstellen. Um den digitalen Wandel auch im Tunnelbau geordnet vollziehen zu können, ist es seitens der Verantwortlichen vorteilhaft, die digitalen Innovationen unvoreingenommen zu bewerten und auf ihren jeweiligen Nutzen zu analysieren. Nur so können die definitiv anstehenden Veränderungen auch als Chance genutzt werden.

## Literatur

- [1] Galler, R. et al. (2023) *Aktuelle Forschung im Bereich der Digitalisierung des konventionellen Tunnelbaus*. Berg Huetttenmaenn Monatsh, <https://doi.org/10.1007/s00501-023-01409-5>
- [2] Flora, M.; Fröch; G.; Gächter, W. (2020) *Optimierung des Baumanagements im Untertagebau mittels digitaler Infrastruktur-Informationsmodelle*. Bautechnik 97, H. 11, S. 780–788, <https://doi.org/10.1002/bate.201900095>
- [3] Salami, J.; Heikkilä, R.; Hyytinen, M. (2023) *Tunneling & Mining Information Modelling: A Digital Environment for next Generation Mining* [online]. [https://www.researchgate.net/publication/373151419\\_TUNNELLING\\_MINING\\_INFORMATION\\_MODELLING\\_A\\_DIGITAL\\_ENVIRONMENT\\_FOR\\_NEXT\\_GENERATION\\_MINING](https://www.researchgate.net/publication/373151419_TUNNELLING_MINING_INFORMATION_MODELLING_A_DIGITAL_ENVIRONMENT_FOR_NEXT_GENERATION_MINING) [Zugriff am: 21.11.2023]
- [4] Abbondati, F.; Biancardo, S.A.; Palazzo, S.; Capaldo, F.S.; Viscione N. (2020) *I-BIM for existing airport infrastructures*. Transportation Research Procedia 45, pp. 596–603, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.052>
- [5] Fakhimi, A.; Majrouhi Sardroud, J. (2023) *Civil Information Modeling Transformation Framework in Oil, Gas and Petrochemical Construction Industry*. Arch Computat Methods Eng 30, No. pp, S. 3559–3583, <https://doi.org/10.1007/s11831-023-09917-w>
- [6] Cepa, J.J.; Pavón, R.M.; Alberti, M.G.; Ciccone, A.; Asprone, D. (2023) *A Review on the Implementation of the BIM Methodology in the Operation Maintenance and Transport Infrastructure*. Applied Sciences 13, No. 5, pp. 3176, <https://doi.org/10.3390/app13053176>
- [7] Hödl, R.; Nagl, C. (2023) *Ausrollung von Building Information Modelling* [online]. [https://www.ztkammer.at/fileadmin/user\\_upload/redakteure\\_stk/02\\_Mitglieder/BIM/Information\\_Ausrollung\\_von\\_BIM\\_24\\_07\\_2023\\_OE\\_BB.pdf](https://www.ztkammer.at/fileadmin/user_upload/redakteure_stk/02_Mitglieder/BIM/Information_Ausrollung_von_BIM_24_07_2023_OE_BB.pdf)
- [8] Gülicher, F.H. (2023) *BIM-Strategie: Infrastruktur besser planen, bauen und betreiben!* [online]. [https://www.deutschebahn.com/de/konzern/bahnwelt/bauen\\_bahn/BIM-6875938](https://www.deutschebahn.com/de/konzern/bahnwelt/bauen_bahn/BIM-6875938) [Zugriff am: 18.12.2023]
- [9] Salzano, A.; Intignano, M.; Mottola, C.; Biancardo, S.A.; Nicoletta M.; Dell'Acqua, G. (2023) *Systematic Literature Review of Open Infrastructure BIM*. Buildings 13, No. 7, pp. 1593, <https://doi.org/10.3390/buildings13071593>
- [10] Sacks, R.; Brilakis, I.; Pikas, E.; Xie, H.S.; Girolami, M. (2020) *Construction with digital twin information systems*. DCE 1, <https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>
- [11] Matějka, P. (2014) *The Importance of a Transport Infrastructure Construction for the Implementation of BIM*. People Build, Environ, pp. 277–289.
- [12] Ciccone, A.; Stasio, S.; Asprone, D.; Salzano, A.; Nicoletta, M. (2022) *Application of openBIM for the Management of Existing Railway Infrastructure: Case Study of the Cancellò–Benevento Railway Line*. Sustainability 14, No. 4, p. 2283, <https://doi.org/10.3390/su14042283>
- [13] Kurwi, S.; Demian, P.; Hassan, T. (2017) *Integrating BIM and GID in railway projects: a critical review*. In: Proceedings of the ARCOM – 33rd Annual Conference, pp. 45–53.
- [14] Altohami, A.B.A.; Haron, N.A.; Ales@Alias, A.H.; Law, T.H. (2021) *Investigating Approaches of Integrating BIM, IoT, and Facility Management for Renovating Existing Buildings: A Review*. Sustainability 13, No. 7, p. 3930, <https://doi.org/10.3390/su13073930>
- [15] Ganah, A.; Lea, G. (2021) *A Global Analysis of BIM Standards across the Globe: A Critical Review 1*, pp. 52–60.
- [16] Pan, X.; Mateen Khan, A.; Eldin, S.M.; Aslam, F.; Kashif Ur Rehman, S.; Jameel, M. (2024) *BIM adoption in sustainability, energy modelling and implementing using ISO 19650: A review*. Ain Shams Engineering Journal 15,

ble Instrumente im Hinblick auf die Verfügbarkeit von Ressourcen und den Klimaschutz zur Verfügung stellen. Ziel des BBQ-Konzepts ist auch die Ermöglichung von innovativen Bauweisen (projektspezifische Sonderlösungen) [4].

Im DAfStb wurde dann im Jahr 2020 entschieden, das neue BBQ-Konzept nicht als Richtlinie, sondern im Rahmen der DIN-Normung zu etablieren. Die normative Umsetzung wurde u. a. dadurch bedingt, dass in einigen Normenteilen auch aktuelle inhaltliche und technische Änderungen erforderlich geworden sind (Beton, Bauausführung und Betonfertigteile) und diese im Rahmen einer bauaufsichtlichen Einführung die vorherigen Normteile DIN 1045-2, DIN 1045-3 und DIN 1045-4 ersetzen sollen.

### 1.3 Die aktuelle Struktur der DIN-1045-Normenreihe

Mit Ausgabedatum August 2023 sind innerhalb der DIN-1045er-Reihe sieben neue Normen im Beuth Verlag veröffentlicht worden. Mit diesen neuen Normen wird das Betonbauqualitätskonzept (BBQ) im deutschen Regelwerk für die Bemessung und Konstruktion,

den Baustoff Beton, die Bauausführung und für Betonfertigteile eingeführt und untereinander verknüpft. Unter dem allgemeinen Titel „Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton“ umfasst das Regelwerk nun folgende Teile (Bild 1, Neuauflagen 2023-08 in kursiver Schrift):

- Teil 1000: Grundlagen und Betonbauqualitätsklassen (BBQ) [5],
- Teil 1: Planung, Bemessung und Konstruktion [6],
- Teil 2: Beton [7],
- Teil 3: Bauausführung [8],
- Teil 4: Betonfertigteile – Allgemeine Regeln [9],
- Teil 40: Regeln für Betonfertigteile, die keiner spezifischen Norm entsprechen [10],
- Teil 41: Anforderungen für die Verwendung von Betonfertigteilen in baulichen Anlagen [11],
- Teil 100: Ziegeldecken [12],
- Teil 101: Konformitätsnachweis für Ziegeldecken nach DIN 1045-100 [13].

Der Teil **DIN 1045-1000** ist die neue Rahmennorm, welche die BBQ-Zusammenhänge herstellt (s. Abschnitt 2).

Der Teil **DIN 1045-1** enthält nur die spezifischen Erläuterungen Festlegungen zur Einstufung in Planungs-

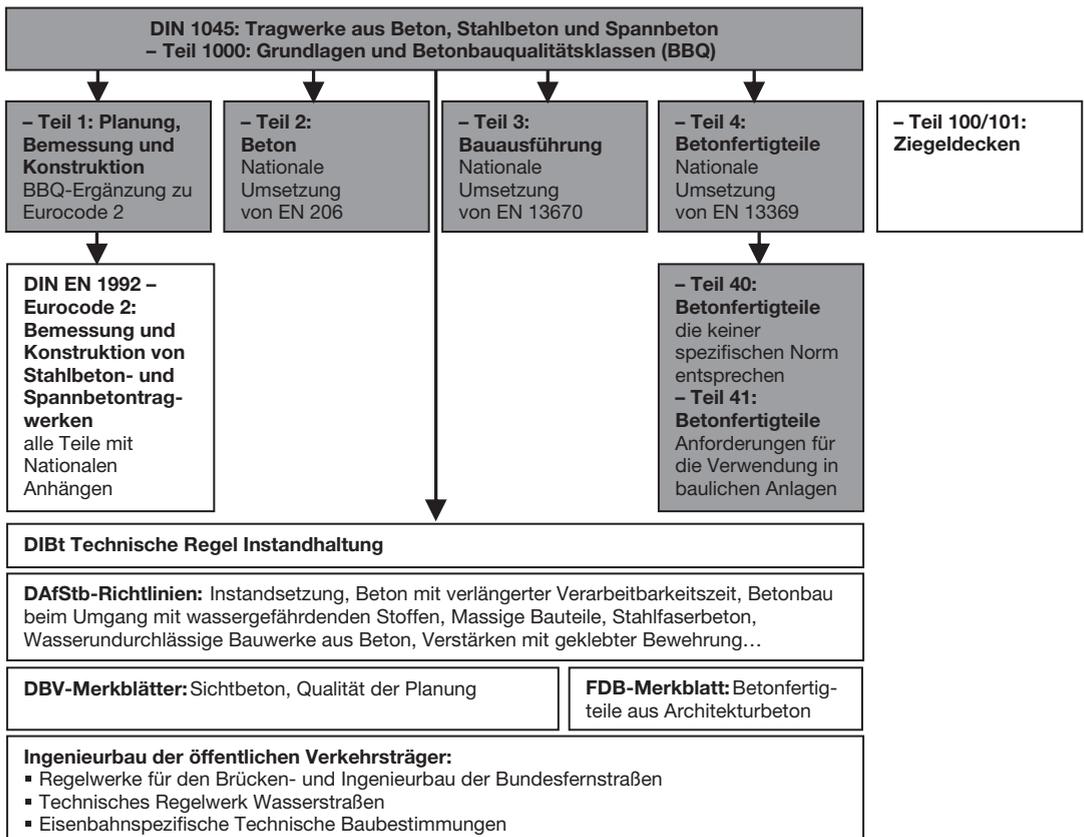


Bild 1. Struktur DIN-1045-Reihe mit Bezug auf weitere Regelwerke (Neuauflagen 2023-08 grau unterlegt)

klassen PK. Die Bemessung und Konstruktion erfolgt weiterhin unverändert auf Grundlage der bauaufsichtlich eingeführten Regelwerke (z. B. Eurocode 2, DAfStb-Richtlinien, s. Abschnitt 3).

Die Teile **DIN 1045-2** und **DIN 1045-3** regeln den Baustoff Beton und die Bauausführung jeweils als konsolidierte Fassungen der europäischen Normen EN 206 [14] und EN 13670 [15] mit allen zusätzlichen nationalen Anwendungsregeln. Ausführlichere Erläuterungen zu Änderungen und der Verknüpfung mit dem BBQ-Konzept zu DIN 1045-2 werden von *Dehn* und *Wiens* im Beitrag XIV „Beton“ und zu DIN 1045-3 von *Richter* und *Pickhardt* im Beitrag XV „Die neue DIN 1045-3 ‚Bauausführung‘ mit ihren wesentlichen Änderungen“ in diesem Beton-Kalender gegeben.

Der Teil **DIN 1045-4** setzt DIN EN 13369 [16] in die deutsche Normung um und legt allgemeine Regelungen für Betonfertigteile fest, auf die harmonisierte Europäische Produktnormen (hEN) verweisen. Auch für Fertigteile, für die keine europäischen Produktnormen existieren, können die allgemeinen Anforderungen der DIN 1045-4 verwendet werden. Für tragende Betonfertigteile gilt zusätzlich DIN 1045-40. Wenn eine spezielle Produktnorm vorliegt, hat sie allerdings Vorrang gegenüber DIN 1045-4.

Der Teil **DIN 1045-40** enthält Regelungen für tragende Betonfertigteile nach DIN 1045-4, für die es keine spezielle harmonisierte europäische Produktnorm hEN gibt. DIN 1045-40 kann auch für tragende Betonfertigteile, für die keine CE-Kennzeichnungspflicht besteht (die z. B. nach Eurocode 2 bemessen und konstruiert und auf Grundlage von DIN 1045-3 ausgeführt werden), angewendet werden.

Der Teil **DIN 1045-41** regelt die Anforderungen für die Verwendung in baulichen Anlagen und die in einer technischen Dokumentation vom Hersteller zu übermittelnden Angaben über die vorhandenen Leistungen von Betonfertigteilen.

Die vorhandenen Normenteile **DIN 1045-100** und **DIN 1045-101** für die Ziegeldecken gelten unverändert weiter.

## 2 Erläuterungen zu DIN 1045-1000

### 2.1 Einführung

Die im DAfStb entwickelten Grundlagen zu einem Konzept der **BetonBauQualität (BBQ)** (s. Abschnitt 1.2) werden im der neuen DIN 1045-1000 [5] umgesetzt. DIN 1045-1000 ist vollständig im Beitrag XVIII „Normen und Regelwerke“, Abschnitt 3 in diesem Beton-Kalender abgedruckt. Mit der neuen DIN 1045 in der Fassung August 2023 ist somit ein neuer Stand der Technik veröffentlicht worden. Damit werden verschiedene Aufklärungs-, Hinweis- und Dokumentationspflichten der Planer, der Bauprodukterhersteller und der Bauausführenden ausgelöst. Das DBV-

Merkblatt „BBQ-Konzept nach DIN 1045“ [17] enthält hierzu weiterführende Erläuterungen.

Die bauaufsichtliche Einführung der Normenteile DIN 1045-1, -2, -3, -4, -40, -1000 in den Verwaltungsvorschriften der Länder wird mit deren Aufnahme in die Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen MVV TB 2024/1 [18] eingeleitet. Die Anforderungen an die Kommunikation und deren Dokumentation in DIN 1045-1000 gelten dabei jedoch nicht als eingeführte Technische Baubestimmungen, sondern sollen projektbezogen planungs- und bauvertraglich vereinbart werden ([18] Anlage A 1.2.3/1, Nr. 7). Das heißt auch, eine Abweichung von den Anforderungen an die BBQ-Betonfachgespräche hinsichtlich Kommunikation und Dokumentation gilt nicht als wesentliche Abweichung von den eingeführten Technischen Baubestimmungen im Sinne der Musterbauordnung und führt insofern nicht zur Notwendigkeit einer allgemeinen oder vorhabenbezogenen Bauartgenehmigung bzw. Zustimmung im Einzelfall.

### 2.2 Die BBQ-Klassen

Bei komplexeren Planungs- und Bauaufgaben ist eine engere Abstimmung zwischen den verschiedenen Verantwortungsbereichen (Planung – Betonherstellung – Bauausführung) als bisher oft üblich zweckmäßig und erforderlich. Das bedeutet eine strukturierte obligatorische intensive Kommunikation und es sollte ein kontinuierlicher Informationsaustausch zwischen den einzelnen Verantwortlichen implementiert werden. Dadurch sollen mögliche Auswirkungen von auch nur geringfügigen Abweichungen innerhalb eines Prozesses auf das Gesamtsystem bewertet und ggf. notwendige Zusatzmaßnahmen rechtzeitig getroffen werden.

Schon in den Erläuterungen zur DAfStb-Richtlinie „Massige Bauteile aus Beton“ [19] wurde ein solches Kommunikationskonzept für die komplexere Bauaufgabe mit massigen Betonbauteilen klar zum Ausdruck gebracht [4]:

*„Das wirksame Ineinandergreifen aller von den jeweiligen Partnern getroffenen Entscheidungen und Maßnahmen ist für den Erfolg entscheidend. Einer engen und kontinuierlichen Abstimmung und Rückkopplung über alle Schnittstellen (Planung, Betonherstellung und Ausführung) hinweg kommt bei der Errichtung massiger Bauteile eine besondere Bedeutung zu. Sind im Zuge der Baumaßnahme Abweichungen gegenüber der ursprünglichen Planung, der Betonfestlegung oder der vorgesehenen Ausführung notwendig, so ist aufgrund der engen und oftmals folgenreichen Verknüpfung der einzelnen Schritte im Gesamtkonzept eine erneute Rückkopplung mit allen Beteiligten (Planung, Betonherstellung, Ausführung) unabdingbar. Wird beispielsweise ein Zement eingesetzt, der zu einem höheren oder niedrigeren Temperaturanstieg während der Hydratation führt als in der Planungsphase vorgesehen, kann sich dies erheblich auf die Zwangsspannungen und die daraus resultieren-*

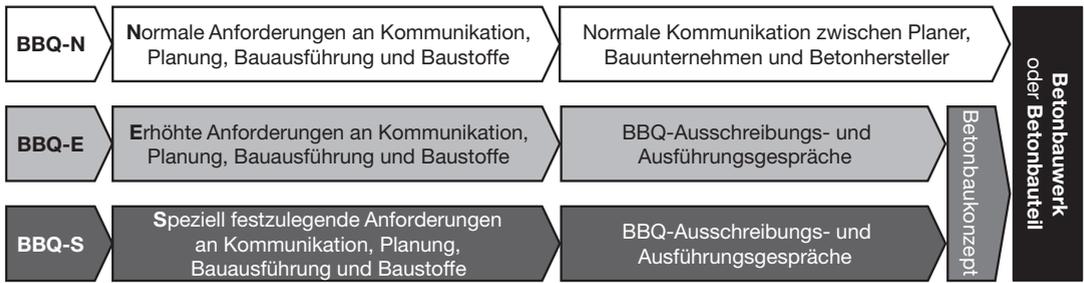


Bild 2. Einteilung der BBQ-Klassen für Bauwerke/Bauteile und Bezug zu BBQ-Betonfachgesprächen und BBQ-Betonbaukonzept [4]

de Mindestbewehrung auswirken. Ebenso können sich Änderungen im Betonierablauf oder bei den Betonierabschnitten auf Verzögerungszeiten auswirken, die zwingend mit dem Betonhersteller abzustimmen sind.“

Ein solch differenziertes Vorgehen kann nicht wie bisher pauschal in einem einzigen, einheitlichen und allumfassenden Normenkonzept erfasst und geregelt werden. Demzufolge ist es sinnvoll, vorab eine Klassifizierung hinsichtlich der unterschiedlich erforderlichen Maßnahmen zur Sicherstellung des gleichen Qualitätsniveaus für unterschiedlich komplexe Bauaufgaben vorzunehmen. Dies erfolgt mittels **BetonBauQualitätsklassen (BBQ-Klassen)**, die als „Systematik zur Unterscheidung des Anforderungsniveaus in technischer Hinsicht und hinsichtlich erforderlicher Kommunikation bzw. der Komplexität in den Bereichen Planung, Beton und Bauausführung von Bauwerken und Bauteilen aus Beton“ definiert werden.

Für eine Einteilung in Klassen ist stets eine entsprechende Graduierung für bestimmte Parameter erforderlich. Die BBQ-Klassen werden in drei Kategorien unterteilt (Bild 2).

Die erhöhten und speziellen Anforderungen an die Kommunikation werden durch obligatorische BBQ-Betonfachgespräche (Ausschreibungs- und Ausführungsgespräche) erfüllt (s. Abschnitt 2.3).

Es wird davon ausgegangen, dass bei den meisten Baumaßnahmen im allgemeinen und üblichen Hochbau, die „normale“ Klasse **BBQ-N** ausreichend ist. Dann bleibt es beim bisher Gewohnten: Besondere Betonfachgespräche, die über übliche Planungs- und Baubesprechungen hinausgehen, sowie ein separates Betonbaukonzept sind nicht erforderlich. Technisch reichen hier meist die grundlegenden Regelungen in den einschlägigen Regelwerken des Betonbaus aus.

Die Klasse **BBQ-E** umfasst dann Bauwerke/Bauteile mit erhöhten Anforderungen, die in der Regel durch vorhandene Regelwerke erfüllt werden können. Hier werden solche erhöhten technischen Anforderungen adressiert, die bei bestimmten Bauwerken, Betonarten oder Anwendungen auch bisher schon zu berücksichtigen sind und die auch in „normalen“ Anwendungen berücksichtigt werden mussten – und zwar auch, wenn es kein unmittelbares technisches Erfordernis gab. Da-

mit werden auch die in der Vergangenheit in Deutschland in den einschlägigen Regelwerken bereits seit Langem bewährten Festlegungen weiter beibehalten. Jedoch werden bei diesen gegenüber dem „Normalfall“ komplexeren Betonbaumaßnahmen erhöhte Anforderungen an eine intensivere Kommunikation zwischen den Beteiligten formuliert, die in den Betonfachgesprächen umgesetzt werden sollen.

In der Klasse **BBQ-S** gelten generell zunächst die grundlegenden technischen Anforderungen wie bei **BBQ-N**. Jedoch werden darüber hinaus projektspezifisch noch weitere oder abweichende Anforderungen und Parameter in der Leistungsbeschreibung des Projekts festgelegt. Dies kann gegenüber **BBQ-N** oder **BBQ-E** sowohl **erhöhte** als auch **reduzierte** Anforderungen beinhalten, die über vorhandene Regelwerke nicht oder nur unvollständig abgedeckt werden. Hinsichtlich der intensiveren Kommunikation sind in **BBQ-S** daher die mit **BBQ-E** verknüpften Betonfachgespräche ebenfalls obligatorisch. Erforderlichenfalls kann bauherrenseitig zusätzlich ein bereichsübergreifender Fachkoordinator für diese Betonfachgespräche bestellt werden.

Die speziellen technischen Anforderungen in **BBQ-S** können oft nicht mit den vorhandenen Normen und Richtlinien umgesetzt werden. Soweit hierzu Nachweise und Gutachten für spezielle ingenieurtechnische Lösungen außerhalb bauaufsichtlich eingeführter Bestimmungen erarbeitet werden müssen, ist deren Akzeptanz vertraglich zu vereinbaren und die notwendigen bauvorhaben- oder produktbezogenen Genehmigungen (z. B. bauaufsichtliche Verwendbarkeitsnachweise für Bauprodukte oder Anwendbarkeitsnachweise für Bauarten) sind einzuholen.

Für Ingenieurbauwerke der öffentlichen Verkehrsträger sollen mit der Klasse **BBQ-S** auch die speziellen Regelungen in den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen (ZTV) im Regelungsbereich von Straße und Wasser und die Verwaltungsvorschrift Bau (VV Bau) und Richtlinien der Bahn angebunden werden.

Für die Einstufung einer Baumaßnahme in die entsprechenden BBQ-Klassen ist zum einen die Komplexität des Bauwerks oder Bauteils selbst, zum anderen die sich jeweils aus der Planung, aus dem Baustoff Beton und aus der Bauausführung ableitenden

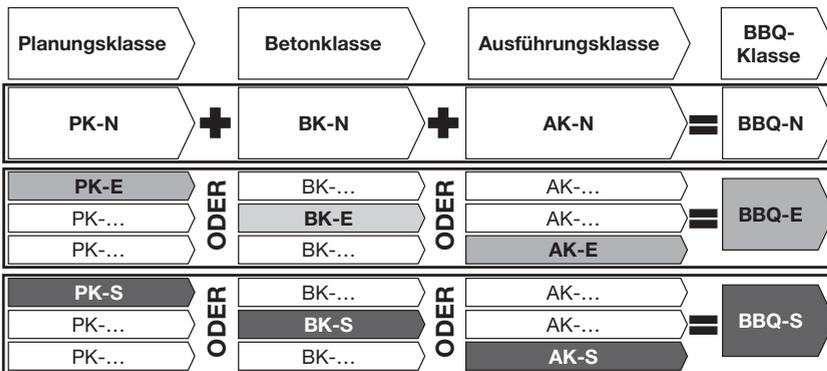


Bild 3. Verknüpfung der BBQ-Klassen mit den Planungs-, Beton- und Ausführungsklassen [4]

Anforderungsniveaus einzubeziehen. Dies soll über eine **Verknüpfung** mit den spezifischen Unterklassen für Planung, Beton und Bauausführung erfolgen. Die Einstufung kann entweder bauteil- oder bauwerksbezogen erfolgen. Dementsprechend werden auch die Planungsklassen (PK-N, PK-E, PK-S), die Betonklassen (BK-N, BK-E, BK-S) sowie die Ausführungsklassen (AK-N, AK-E, AK-S) definiert. Hierzu enthält Tabelle 2 in DIN 1045-1000 [5] eine exemplarische Auflistung von 77 Fällen als Zuordnungshilfe, in der die jeweiligen Parameter für jeden Bereich (Planung – Beton – Ausführung) zweckmäßigen Klassen zugeordnet werden.

Eine abschließende Zuordnung der BBQ-Klasse kann erst vorgenommen werden, wenn **alle** Anwendungsfälle von DIN 1045-1000 [5], Tabelle 2 auf Relevanz geprüft wurden.

Für die Klasse BBQ-N mit normalen Anforderungen ist es erforderlich, dass alle Unterklassen auch in N-Klassen fallen. Fällt mindestens eine der Unterklassen in -E (jedoch nicht in -S), führt dies zu Klasse BBQ-E. Fällt mindestens eine der Unterklassen in -S, führt dies immer zu Klasse BBQ-S (vgl. Bild 3).

Die Tabelle 2 in [5] ist natürlich hinsichtlich möglicher Anwendungsfälle nicht abschließend. Weitere Anwendungsfälle sind in der Praxis, je nach Anforderungsniveau und Komplexität, sinngemäß in BBQ-Klassen einzuordnen (z. B. Ziegeldecken nach DIN 1045-100/101 in BBQ-N oder Frischbetonverbundsysteme nach DBV-Merkblatt [20] in BBQ-S). Das DBV-Merkblatt „Umsetzung des BBQ-Konzepts nach DIN 1045“ [17] enthält hierzu auch Zuordnungsvorschläge für weitere Fälle außerhalb der Tabelle 2 in [5].

Ergeben sich in einer späteren Phase im Projektablauf Änderungen gegenüber einer ursprünglichen Festlegung der Klasse BBQ-N derart, dass eine anspruchsvollere Klasse BBQ-E oder BBQ-S erforderlich wird, sind unmittelbar mit dieser Klassenänderung Betonfachgespräche zu organisieren (in der Planungsphase ein BBQ-Ausschreibungsgespräch, in der Ausführungsphase ein BBQ-Ausführungsgespräch).

### 2.3 Die Betonfachgespräche

BBQ-Betonfachgespräche nach DIN 1045-1000, Anhang A dienen der Kommunikation im Rahmen der Qualitätssicherung im Betonbau. Sie sind für ein Bauwerk oder Bauteil nur erforderlich, wenn die Klassen BBQ-E oder BBQ-S mit erhöhten oder speziell festzulegenden Anforderungen in Abstimmung mit dem Bauherrn festgelegt wurden. Für die Organisation und Dokumentation der BBQ-Betonfachgespräche ist durch den Bauherrn zuerst ein „**BBQ-Koordinator**“ festzulegen (z. B. Mitarbeiter eines Planungsbüros, eines Bauunternehmens oder des Bauherrn). In den BBQ-Betonfachgesprächen sind dann Federführende und Mitwirkende festzulegen. Kommunikationsformen können neben eigentlichen Präsenzgesprächen auch Web-Meetings, Telefonate, E-Mails oder eine modellbasierte Kommunikation (BIM-Workflow) oder unternehmensinterne Leitfäden sein.

Ausnahmen: Die Kommunikationskonzepte mit den bisher üblichen Planungs- und Baubesprechungen brauchen nicht nach den neuen Vorgaben in DIN 1045-1000 strukturiert zu werden, wenn

- es sich um einfache Bauaufgaben mit normalen Anforderungen in Klasse BBQ-N handelt oder
- Generalunternehmer oder Generalübernehmer sowohl die Planung als auch die Ausführung verantworten bzw. eigenverantwortlich vergeben.

Bei Mischkonstruktionen (überwiegend Ortbeton kombiniert mit Betonfertigteilen), gelten die Kommunikationsanforderungen nach DIN 1045-1000 [5], A.2. Für eine überwiegende Betonfertigteilbauweise darf ein angepasster Kommunikationsprozess nach [5], A.3 verfolgt werden. Dabei wird erwartet, dass Fertigteilhersteller neben der Herstellkompetenz auch über eine eigene planerische Kompetenz verfügen und dann die Funktion der „Fachkundigen Person“ übernehmen. Für die Organisation des Kommunikationsprozesses ist vom Bauherrn ein Federführender festzulegen.

Für die über die gesamten Planungs- und Ausführungsphasen laufenden Betonfachgespräche ist schon während der Planungsphasen durch den BBQ-Koordinator

## 4 Qualitätssicherung und Überwachung

Als Grundlage der Qualitätssicherung wird davon ausgegangen, dass eine normgerechte Planung für das Tragwerk bzw. Bauteil vorliegt, die Baumaßnahme auf der Baustelle fachgerecht umgesetzt wird sowie bei den Klassen BBQ-E und BBQ-S die BBQ-Ausführungsgespräche geführt wurden, ergänzende Festlegungen in den bautechnischen Unterlagen oder im Betonbaukonzept dokumentiert sind und auch im Bedarfsfall fortgeschrieben wurden. Sofern ein Qualitätssicherungsplan in den bautechnischen Unterlagen gefordert wird, muss er auf der Baustelle verfügbar sein.

Von zentraler Bedeutung für die Überwachung des Betons und seines Einbaus ist hierbei die Zuordnung von Bauteilen, Baustoffen oder Bautechniken zu den Überwachungsklassen, die im Abschnitt 5 (Qualitätssicherung und Überwachung) in der neuen DIN 1045-3 [3] tabellarisch aufgeführt ist. Die Aufgaben und Anforderungen an die Überwachung des Betons und seines Einbaus erfolgt – wie bislang auch – in den Anhängen A bis E der Norm.

### 4.1 Überwachungsklassen

Die Zuordnung in Überwachungsklassen (ÜK) erfolgt ausschließlich in der DIN 1045-3 [3] (Tabelle 3). Hierzu werden *nur die* Anwendungsfälle aus Tabelle 2 der DIN 1045-1000 [4] gelistet, die der ÜK 2 zugeordnet werden. Alle anderen Anwendungsfälle führen zur ÜK 1 (s. a. Tabelle 2, Zeile 15). Eine Überwachungsklasse 3, die noch in der DIN 1045-3:2012-03 [2] für hochfesten Beton vorgesehen war, gibt es mit der neuen Norm nicht mehr. Beton höherer Festigkeitsklassen wird in die Überwachungsklasse 2 eingestuft.

Eine direkte Verknüpfung der Ausführungsklasse mit der Überwachungsklasse ist nicht gegeben. So können Maßnahmen oder Anwendungen, die in DIN 1045-1000 [4], Tabelle 2, in AK-E oder AK-S eingestuft werden oder anderweitig zu BBQ-E oder BBQ-S führen, durchaus in der Tabelle 3 nicht der Überwachungsklasse 2 (ÜK 2), sondern ÜK 1 zugeordnet sein.

Bei Durchsicht der Zuordnungen ist erkennbar, dass einige Einstufungen aus der bisherigen Bauausführungsnorm übernommen wurden. Beton der Festigkeitsklasse ab C30/37 ist wieder in der ÜK 2 zu finden, aber auch der Beton höherer Festigkeitsklassen (ab C60/75). Bauteile der Expositionsklassen XF2/XF3/XF4, XD2/XD3, XS2/XS3, XM2/XM3 und XA3 oder stärker sind – wie bislang auch – gemäß der Überwachungsklasse 2 zu überwachen. Beton oder Bauteile der Expositionsklassen XD1, XS1, XM1 sowie XA1 und XA2 sind nunmehr in Bezug auf ihre Expositionsklasse in ÜK 1 zu finden. Aufgrund der geforderten Festigkeitsklasse nach DIN 1045-2 [6] für Betone der Expositionsklassen XD1, XS1, XM1 und XA2 sind diese aber wieder über ihre Festigkeit der ÜK 2 zugeordnet. Lediglich die Expositionsklasse XA1 bleibt in der ÜK 1.

Schwerbeton und Leichtbeton werden pauschal der ÜK 2 zugeordnet. Die bisherigen Einschränkungen – Schwerbeton nur für Strahlenschutzbeton als ÜK 2-Beton und bei Leichtbeton Differenzierung zwischen ÜK 1 und ÜK 2 je nach Kombination von Rohdichte bzw. Festigkeitsklasse – sind entfallen.

Einige Anwendungen wurden noch nicht im alten Normenwerk behandelt, sondern bislang über Richtlinien geregelt. So gibt es nun in der neuen DIN 1045-3 Zuordnungen für Selbstverdichtenden Beton (ÜK 2), Stahlfaserbeton nach Richtlinie (ÜK 2 für Leistungsklasse > L1–1,2) oder Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen. Letztere sind bei mehr als 25 Vol.-% Austausch der groben Gesteinskörnung in den Grenzen der DIN 1045-2 [6] der ÜK 2 zugeordnet.

Tendenziell sind weniger Betone der ÜK 2 zugeordnet als bisher. Verzögerter Beton ab C25/30 mit einer Verzögerungszeit bis 12 Stunden, Unterwasserbeton sowie „Beton für wasserundurchlässige Baukörper“ waren bisher grundsätzlich in der Überwachungsklasse 2 zu finden. Nunmehr wird der bis 12 Stunden verzögerte Beton, Unterwasserbeton und Beton für „WU-Konstruktion nach DAfStb-Richtlinie in den Beanspruchungsklassen 1 und 2“ der Überwachungsklasse 1 zugeordnet. Sicherlich gibt es bei den genannten Betonen andere Konzepte oder Vorgaben zur Qualitätssicherung, aber der Verzicht auf eine Überwachung gemäß den Vorgaben der DIN 1045-3 zur Überwachungsklasse 2 bedeutet auch einen Verzicht auf die ständige Betonprüfstelle im Rahmen der „Eigenüberwachung“ und auf die „Fremdüberwachung“ durch eine anerkannte Überwachungsstelle.

### 4.2 Überwachung des Betons und seines Einbaus – Anhänge

Die Überwachung der Bauausführung sowie die Notwendigkeit und Anforderungen an Überwachungsleistungen sind – in Analogie zu den Anhängen NA bis NE der DIN 1045-3:2012-03 [2] – auch in der neuen DIN 1045-3:2023-08 [3] wieder in den normativen Anhängen A bis E geregelt. Im Einzelnen sind dies:

- Anhang A – Überwachung durch das Bauunternehmen (Eigenüberwachung),
- Anhang B – Prüfungen für die maßgebenden Frisch- und Festbetoneigenschaften,
- Anhang C – Überwachungsklasse 2 – Überwachung des Einbaus von Beton durch das Bauunternehmen (Eigenüberwachung),
- Anhang D – Überwachungsklasse 2 – Überwachung des Einbaus von Beton durch eine dafür anerkannte Überwachungsstelle (Fremdüberwachung),
- Anhang E – Überwachung des Einpressens von Zementmörtel in Spannkäme durch eine dafür anerkannte Überwachungsstelle.

Anscheinend belanglos wirkt die erläuternde Ergänzung der Überschriften der Anhänge A und C um den Begriff „Eigenüberwachung“ sowie bei Anhang D um den Begriff „Fremdüberwachung“. Diese Formu-

**Tabelle 3.** Anwendungsfälle nach DIN 1045-1000:2023-08, Tabelle 2, mit Bezug zu Überwachungsklassen (ÜK) [3]

Zeile <sup>1)</sup>	Anwendung	PK	BK	AK	BBQ	ÜK
<b>Anforderungen an die Nutzung</b>						
3	Anlagen zum Lagern, Abfüllen und Umschlagen (LAU) oder Herstellen, Behandeln und Verwenden (HBV) von wassergefährdenden Stoffen (WHG-Anlagen nach dem Wasserhaushaltsgesetz) nach DAfStb-Richtlinie „Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (BUMWS)“	E	E	E	E	2
<b>Expositionsklassen und Feuchtigkeitsklassen</b>						
16	Beton mit künstlichen Luftporen (LP-Beton), z. B. XF2/XF3/XF4	N	E	E	E	2
17	Bauteile in Expositionsklassen XF2/XF3 (ohne künstliche Luftporen), XD2/XD3, XS2/XS3, XM2/XM3	N	N	E	E	2
19	chemischer Angriff XA3 oder stärker	S	N	S	S	2
<b>Festigkeitsklassen und Festigkeitsentwicklung</b>						
23	Betone der Druckfestigkeitsklassen $\geq C30/37$ und $\leq C60/75$	N	N	E	E	2
24	Betone der Druckfestigkeitsklassen $\geq C70/85$ und $\leq C100/115$	N	E	E	E	2
25	von 28 Tagen abweichendes Nachweialter für die Druckfestigkeit des Betons	E	N	E	E	2
<b>Betone für verschiedene Anwendungen</b>						
29	Beton mit Kunststofffasern für den Brandschutz	E	E	E	E	2
31	Stahlfaserbeton nach DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“ mit Leistungsklasse > L1–1,2	E	E	E	E	2
32	Leichtbeton	N	E	E	E	2
33	Schwerbeton	S	E	E	S	2
36	Selbstverdichtender Beton	E	E	E	E	2
38	Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen > 25 Vol.-% Austausch der groben Gesteinskörnung nach DIN 1045-2:2023-08, 5.2.3.4, (1), 2. Spiegelstrich	N	E	E	E	2
39	Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen abweichend von DIN 1045-2:2023-08, 5.2.3.4	S	S	E	S	2
41	Verzögerter Beton mit VZ-Zeit > 12 h nach DAfStb-Richtlinie „Beton mit verlängerter Verarbeitbarkeitszeit (Verzögerter Beton)“	N	S	S	S	2
<b>Bauteile und Bauwerke mit versch. Anforderungen an Bemessung, Konstruktion und Ausführung</b>						
50	Massige Bauteile nach DAfStb-Richtlinie „Massige Bauteile aus Beton“	E	N	E	E	2
54	Vorspannung mit sofortigem Verbund	N	N	E	E	2
55	Vorspannung mit nachträglichem Verbund oder ohne Verbund	E	N	E	E	2

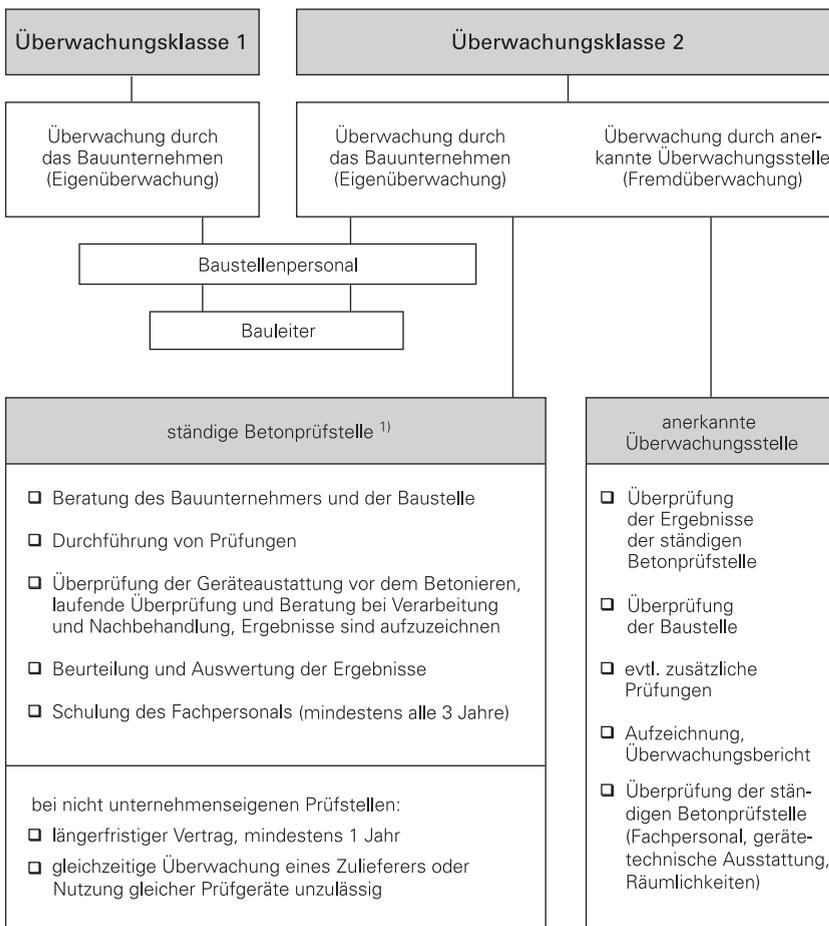
1) Zeilennummerierung gemäß DIN 1045-1000 [4], Tabelle 2.

lierungen spiegeln aber die auch in der Vergangenheit meistgewählten Begriffe für die recht sperrig wirkenden Bezeichnungen „Überwachung [...] durch das Bauunternehmen“ und „Überwachung [...] durch eine dafür anerkannte Überwachungsstelle“ wider. Die beiden Begriffe „Eigenüberwachung“ und „Fremdüberwachung“ werden somit durch die neue DIN 1045-3 wieder „legitimiert“.

Als neuer Anhang kommt ergänzend in der neuen DIN 1045-3 [3] der informative **Anhang F** über die „Regelungen bei von 28 Tagen abweichendem Nachweialter der Druckfestigkeitsklasse“ hinzu. Diese Regelungen standen bislang in der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen 2023/1

(MVV TB 2023/1) [8], Anlage A 1.2.3/4, allerdings dort noch erweitert um Angaben zum Lieferverzeichnis und zum Lieferschein.

Die Struktur der Überwachung des Betons auf der Baustelle ist von der bisherigen DIN 1045-3 übernommen worden. Sie besteht weiterhin für Beton der Überwachungsklasse 1 (ÜK 1) lediglich aus der *Überwachung durch das Bauunternehmen (Eigenüberwachung)* sowie bei Verarbeitung von Beton der Überwachungsklasse 2 aus der vorgenannten *Eigenüberwachung* und zusätzlich aus der *Überwachung durch eine dafür anerkannte Überwachungsstelle (Fremdüberwachung)*. Für die Überwachung des Betons auf der Baustelle ist allerdings die Überwachungsklasse 3 entfallen (bislang



<sup>1)</sup>Leitung durch eine in der Betontechnik erfahrene Person mit nachgewiesenen erweiterten betontechnologischen Kenntnissen

**Bild 2.** Überwachung durch das Bauunternehmen und eine anerkannte Überwachungsstelle (Beton nach Eigenschaften) nach [9]

für hochfesten Beton). Die unveränderte Struktur der Überwachung von Beton der Überwachungsklassen 1 und 2 mit Eigen- und Fremdüberwachung sowie die damit verbundenen Aufgaben des Bauunternehmens sowie von Prüf- und Überwachungsstellen ist in Bild 2 dargestellt.

Für die Überwachungsklasse 1 wird die Eigenüberwachung durch das Bauunternehmen, vertreten durch Baustellenpersonal und Bauleiter, umgesetzt. Bei Verarbeitung von Beton der Überwachungsklasse 2 wird die Eigenüberwachung, wie bislang auch, zusätzlich durch die *ständige Betonprüfstelle* begleitet. Die ständige Betonprüfstelle kann unternehmenseigen sein oder eine mit den Aufgaben betraute externe Prüfstelle. Die vertragliche Bindung an eine externe Prüfstelle beträgt mindestens ein Jahr. Die Fremdüberwachung übernimmt die „*dafür anerkannte Überwachungsstelle*“, die die Baustelle bzw. die Ergebnisse und Aufzeichnungen der ständigen Betonprüfstelle überprüft.

Nicht nur die Bezeichnung der Anhänge und die Struktur der Überwachung von Beton der Überwachungsklasse 1 und 2 sind weitestgehend aus der bisherigen DIN 1045-3:2012-03 [2] übernommen worden. Auch inhaltlich orientieren sich die Anhänge der neuen DIN 1045-3 zur Überwachung des Betons bzw. seines Einbaus an ihrer Vorgängernorm. Wesentliche Änderungen werden nachfolgernd zusammengefasst.

**Anhang A** regelt grundlegend die Eigenüberwachung von Traggerüsten und Schalungen, des Bewehrns, Betonierens sowie des Vorspannens und Einpressens (Anhang A.1–A.6). Die Änderungen sind marginal oder redaktionell. Unstrittig ist auch, dass hier auf die bisherige tabellarische Einteilung der Überwachungsklassen verzichtet wird, da diese jetzt in anderen Abschnitten bzw. Tabellen vorgenommen wurde.

Geblieden ist weiterhin die Forderung, dass – unabhängig von einer Zuordnung in eine Überwachungsklasse – neben maßgebenden Frisch- und Festbetoneigenschaften

ten für das Betonieren folgende Aufzeichnungen oder Überprüfungen notwendig sind:

- Lufttemperatur (Maximum/Minimum) und Witterungsverhältnisse während des Betonierens einzelner Abschnitte,
- Bauabschnitt und Bauteil,
- Art und Dauer der Nachbehandlung,
- Zeitabschnitte des Ausrüstens und Ausschalens sowie die Lufttemperatur und Witterungsverhältnisse.

Diese Dokumentationspflicht (z. B. durch Führen eines Betonier- oder Bautagebuchs) erfasst also weiterhin alle Baumaßnahmen der Überwachungsklassen 1 und 2.

Einzig neu ist Anhang A.7, der die „Überwachung von auf der Baustelle nicht werkmäßig gefertigten Betonbauteilen“ regelt. Die Überwachung dieser Betonbauteile, die auf der Baustelle ohne System der werkseitigen Produktionskontrolle (projektbezogen und von der endgültigen Lage abweichend) gefertigt werden, erfolgt zwar analog zu Abschnitt A.1 bis Abschnitt A.6. Zusätzlich zur Eigenüberwachung durch das Bauunternehmen ist aber eine Überwachung durch eine dafür anerkannte Überwachungsstelle vorzunehmen.

**Anhang B** umfasst die „Prüfungen für die maßgebenden Frisch- und Festbetoneigenschaften“. Für Beton nach Eigenschaften wird in dieser Norm die Verwendung von Transportbeton unterstellt. Baustellenbeton, aber auch Standardbeton, finden im Anhang B, wie auch in der gesamten DIN 1045-3 keine Erwähnung mehr. Baustellenbetone werden in der DIN 1045-2 [6] behandelt. Standardbeton ist in Deutschland nicht mehr normativ geregelt.

Die **Tabellen B.1 und B.2** der DIN 1045-3 beschreiben – wie in der Vergangenheit auch – den Umfang und die Häufigkeit der Prüfungen; Tabelle B.1 für Beton nach Eigenschaften, Tabelle B.2 für Beton nach Zusammensetzung. Abgesehen vom Entfall der Forderungen für die bisherige Überwachungsklasse 3, sind auch in diesen beiden Tabellen die Änderungen überschaubar. Wesentliche Neuerungen sind:

- Konsistenzprüfung (Zeile 2):  
Aufnahme von Prüfverfahren für Selbstverdichtenden Beton (SVB) und Hinweis auf DIN 1045-2 [6], Anhang N. (Tabellen B.1 und B.2)
- Konsistenzprüfung (Zeile 2, für ÜK 2):  
Nicht nur beim ersten Einbringen eines Betons oder bei der Herstellung der Probekörper, sondern auch bei Prüfung des Luftgehalts (jedes Lieferfahrzeug) und bei verzögertem Beton (in angemessenen Abständen). (Tabelle B.1)
- Messung der Frischbetontemperatur (Zeile 3, für ÜK 2):  
Nicht mehr nur bei Temperaturen unter 5 °C oder über 30 °C, sondern auch bei der Herstellung von Probekörpern und in Zweifelsfällen (Tabellen B.1 und B.2) sowie bei verzögertem Beton in angemessenen Abständen. (Tabelle B.1)

- Luftgehalt von Luftporenbeton (Zeile 5):  
Hinweis auf Berücksichtigung des Korrekturfaktors der Gesteinskörnung (G) nach DIN EN 12350-7 [10]. (Tabellen B.1 und B.2)
- Gleichmäßigkeit des Betons (Zeile 6):  
Die Überprüfung der „Gleichmäßigkeit des Betons“ ist in Tabelle B.2 ergänzt worden (fehlte bislang).
- Funktionskontrolle der Verdichtungsgeräte (Zeile 9 bzw. 10, für ÜK 2):  
Vor jeder Betonage (bisher: Bei Beginn der Betonierarbeiten, dann mindestens monatlich). (Tabellen B.1 und B.2)

Die **Annahmeprüfung für die Betondruckfestigkeit** für Beton nach Eigenschaften ist in **Anhang B.2** geregelt. Für jeden verwendeten Normal-, Leicht- und Schwerbeton der Überwachungsklasse 2 ist eine Annahmeprüfung für die Druckfestigkeit durchzuführen. Sofern nicht anders festgelegt, beträgt das Prüfalter 28 Tage. Wenn in den bautechnischen Unterlagen oder im Betonbaukonzept festgelegt, sind die Proben nach dem Pumpvorgang zu entnehmen. Ansonsten sind die Proben kurz nach Beginn des Entladens aus dem Lieferfahrzeug zu entnehmen. Wesentliche Änderungen betreffen die Anzahl der Probekörper und die Annahmekriterien für die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung.

Es ist eine „angemessene Anzahl von Probekörpern“ zur Bestimmung der Betondruckfestigkeit herzustellen und zu prüfen. Nach DIN 1045-3:2023-08 [3] sollte hierzu *ein Probekörper* eine Betonmenge von etwa

- 100 m<sup>3</sup> oder einen Betoniertag repräsentieren und
- für jeden verwendeten Beton ist mindestens ein Probekörper herzustellen.

Von der Regel für den Betoniertag darf mit Zustimmung der anerkannten Überwachungsstelle abgewichen werden.

In der DIN 1045-3:2012-03 [2] mussten bei der Überwachungsklasse 2 bislang für jeden verwendeten Beton mindestens *drei Proben* entnommen werden, und zwar jeweils

- für höchstens 300 m<sup>3</sup> oder je drei Betoniertage.

Im Vergleich der neuen zur alten DIN 1045-3 beträgt offensichtlich die durchschnittliche Probenanzahl bei der Überwachungsklasse 2 weiterhin eine Probe je 100 m<sup>3</sup> oder je Betoniertag. Für die Verarbeitung täglich größerer Betonmengen dürfte die Gesamtmenge der Proben vergleichbar sein. Bei aber nur an einem Tag betonierten kleineren Mengen bis ca. 100 m<sup>3</sup> wären nach alter Norm drei Probekörper notwendig, nach neuer Norm nur noch einer.

Die notwendigen drei Proben nach den Anforderungen der bisherigen Norm konnten auch für die Bildung des Mittelwertes herangezogen werden. Dies ist mit der kleinstmöglichen Probemenge der neuen DIN 1045-3 – nur noch eine Probe im Minimum – nicht mehr möglich. Es ist nach neuer Norm auch nicht mehr zwingend notwendig, da die Nachweisführung der gefor-

**Tabelle 4.** Annahmekriterien für die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung von Normal-, Leicht- und Schwerbeton nach DIN 1045-3 [3], Tabelle B.3

Festigkeitsnachweis (Annahmeprüfung)	Überwachungsklasse ÜK 2	Überwachungsklasse ÜK 1 (nur optional)
Jeder Einzelwert $f_{ci}$	$\geq \min\{f_{ck} - 4; 0,9 \cdot f_{ck}\}$	$\geq f_{ck} - 4$

$f_{ck}$  charakteristische Druckfestigkeit des verwendeten Betons in MPa; bei Leichtbeton  $f_{ck}$  durch  $f_{lck}$  ersetzen.

**Tabelle 5.** Zusätzliches (optionales) Mittelwertkriterium für die Druckfestigkeit für BBQ-E und BBQ-S nach DIN 1045-3 [3], Tabelle B.4 (Auszug)

Anzahl „n“ der Einzelwerte in einer Reihe	Mittelwertkriterium (optional) – Mittelwert von „n“ Einzelwerten $f_{cm}$ [MPa]
3 bis 4	$\geq f_{ck} + 1$
5 bis 6	$\geq f_{ck} + 2$
ab 7	Aufteilung in Gruppen von „3 bis 4“ oder „5 bis 6“ Einzelwerten und entsprechende Bewertung nach vorgenannten Zeilen.

$f_{ck}$  charakteristische Druckfestigkeit des verwendeten Betons in MPa; bei Leichtbeton  $f_{ck}$  durch  $f_{lck}$  ersetzen.

derten Festigkeit im Rahmen der Überwachung durch das Bauunternehmen (Eigenüberwachung) nicht mehr grundsätzlich auf der Beurteilung von Einzelwerten und Mittelwerten basiert. Die Beurteilung der Festigkeitsklasse aufgrund von Einzelergebnissen ist hier zukünftig ausreichend. Tabelle 4 beschreibt die Anforderungen an die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung von Normal-, Leicht- und Schwerbeton (Annahmekriterien). Der Beton ist anzunehmen, wenn für jeden Einzelwert die Anforderungen nach Tabelle 4 erreicht werden. Während die Druckfestigkeitsprüfung bei Betonen der ÜK 2 obligatorisch ist, kann die Druckfestigkeit für Betone der ÜK 1 optional mit den entsprechenden Werten nach Tabelle 4 beurteilt werden.

Der mathematische Ausdruck „ $\min\{f_{ck} - 4; 0,9 \cdot f_{ck}\}$ “ bedeutet, der kleinere Wert in der geschweiften Klammer ist maßgebend. Bei der Überprüfung der Druckfestigkeit an Würfeln ist bis einschließlich eines C30/37 die Forderung  $f_{ck} - 4$  einzuhalten ( $33 \text{ N/mm}^2 < 0,9 \cdot f_{ck} = 33,3 \text{ N/mm}^2$ ). Ab einem C35/45 ergibt die Anforderung  $0,9 \cdot f_{ck}$  die kleineren Werte ( $40,5 \text{ N/mm}^2 < 41 \text{ N/mm}^2 = f_{ck} - 4$ ).

Wenn die vorgenannten Druckfestigkeitsnachweise an Probekörpern im Einzelfall nicht erfüllt werden, sind nun auch Prüfungen mit dem Rückprallhammer am Bauwerk/Bauteil möglich. Wenn diese nicht zu einem ausreichenden Ergebnis führen, sind Bohrkernproben am Bauwerk und deren Bewertung zulässig.

In den Betonbauqualitätsklassen BBQ-E und BBQ-S können im Betonbaukonzept zur Qualitätssteuerung der Frisch- und Festbetoneigenschaften zusätzliche Prüf- bzw. Auswerteverfahren zwischen Hersteller und Verwender vereinbart werden. Hierzu werden folgende Verfahren grundsätzlich genannt:

- Auswertung von Prüfdaten auf Grundlage von Qualitätsregelkarten (QRK),
- Auswertung von Prüfdaten auf Grundlage der kumulativen Summe (KUSUM-Verfahren),

- Auswertungen von Prüfdaten auf Basis einer Mittelwertkontrolle von „n“ aufeinanderfolgenden Einzelwerten in einer Reihe.

Ob sich die aus der Steuerung des Produktionsprozesses bei der Herstellung von Gütern bekannten Methoden (Qualitätsregelkarten (QRK), KUSUM-Verfahren) zur Bewertung der Druckfestigkeit von Probekörpern auf der Baustelle durchsetzen, bleibt abzuwarten. Hinweise zur Anwendung der Verfahren gibt z. B. DIN 1045-2:2023-08 [6], Anhang H.

Als Beispiel für ein zusätzliches (optionales) Qualitätskriterium kann die Bewertung der Druckfestigkeit auf Basis einer Mittelwertkontrolle herangezogen werden. Tabelle 5 gibt in Anlehnung an Tabelle B.4 der neuen DIN 1045-3 hierzu ein Mittelwertkriterium von „n“ aufeinanderfolgenden Einzelwerten in einer Reihe an, das sich an den Anforderungen der bislang gültigen DIN 1045-3:2012-03 [2] orientiert.

**Anhang C** (Überwachungsklasse 2 – Überwachung des Einbaus von Beton durch das Bauunternehmen – Eigenüberwachung) und **Anhang D** (Überwachungsklasse 2 – Überwachung des Einbaus von Beton durch eine dafür anerkannte Überwachungsstelle – Fremdüberwachung) sind fast wort- und inhaltsgleich aus den Anhängen NC und ND der Vorgängernorm übernommen worden. Sie beschreiben die Aufgaben der ständigen Betonprüfstelle (Anhang C) und der anerkannten Überwachungsstelle (Anhang D).

Anhang C erweitert wohl die Auflagen an externe Prüfstellen, die im Auftrag des Bauunternehmens die Leistungen der ständigen Betonprüfstelle übernehmen. Bekanntermaßen darf das Bauunternehmen keine Prüfstelle beauftragen, die auch den Hersteller des Betons überwacht oder von diesem wirtschaftlich abhängig ist oder die identischen Prüfgeräte nutzt. Die letzte Passage zur Nutzung der Prüfgeräte ist neu hinzugekommen. Der Ausschluss der Nutzung identischer Prüfgeräte (für die Überwachung der Baustelle und

des Transportbetons) soll unbemerkte (temporäre) systematische Messfehler ausschließen und verhindern, dass defekte oder fehlerhafte Prüfgeräte unbemerkt eingesetzt werden.

Im **Anhang E** (Überwachung des Einpressens von Zementmörtel in Spannkanäle durch eine dafür anerkannte Überwachungsstelle) sind die Passagen zur Anzeige der Baumaßnahme, Art, Umfang und Häufigkeit der Überprüfungen und Dokumentation der bisherigen DIN 1045-3 gestrichen worden und durch den neuen Absatz (2) „Die Überwachung und die zugehörige Dokumentation haben unter Beachtung der Richtlinie zur Überwachung des Herstellens und Einpressens von Zementmörtel in Spannkanäle des Deutschen Instituts für Bautechnik zu erfolgen“ ersetzt worden.

## 5 Traggerüste und Schalungen

Traggerüste und Schalungen sowie ihre Unterkonstruktionen müssen alle auf sie einwirkenden vorhersehbaren Beanspruchungen des Bauablaufs sicher abtragen können. Obwohl nicht besonders in der neuen DIN 1045-3 erwähnt, sind mit der Anwendung fließfähiger bis selbstverdichtender Betone und höheren Einbaugeschwindigkeiten vor allem bei hohen lotrechten oder geneigten Schalungen der Frischbetondruck und die zulässige Belastung der Schalungsanker besonders zu beachten.

Schalungen müssen ausreichend dicht gegen den Verlust von Feinmörtel und sauber sein. Eventuell sind Reinigungsöffnungen vorzusehen und bereits in die Schalungsplanung einzubeziehen. Stark saugfähige Schalungen müssen evtl. zur Verringerung des Saugens vorbehandelt werden.

Bei Schalungen für Sichtbeton sind besondere Anforderungen an die Schalhaut zu berücksichtigen. Hierzu verweist DIN 1045-3 auf das DBV/VDZ-Merkblatt Sichtbeton [11]. Sichtbetonklasse SB2 und höher führen ebenso wie Sichtbetonanforderungen außerhalb des Merkblatts zur Ausführungsklasse AK-S. Sichtbetonklasse SB1 ist der Ausführungsklasse AK-N zugeordnet.

Gerüste und Schalungen dürfen erst entfernt werden, wenn der Beton eine ausreichende Festigkeit aufweist, um aufgebrachte Lasten aufnehmen zu können, ungewollte Verformungen gering zu halten und eine Beschädigung der Oberflächen, insbesondere Kanten, auszuschließen. Die Norm enthält keine tabellierten Anhaltswerte für Ausschallfristen. Naturgemäß können solche pauschalen Werte weder die tatsächlichen Belastungen im Bauzustand noch die mögliche Belastbarkeit der Bauteile in der Frühphase der Festigkeitsentwicklung des Betons wirklichkeitsnah erfassen. Sollen Ausrüst- oder Ausschallfristen ermittelt werden, so kann dies objektbezogen durch Schaldruckmessungen, Erhärtungsprüfungen oder eine Prüfung der Reife des Betons (mit Temperaturmessungen im Bauteil) unterstützt werden. Das Belassen in der Schalung kann auch

Bestandteil der Nachbehandlung sein, was dann bei der Ausschallfrist berücksichtigt werden muss.

Eine Einstufung in AK-E wird notwendig, wenn Traggerüste der Bemessungsklassen B1 bzw. B2 zum Einsatz kommen oder wenn höhere Ebenheitsforderungen als nach DIN 18202, Tab. 3, Zeile 5 für nichtfertige Wände und Unterseiten von Rohdecken [12] gefordert werden. Für Traggerüste der Bemessungsklassen B1 und B2 ist eine statische Bemessung erforderlich. Traggerüste der Bemessungsklasse A dürfen nur für einfache Konstruktionen verwendet werden, d. h.

- bis 0,3 m<sup>2</sup> Querschnittsfläche je m Breite bei Deckenplatten,
- bis 0,5 m<sup>2</sup> Querschnittsfläche von Trägern,
- bis 6,0 m Spannweite von Decken und Trägern,
- bis 3,5 m Höhe der Bauteilunterseite.

Besondere Anforderungen, z. B. zum Ausrichten, zum planmäßigen Überhöhen oder zur zeitlichen Abfolge der Lastaufbringung können in der Leistungsbeschreibung oder im Betonbaukonzept beschrieben werden (Ausführungsklasse AK-E oder AK-S). Dies gilt auch für besondere Anforderungen an Trennmittel für Schalungen (z. B. an Umwelt- und Nutzungsverträglichkeit). Hingewiesen sei auf Betonbauteile im Kontakt mit Trinkwasser.

DIN 1045-3 [3] enthält weiterhin grundlegende Anforderungen an Einbauteile zur Lagesicherung der Schalung (z. B. Ankerstäbe, Hüllrohre) sowie an konstruktive Einbauteile.

## 6 Bewehren

Die Maße der Betondeckung zum Schutz vor Korrosion, zur Sicherung des Verbunds mit der Bewehrung und der Verhinderung von Abplatzungen des Betons sind in DIN EN 1992-1-1, Abschnitt 4.4.1 [13] festgelegt.

Zur Sicherstellung der Betondeckung  $c_{\min}$  sind auf der Bewehrungszeichnung die Verlegemaße  $c_v$ , welche sich aus den Nennmaßen  $c_{\text{nom}}$  ableiten, und die Vorhaltemaße anzugeben. Das Verlegemaß ergibt sich als größtes Maß aus den Nennmaßen der Betondeckung für Längsstäbe und Querbewehrung (Bügel) sowie aus den erforderlichen Betondeckungen für den Brandschutz nach DIN EN 1992-1-2 [14] und DIN 4102-4 [15]. Das Vorhaltemaß  $\Delta c$  ist die Differenz zwischen dem Nennmaß und dem Mindestmaß. Die vorgegebenen Nenn- bzw. Verlegemaße sind durch geeignete Abstandhalter bzw. Unterstützungen zur Lagesicherung der Bewehrung sicherzustellen. Wird von den Möglichkeiten eines abgeminderten Vorhaltemaßes der Betondeckung nach DIN EN 1992-1-1/NA, Abschnitt 4.4.1.3 [13] Gebrauch gemacht, führt dies zur AK-E.

Bei bewehrten Bauteilen, die unmittelbar gegen unebene Flächen betoniert werden, ist i. d. R. das Verlegemaß der Bewehrung um das Differenzmaß der Unebenheit, jedoch mindestens 20 mm bei Herstellung auf vorbereitetem Baugrund bzw. 50 mm bei unvorbereite-

tem Baugrund zu erhöhen. Solche unebenen Flächen sind z. B. strukturierte Oberflächen, Baugrubenverbau oder weiche Dämmstoffe.

Neben den notwendigen Angaben zu geometrischen Abmessungen und Lage der Bewehrungsstäbe müssen die erforderlichen Betonfestigkeitsklassen und Expositionsklassen in den bautechnischen Unterlagen angegeben sein. Bei Bewehrungslagen mit geringen Abständen zwischen den Stäben, die das Einbringen und Verdichten des Betons behindern können, sind auf den Bewehrungszeichnungen notwendige Rüttelgassen und die Lage von Betonieröffnungen anzugeben. Diese sind bei der Planung der Bewehrungsführung zu berücksichtigen und beim späteren Einbau der Bewehrung zu beachten. Wenn zum sicheren Einbau und Verdichten des Betons Änderungen der geplanten Bewehrungsführung erforderlich werden, sollte möglichst der Tragwerksplaner hinzugezogen werden. Ist die Anordnung von Betonieröffnungen und Rüttelgassen nicht möglich, muss ein Betonbaukonzept vorliegen, was das Einbauverfahren des Betons beschreibt (Ausführungs-klasse AK-E). Für das Betonieren von Bauteilen mit erhöhten Bewehrungsgraden nach DIN 1045-1 [5], mit besonders hohem Gehalt an Einbauteilen, Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung sowie großformatigen Hohlkörpern, muss ein Betonbaukonzept vorliegen, in dem beschrieben ist, welche Maßnahmen in Ausführungsklasse AK-E zu ergreifen sind.

Die Bewehrungsoberfläche muss frei von losem Rost und verbundschädlichen Stoffen sein, wobei „leichter Oberflächenrost“ zulässig ist. DIN 1045-3 definiert diesen Begriff als gleichmäßigen Rostansatz, der noch nicht zur Bildung von mit bloßem Auge erkennbaren Korrosionsnarben geführt hat.

Betonstahl muss entsprechend den bautechnischen Unterlagen geschnitten und gebogen werden. Präzisiert werden Anforderungen an das Hin- und Zurückbiegen der Bewehrung auf der Baustelle. Neben Mindeststahltemperaturen beim Biegen ( $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  bzw.  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) und einer Begrenzung des Stabdurchmessers auf  $\leq 14\text{ mm}$  müssen Mindestbiegerollendurchmesser eingehalten werden:

- $D_{\min} \geq 6 \cdot$  Stabdurchmesser (vorwiegend ruhende Einwirkung),
- $D_{\min} \geq 15 \cdot$  Stabdurchmesser (nicht vorwiegend ruhende Einwirkung).

Unzulässig ist das mehrfache Hin- und Zurückbiegen derselben Stelle. Nach dem Biegen bzw. Richten der Stähle sollten sie einer Sichtprobe unterzogen werden, die zeigt, dass keine Risse oder andere Schäden vorhanden sind. Besondere Schweißverfahren (außerhalb von DIN EN ISO 17660-1 [16]) führen zur AK-S.

Neben dem Bewehren mit Stahl nimmt die aktuelle Fassung der DIN 1045-3 weitere Bewehrungswerkstoffe in Bezug, z. B. Verbundstoffe mit Carbon-, Glas- oder Aramidfasern, deren Eignung für den Verwendungszweck nachzuweisen ist. Die Eignung kann z. B. durch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) bzw. bei Anforderungen an die Ausfüh-

rung durch eine allgemeine Bauartgenehmigung (aBG) erfolgen. Grundlage dafür ist die DAfStb-Richtlinie Nichtmetallische Bewehrung [17].

Auch für feuerverzinkte Betonstähle ist die Eignung für den Verwendungszweck z. B. durch eine abZ oder aBG nachzuweisen. Insbesondere muss die Zinkbeschichtung ausreichend passiv sein, damit keine schädigenden Reaktionen mit Beton erfolgen, z. B. durch

- Tauchen der verzinkten Produkte in Passivierungslösung,
- Freilagerung, i. d. R. etwa 4 Wochen.

Auch die Verwendung eines Betons mit Zement, der keine schädigende Auswirkung auf den Verbund mit verzinkter Bewehrung hat, ist möglich,

## 7 Vorspannen

Vorgaben der DIN 1045-3 [3] zu Herstellung, Einbau und Vorspannung der Spannglieder beziehen sich auf Spannverfahren mit sofortigem oder nachträglichem Verbund sowie auf externe und interne Spannglieder ohne Verbund. Angaben zum Korrosionsschutz der Spannglieder schließen sich an. Vorspannen erfordert die Ausführungsklasse AK-E oder AK-S. Für Spannbetonbauteile im nachträglichen Verbund oder ohne Verbund müssen Spannverfahren eingesetzt werden, für die eine abZ oder eine aBG vorliegt. Auf der Baustelle müssen schriftliche Spannweisungen vorliegen, Spannkraft und Dehnweg sind in einem Spannprotokoll aufzuzeichnen.

## 8 Betonieren und Oberflächenbearbeitung

### 8.1 Überblick

Die Veränderungen, die mit der Neuarbeitung der DIN 1045-3 [3] einhergehen, sind im Bereich der Betonarbeiten wie Annahme, Fördern, Einbringen und Verdichten des Betons eher marginal und beschränken sich oft auf die Zuordnung zu den Ausführungsklassen bzw. BBQ-Klassen. Hier sei in diesem Zusammenhang auch noch einmal auf die Tabelle 2 der DIN 1045-1000 [4] verwiesen. Unabhängig von den dort getroffenen Zuordnungen von Anwendungsfällen zu Planungs-, Beton-, Ausführungs- und BBQ-Klassen werden in der neuen DIN 1045-3 an einzelnen Stellen, zum Teil mit weiteren Erläuterungen versehen, einige Zuordnungen zu den Ausführungsklassen noch einmal aufgegriffen oder ergänzt.

### 8.2 Vorbereitende Arbeiten und Betonannahme

Im Betonbaukonzept oder in den bautechnischen Unterlagen können Probestonagen oder Vorversuche zur Betonage vereinbart sein. Diese sind einerseits rechtzeit-

tig vor Ausführungsbeginn unter Baustellenbedingungen durchzuführen und die Ergebnisse zu dokumentieren. Andererseits führen diese Probestonagen mindestens zur Ausführungsklasse AK-E.

Das Betonieren unmittelbar gegen das Erdreich mit den möglichen Gefahren einer Vermischung von Beton und Erdreich ist präzisiert bzw. erweitert worden. Wird unmittelbar gegen Erdreich oder Kies- bzw. Schottertragschichten usw. betoniert, muss der Frischbeton gegen die Vermischen mit dem Erdreich bzw. dem Material der Tragschicht – beispielsweise durch Folieneinlagen – geschützt werden.

Fahrmischer oder Fahrzeuge mit Rührwerk sollten – wie bislang auch – in der Regel 90 Minuten nach der ersten Wasserzugabe zum Zement vollständig entladen sein. Die Angabe zu Entladezeiten nach der ersten Wasserzugabe zum Zement für Fahrzeuge *ohne* Mischer oder Rührwerk (Beton mit steifer Konsistenz) sind entfallen. Eine reduzierte oder verlängerte Verarbeitbarkeitszeit des Betons infolge von Witterungseinflüssen bzw. der Zusammensetzung des Betons sind bei der Entladezeit weiterhin zu berücksichtigen, aber „Bei Überschreitung der Entladezeit sind die durchgeführten Maßnahmen zu dokumentieren“.

Im Rahmen der Annahmeprüfung auf der Baustelle sind auch die Angaben auf dem Lieferschein zu überprüfen. Der Umfang der Beprobung im Rahmen der Annahmeprüfung regelt der Anhang B der DIN 1045-3 [3], siehe hierzu auch Abschnitt 4.2.

Die Frischbetontemperatur darf im Allgemeinen +30 °C nicht überschreiten, sofern – wie bislang auch – nicht durch geeignete Maßnahmen sichergestellt ist, dass keine nachteiligen Folgen zu erwarten sind. Falls die Frischbetontemperatur planmäßig 30 °C überschreitet, ist der Beton den Beton- und Ausführungsklassen BK-S und AK-S und damit auch BBQ-S zugeordnet.

### 8.3 Fördern, Einbringen, Verdichten

Die Begrenzung der freien Fallhöhe des Betons beim Einbauen ist konkretisiert worden. Im Regelfall ist sie auf etwa 1,5 m zu begrenzen. Dies erfordert sicherlich – zukünftig vermehrt und berechtigt – den häufigeren Einsatz von Einbaurohren oder -schläuchen.

Auch sind Angaben zur Handhabung der Verdichtungsgeräte präzisiert worden. Beim Einbau in Lagen darf das Betonieren nur so lange unterbrochen werden, bis die zuletzt eingebrachte Betonschicht noch nicht erstarrt ist, sodass noch eine gute und gleichmäßige Verbindung zwischen beiden Betonschichten möglich ist. Bei Verwendung von Innenrüttlern *muss* die Rüttelflasche noch in die untere, bereits verdichtete Lage Frischbeton eindringen können.

Es wird nunmehr nicht nur ein Nachverdichten des Betons empfohlen. Um den Beton so einzubringen und zu verdichten, dass er außer den planmäßigen Luftporen keinen nennenswerten Anteil an eingeschlossener Luft enthält, ist ein Nachverdichten des Betons *erforderlich*,

sofern dies nicht mit dem ersten Verdichtungs Vorgang erreicht wurde.

In der neuen DIN 1045-3 werden Empfehlungen für die Wahl der Verdichtungsgeräte vorgenommen: Bei Betonen der Konsistenzklasse F1 erfolgt das Verdichten in der Regel durch Stampfen. Betone der Konsistenzklassen F2 bis F4 sind in der Regel durch Rütteln zu verdichten. Betone der Konsistenzklasse F5 können durch leichtes Rütteln oder durch Stochern verdichtet werden. Für Betone der Konsistenzklasse F6 muss das Betonbaukonzept einen Hinweis enthalten, dass diese nicht durch intensives Rütteln verdichtet werden dürfen, sondern z. B. durch Stochern.

Die Verwendung von Betonen der Konsistenzklasse F5 und F6 führt zur Ausführungsklasse AK-E. Diese Zuordnung steht für den F5-Beton (noch) im Widerspruch zu DIN 1045-1000 [4], Tabelle 2, Zeile 34, wonach Betone der Konsistenzklasse F1 bis F5 als AK-N bzw. auch BBQ-N eingestuft werden.

Leichtbeton, Schwerbeton, Unterwasserbeton und selbstverdichtender Beton, wie auch der maschinelle Einbau von Beton (z. B. durch Deckenfertiger) gehören zur Ausführungsklasse AK-E. Der Einbau von Beton im Gleitbauverfahren zieht die Ausführungsklasse AK-S nach sich. Für das Betonieren solcher Bauteile muss ein Betonbaukonzept vorliegen, in dem die erforderlichen besonderen Verarbeitungstechniken und betontechnologischen Maßnahmen beschrieben sind.

Bei besonderen Förderverfahren, z. B. mittels Pumpen über lange Strecken, bei größeren Höhenunterschieden oder bei geringen Rohrdurchmessern erfolgt eine Einstufung in AK-E. Verbindliche Grenzwerte hierzu sind nicht genannt.

Wenn durch Zugabe von Zusatzmitteln die Verarbeitbarkeitszeit des Betons um mindestens 3 Stunden verlängert wurde (verzögerter Beton), führt dies zur Ausführungsklasse AK-E; bei einer Verarbeitbarkeitszeit von mehr als 12 Stunden zur Ausführungsklasse AK-S. Für den Einbau von Beton mit einer um mindestens 3 Stunden verlängerten Verarbeitbarkeitszeit (verzögerter Beton) muss ein Betonbaukonzept vorliegen, in dem die Maßnahmen für die Verarbeitung und Nachbehandlung beschrieben sind. Auf der Baustelle sind während des Betonierens die Frischbetoneigenschaften (Konsistenz, Temperatur, Bluten, Erhärtungsverlauf und evtl. Rissbildung usw.) in angemessenen Abständen zu kontrollieren.

### 8.4 Nachbehandlung und Schutz des Betons

Junger Beton muss – nach wie vor – zur Sicherstellung einer ausreichenden mechanischen Festigkeit und Dauerhaftigkeit (Dichtheit) in der Betonrandzone nachbehandelt werden. Neben vorgenanntem primärem Ziel sind weitere Schutzziele in der neuen DIN 1045-3 [3] benannt, die darüber hinausgehen und weitergehende, festzulegende Nachbehandlungskonzepte erfordern. Diese Schutzziele sind, neben der „üblichen Nachbehandlung“, in Tabelle 6 beschrieben