

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

Beton-Kalender 2022

**Schwerpunkte: Nachhaltigkeit,
Digitalisierung, Instandhaltung
(2 Teile)**

- der Beton-Kalender hat einen unvermindert hohen Stellenwert in den Planungsbüros in der Bauindustrie und bei Bauproduktenherstellern
- Autoren aus Praxis Normung und Forschung
- topaktuell: Hintergrundinformationen zur Notwendigkeit und den Zielen der DAfStb-Richtlinie „Belastungsversuche an Betonbauwerken“

Der Beton-Kalender 2022 ist solide Arbeitsgrundlage und topaktuelles, verlässliches Nachschlagewerk für die Planung und Nachrechnung von Betonbauwerken. Themenschwerpunkte sind Instandsetzung und Belastungsversuche von Betonbauwerken sowie die Digitalisierung im Bauwesen.

BESTELLEN

+49 (0)30 470 31-236
marketing@ernst-und-sohn.de
www.ernst-und-sohn.de/3344



1 / 2022 · ca. 924 Seiten ·
ca. 501 Abbildungen · ca. 183 Tabellen

Hardcover
ISBN 978-3-433-03344-9 ca. € 184*

Fortsetzungspreis ca. € 154*

eBundle (Print + ePDF)
ISBN 978-3-433-03345-6 ca. € 234*

Fortsetzungspreis eBundle ca. € 194*

Bereits vorbestellbar.

ÜBER DAS BUCH

Der immer tiefgreifendere Einzug der Digitalisierung in allen Phasen des Bauens und die detaillierte Zusammenstellung von Instandsetzungsstrategien für den Hoch- und Ingenieurbau sind die bestimmenden Themen des Beton-Kalender 2022.

In drei eigenständigen Beiträgen erhalten Sie einen umfassenden Überblick zum derzeitigen Regelwerk für den Schutz und die Instandhaltung von Betonbauwerken in Deutschland, Österreich und der Schweiz. In weiteren Beiträgen wird über neue Erhaltungsstrategien für Brücken und Bundesfernstraßen in Deutschland berichtet. Abgerundet wird dieser erste Themenkomplex mit einer kritischen und wegweisenden Diskussion um die Nachhaltigkeit im Betonbau.

Unter dem Schwerpunkt „Digitalisierung“ finden Sie einen umfassenden Überblick zum aktuellen Stand von digitaler Fertigung im Betonbau und den Herausforderungen, welche das digitale Bauen und Planen für Ingenieure bereithalten.

In weiteren Beiträgen wird über die Möglichkeiten des Einsatzes schwacher Künstlicher Intelligenz für ingenieurtechnische Anwendungen und den aktuellen Stand der additiven Fertigung im Betonbau berichtet.

Weitere Beiträge befassen sich mit den Besonderheiten der Tragwerksplanung im Bestand, speziell in Österreich, sowie mit den Möglichkeiten zur Verstärkung von Tragwerken mit Carbonbeton.

Den Abschluss des diesjährigen Kalenders bildet ein Hintergrundbeitrag zur Notwendigkeit und den Zielen der Neufassung der DAfStb-Richtlinie „Belastungsversuche an Betonbauwerken“ sowie der vollständige Abdruck der Richtlinie in der Ausgabe von Juli 2020 im Kapitel „Normen und Regelwerke“.

BESTELLUNG

Anzahl	ISBN /	Titel	Preis
	978-3-433-03344-9	Beton-Kalender 2022	ca. € 184*
		Fortsetzungspreis	ca. € 154*
	978-3-433-03345-6	Beton-Kalender 2022 (eBundle)	ca. € 234*
		Fortsetzungspreis (eBundle)	ca. € 194*

Bitte richten Sie Ihre Bestellung an:
Tel. +49 (0)30 47031-236
Fax +49 (0)30 47031-240
marketing@ernst-und-sohn.de

Privat	Geschäftlich	
Firma, Abteilung	UST-ID Nr.	
Name, Vorname	Telefon	Fax
Straße, Nr.		
PLZ / Ort / Land	E-Mail	
Datum / Unterschrift		

www.ernst-und-sohn.de/3344

Vorwort

Die digitale Transformation hat während der Pandemie Covid-19 eine rasante weltweite Evolution in vielen gesellschaftlichen Bereichen erfahren. Deutlich langsamer entwickeln sich die Grundlagen und vor allem die operative Umsetzung eines ressourceneffizienten und klimaverträglichen Bauens. Der Beton-Kalender 2022 greift diese Themen auf und bringt hochaktuelle Beiträge zur Digitalisierung, zur Nachhaltigkeit und zur Instandhaltung sowie zur Verstärkung von Bauwerken.

Im Teil 1, Kapitel „Beton“, werden von Frank Dehn und Udo Wiens neben aktuellem Wissen aus Forschung, Praxis und Normen auch viele Hinweise zur Herstellung und zur Nachbehandlung von Frischbeton, neue Forschungserkenntnisse zu den lastunabhängigen und lastabhängigen Verformungen sowie zur Dauerhaftigkeit gegeben. Von besonderer Praxisrelevanz sind die einzelnen Abschnitte zum selbstverdichtenden Beton, zum Sicht-, Leicht- und Faserbeton. Kurz werden auch die Themen des Betonrecyclings, der numerischen Simulation von Beton sowie von neuen normativen Entwicklungen angeschnitten. Der regelmäßig wiederkehrende Beitrag wurde auf den neuesten Stand der Technik gebracht und durch aktuelle Forschungsergebnisse und Regelwerksangaben ergänzt. Dies betrifft beispielsweise das System der Betonbauqualitätsklassen (BBQ), den Carbonbeton, Betone unter Verwendung von Geopolymeren und alkalisch-aktivierten Bindemitteln sowie das Konzept der Expositionswiderstandsklassen der nächsten Eurocode-2-Generation.

Ein Schwerpunktthema in diesem Beton-Kalender ist der Schutz und die Instandsetzung von Betonbauteilen.

Der erste Beitrag hierzu wurde von einem Autorenteam mit Heinrich Bastert, Hans-Carsten Kühne, Christoph Dauberschmidt, Stephan Vestner, Hendrik Morgestern, Michael Raupach, Lars Wolff, Bernd Schwamborn, Angelika Eßer und Ingo Schachinger erstellt. Im Hinblick auf den Schutz und die Instandsetzung von Betonbauteilen werden die wichtigsten Regelwerke in **Deutschland** für den allgemeinen Hochbau, den Verkehrswegebau mit beispielsweise den Bundesfernstraßen und den Wasserbauwerken sehr systematisch dargestellt. Dabei ist die Dauerhaftigkeit neben der Bauwerkssicherheit ein wesentliches Kriterium, das bei der Planung und der laufenden Instandhaltung von Bauwerken zu beachten ist. Vielfach wird in Normen und Richtlinien daher die Erstellung eines projektspezifischen Instandhaltungsplans gefordert, der im Zuge der Bauwerksplanung erstellt wird und die Komponenten der Wartung, der Inspektion und der Instandsetzung umfasst. Wertvoll im Beitrag sind die Hinweise zur Bauwerksdiagnose und zur Instandsetzungsplanung bis hin zum kathodischen Korrosionsschutz bei chloridbelasteten Stahlbetonbauteilen. Auch der Abschnitt

der Oberflächenschutzsysteme mit vielen praktischen Beispielen, den Instandsetzungsmörteln bzw. -betonen sowie den Rissfüllstoffen und der Untergrundvorbereitung sind von hoher Praxisrelevanz.

Für **Österreich** wurden von Reinhard Pammer die grundlegenden Regelwerke hinsichtlich des Schutzes und der Instandsetzung von Betonbauteilen zusammengestellt. Neben den Methoden zur Bestandsanalyse und zur Bewertung des Bauwerkszustandes sowie einer Einführung in die ÖNORM B 4704 und die öbv-Richtlinie „Erhaltung und Instandsetzung von Bauten aus Beton und Stahlbeton“ wird auch ein guter Überblick über die verträglichen und gegenüber den am Bauwerk auftretenden Einflüssen widerstandsfähigen Instandhaltungsprodukte gegeben. Wichtig für eine qualitativ hochwertige Instandsetzung sind neben den geeigneten Produkten die sachkundigen Unternehmen und das entsprechend ausgebildete und erfahrene Personal. Dazu werden ergänzend zu den ÖNORMEN EN 1504 noch allgemeine Grundanforderungen angeführt.

Die wesentlichen Richtlinien und die Erfahrungen der Ingenieurpraxis in Bezug auf den Schutz und die Instandsetzung von Betonbauteilen in der **Schweiz** wurden von Raphael List, Yves Schiegg und Björn Mühlen zusammengestellt. In der Schweiz gibt es außer der Normenreihe SN EN 1504 die SIA-269-Reihe, welche speziell für die Erhaltung von Tragwerken erarbeitet wurde. Des Weiteren werden den Planern im Bereich der Instandhaltung und des Schutzes von Betonbauteilen entsprechende Handbücher und Richtlinien des Bundesamtes für Strassen (ASTRA) zur Verfügung gestellt. Eine Besonderheit neben den Injektionsmethoden für Risse und dem Korrosionsschutz der Bewehrung ist der Einsatz von Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) für die Instandsetzung von Betontragwerken. Aufgrund mechanisch sehr hoher Leistungsmerkmale wie beispielsweise der Druckfestigkeit, der Biegezugfestigkeit oder der Dichtigkeit sind Anwendungen von geringen Schichtstärken sowohl zur Instandsetzung als auch zur Tragwerksverstärkung möglich. Der Beitrag zur neuen Erhaltungsstrategie für Brücken der Bundesfernstraßen in Deutschland wurde von Andreas Jackmuth, Wilfried König, Gero Marzahn, Olaf Mertzsch und René Pinnel bearbeitet. Neben einigen statistischen Informationen zur Entwicklung der Brückenflächen der Bundesfernstraßen von 1970 bis 2020 wird festgestellt, dass es über 70 % Spannbetonbrücken und nur etwa 17 % an Stahlbetonbrücken im Bereich der Bundesfernstraßen gibt. Die in naher Zukunft notwendigen Maßnahmen betreffen vor allem die Instandhaltung und Modernisierung des Brückenbestandes. Derzeit werden die Ingenieurbauwerke alle drei Jahre im Wechsel einer Hauptprüfung und nachfolgend einer einfachen Prüfung nach DIN 1076 unterzogen. Im Rahmen der Bauwerksprüfung wird der von außen vi-

suell erkennbare Bauwerkzustand mit einer Zustandsnote versehen. Diese Zustandsnote bewertet weder die Tragfähigkeit noch trifft sie Aussagen über bauzeitbedingte oder normative Defizite. Daher wurde ein Traglastindex eingeführt, welcher in fünf Stufen die Tragfähigkeit einer Brücke klassifiziert. Im Beitrag werden die Erhaltungsstrategien gemäß DIN 1076 beschrieben und auf die Erhaltungsbedarfsprognose dieser Ingenieurbauwerke eingegangen. Es ist das Ziel dieser Strategie, die notwendigen Erhaltungsmaßnahmen anhand der baulichen als auch der verkehrlichen Priorität zu steuern, um den volkswirtschaftlichen Schaden durch Stau, Verkehrsumleitungen und Emissionen etc. zu minimieren.

Von Alfred Strauss, Andreas Pürgstaller, Stefano Pamparin, Panos Spyridis und Konrad Bergmeister wird das aktuell wichtige Thema zur Robustheit von Ingenieurstrukturen erläutert. Die jüngsten Brückeneinstürze in Europa zeigen eindeutig, dass ein Mindestmaß an Robustheit im Entwurf und in der Konstruktion von Bauwerken von evidenter Wichtigkeit sind. Neben diesem Mindestmaß an Robustheit gewinnt die Resilienz zur Wiederherstellung eines Systems in seiner Funktionalität nach einem Schadensereignis an Bedeutung.

Im Rahmen der derzeitigen sechs Robustheitsformate wird zusätzlich als neuer Ansatz die seismische Robustheit für Bauwerke in Erdbebengebieten aufgenommen. Die einzelnen Konzepte werden strukturiert mit Beispielen untermauert dargestellt und es werden praxisrelevante Hinweise gegeben. Gezielt wird auch auf bestehende Strukturen in Bezug auf deren Robustheit eingegangen.

Ein wichtiger Aspekt bei der Robustheitsbewertung von Baustrukturen ist die Identifizierung und Bewertung der Einwirkungsszenarien. Bei der Bewertung der seismischen Robustheit wird eine neue Methode, die sogenannte „vereinfachte Mechanismusmethode – SLAMA-Methode“ (Simple Lateral Mechanismus Analysis) in ihren Grundzügen vorgestellt. Die Schnittgrößen werden als Folge der Verformungen ermittelt (displacement based design). Diese Methode eignet sich für eine relativ schnelle Abschätzung des Gebäudeverhaltens vor und nach einer Ertüchtigungsmaßnahme. Deshalb ist sie sowohl als Abschätzungsmethode für die Implementierung einer mittel- bis langfristigen Strategie zur Reduktion der Erdbebengefährdung als auch zur Bewertung der Robustheit geeignet.

Mit einer strukturierten Vorstellung von Konzepten zur Robustheitsbewertung und -quantifizierung schließt dieses Kapitel ab. Die Robustheitsnachweise können dabei auf der Mikro-, der Meso- oder der Makroebene (gesamte Bauwerke) durchgeführt werden.

Ein interdisziplinäres Autorenteam um Michael Haist, gemeinsam mit Konrad Bergmeister, Manfred Curbach, Patrick Forman, Georgios Gaganelis, Jesko Gerlach, Peter Mark, Jack Moffatt, Christoph Müller, Harald S. Müller, Jochen Reiners, Christoph Scope, Mat-

thias Tietze und Klaus Voit hat sich mit dem nachhaltigen Konstruieren und Bauen mit Beton beschäftigt. Die Autoren haben den aktuellen Stand des Wissens und der Forschung zum Thema des klimaverträglichen und nachhaltigen Bauens mit Beton zusammengestellt. Zusätzlich wird analog zu den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit ein neuer Grenzzustand der Klimaverträglichkeit vorgeschlagen. Dieser beschreibt den äquivalenten CO₂-Einsatz zur Erzielung einer bestimmten Tragfähigkeit und Nutzungsdauer und wird einem aus der Klimaforschung abgeleiteten Grenzwert gegenübergestellt.

Ein großes Augenmerk wird auf den derzeitigen Stand des Wissens zur Nachhaltigkeitsbewertung und Ökobilanzierung gelegt. Dabei wird die Baustoff-, die Bauteil- und die Bauwerksebene unterschieden. Detailliert wird auf die Bindemittel, die Gesteinskörnung (z. B. recycelte aus Tunnelausbruchmaterial) sowie auf die derzeitigen und zukünftig möglichen Arten der Bewehrung (z. B. Carbonbewehrung) und die Ressourceneffizienz sowie auf die Topologieoptimierung umfassend eingegangen. Ein wichtiger Ansatz zur verbesserten Nachhaltigkeit ist auch die Verlängerung der planmäßigen Nutzungsdauer der Bauwerke. Abschließend werden noch einige Leitlinien für ein nachhaltiges Bauen einschließlich notwendiger Änderungen bei der Ausbildung formuliert.

Der zweite Teil beginnt mit einem Beitrag über die digitale Zustandserfassung von Gebäuden und Infrastrukturbauelementen sowie von Naturgefahren, erarbeitet von Konrad Bergmeister, Alfred Strauss und Markus Hoffmann. Die Digitalisierung unter Einsatz moderner Sensorik, der technische Stand von Hochleistungsdrohnen sowie die Möglichkeiten in der Analyse großer Datenmengen mittels intelligenter Algorithmen unter Verwendung von Methoden aus der künstlichen Intelligenz erlauben bereits jetzt eine digitale Zustandserfassung. Die automatisierte Auswertung nach Schadensmerkmalen ist derzeit auch in der Forschung nur teilweise realisiert. Im Beitrag werden strukturiert die aktuellen messtechnischen Möglichkeiten mit unbemannten Luftfahrzeugen – Drohnen (unmanned aircraft vehicle – UAV) – dargestellt, der Einsatz von Fotogrammetrie, Laserscan, Thermografie und Multispektralanalyse für verschiedene Anwendungen praxisrelevant diskutiert und wertvolle Hinweise zum aktuellen Stand der Technik gegeben. Neben den Aufnahmen von Gebäuden werden auch Infrastrukturabschnitte bestehend aus Brücken etc. behandelt und mögliche Einsatzgebiete bei Naturgefahren zur quantitativen und qualitativen Erfassung möglicher Einwirkungen sowie zur Erfassung des visuellen Zustandes der Schutzbauwerke beschrieben. Diese neuen digitalen Erhebungsmethoden gerade zur Früherkennung und zusätzlich – sowie in bestimmten Fällen ersatzweise – zu den bereits vorgeschriebenen periodischen Inspektionen bringen wesentlich detailliertere Aufnahmen mit verbesserter Sichtbarkeit und einer möglichen Optimierung der Lebenszykluskosten.

Mit der künstlichen Intelligenz für ingenieurtechnische Anwendungen sowie den Erkenntnissen aus einer multi-skalen und cross-domänen Analyse von Raumfahrt und Bauwesen beschäftigt sich der Beitrag von Michael A. Kraus, Michael Drass, Bianca Hörsch, Jens Schneider und Walter Kaufmann. Mit einer Zusammenstellung der wichtigsten Terminologien wird in dieses zukünftig auch im Bauwesen wichtige Wissensgebiet eingeführt. Als Kerngebiet wird die digitale Transformation aller Prozesse des Bauens sowie der Zustandserhebung und der Bereitstellung von lebenszyklusbegleitenden Bauwerksinformationen definiert. Auch auf die derzeitige Entwicklung der BIM-Modelle als digitale Grundlage von mehrskaligen Informationssystemen sowie dem digitalen Zwilling von Baustrukturen wird eingegangen. Einen weiteren Innovationsschritt stellt die Robotik mit der digitalen Bauproduktion dar. Als Bindeglied zwischen der digital vernetzten, modellbasierten Planung eines Bauwerks und seiner realen Herstellung wird zukünftig der Einsatz einer digitalen Bauproduktion eine richtungsweisende und produktivitätssteigernde Rolle in der Digitalisierung des Bausektors einnehmen. Die Methoden der künstlichen Intelligenz, wie sie beispielsweise von der ESA vorangetrieben werden, eröffnen auch neue Möglichkeiten für das Bauwesen. Beispielhaft wird der Einsatz der künstlichen Intelligenz im Brückenbau entlang des Lebenszyklus aufgezeigt. Auch die KI-basierte Prognose von Brückenschäden und die Zustandsbewertung auf der Grundlage von sensoriiellen Daten aus Brückenschwingungen mit einem Deep Learning Algorithmus werden beispielhaft angeführt. In einem weiteren Beispiel zur Darstellung der Interaktion von Raumfahrt und Bauwesen wird das Potenzial zur großflächigen Kartierung und Aufnahme der Bodenverformungen beim Bau eines U-Bahn-Tunnels aufgezeigt. Für die großflächige Kartierung und Darstellung der Absenkung der Bodenoberfläche durch einen U-Bahn-Tunnel wurden frei zugängliche Daten des europäischen Copernicus-Programms sowie weiterer Satelliten der ESA verwendet.

Die digitale Fertigung im Betonbau wird von einem weiteren Autorenteam, angeführt von Ksenija Vasilic mit Norman Hack, Harald Kloft, Dirk Lowke, Viktor Mechterine, Venkatesh Naidu Nerella, und Timoty Wangler behandelt. Das Interesse an der digitalen Fertigung mit Beton steigt aktuell stark und die ersten industriellen Anwendungen mit Pilotprojekten finden großes Interesse. In diesem Beitrag haben die Autoren den aktuellen Stand der Entwicklung in den verschiedenen Industriebereichen sowie die bemerkenswerten Beispiele im Bauwesen zusammengestellt. Es werden die verschiedenen Fertigungsverfahren, unterteilt in die auf dem selektiven Binden oder auf Extrusion basierenden Verfahren, die Spritzbetonverfahren und die Gleitschalungsverfahren, beschrieben. Die digitale Fertigung stellt aber auch neue Ansprüche an die Frischbetoneigenschaften. Daher ist eine Kontrolle der Materialeigenschaften während des gesamten

Fertigungsprozesses genauso wichtig wie das Vorhandensein fundierter Kenntnisse über die Rheologie und den Hydrationsprozess des Betons. Auch auf die Möglichkeit des Druckens von Bewehrung wird im Beitrag eingegangen und die technologischen und technischen Herausforderungen sowie noch offene Fragestellungen werden diskutiert.

Die Digitalisierung des Planens und Bauens sowie Ansätze und Ziele werden von Lucio Blandini, Roland Bechmann und Matteo Brunetti behandelt. Die Autoren gehen auf das Building Information Modeling (BIM) ein und zeigen die Möglichkeiten der automatisierten Konsistenzprüfung sowie der digitalen Basis für eine interaktive Planung auf. Über den openBIM Standard können Änderungen offen und dokumentierbar mit weiteren Projektbeteiligten ausgetauscht werden. Die einheitliche 3D-Modellierung der maßgebenden Bauteile erlaubt es, den Planungsprozess bereits von den frühen Planungsphasen an digital umzusetzen. Anhand von zwei Projektbeispielen (neue Bahnsteighalle Stadtbahn-Haltestelle Staatsgalerie in Stuttgart sowie Terminal 2 des Kuwait International Airport) werden die eingesetzten digitalen Werkzeuge entlang der gesamten Wertschöpfungskette beschrieben. Im Beitrag werden die verschiedenen gerade für die Ingenieurspraxis wichtigen Schritte der 3D-Modellierung, der Tragwerksberechnung und der teilweisen Automatisierung durch CNC-Maschinen und Roboter erläutert. Immer wieder zeigt sich in der Praxis, dass trotz des hohen Digitalisierungsgrades immer noch eine große Anzahl an 2D-Plänen auf den Baustellen zu finden sind. Abschließend werden aktuelle Forschungs- und Entwicklungsarbeiten dargestellt (z. B. Gradientenbeton), womit zukünftig eine bessere Qualität und Kostenkontrolle sowie ein reduzierter Ressourcenverbrauch und geringere Emissionen ermöglicht werden sollen. Wichtig wird dabei eine engere Zusammenarbeit zwischen der Forschung, der Industrie, den Planern und den privaten und öffentlichen Entscheidungsträgern, um die enormen Potenziale der digitalen Technologie überhaupt effizient in die Praxis umzusetzen. In einem eigenen Kapitel werden die Verstärkungsmöglichkeiten mit Carbonbeton von den Autoren Manfred Curbach, Sebastian May, Egbert Müller, Alexander Schumann, Elisabeth Schütze und Juliane Wagner behandelt. Auf der Grundlage intensiver Forschungsarbeiten haben die Autoren praxisrelevante Erkenntnisse herausgearbeitet und Verstärkungsmöglichkeiten in Form von dünnen Carbonbetonschichten mit Gelegen, mit Carbonstäben sowie auch mit spritzfähigem Feinbeton aufgezeigt. Für die Herstellung von Neubauteilen werden bevorzugt gießfähige Betonmischungen eingesetzt. Prägnant werden die wesentlichen Merkmale von Carbonbeton mit deren mechanischen Eigenschaften für Kurz- und Dauerbelastung, dem Brand- und Hochtemperaturverhalten sowie die Aspekte zur Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit beschrieben. Die Anwendungsbeispiele mit den Berechnungsgrundlagen bilden wertvolle Unterlagen für die

Ingenieurspraxis. Obwohl sich der Beitrag im Wesentlichen auf die Verstärkung mit Carbonbeton konzentriert, zeigen die Autoren informativ auch einige ausgewählte Projekte, wie beispielsweise das CUBE des C³-Forschungsvorhabens der Technischen Universität Dresden. Dieses Gebäude ist das weltweit erste Haus aus Carbonbeton.

Auf die Tragwerksplanung im Bestand in Österreich gehen Walter Potucek und Markus Vill ein. Die Autoren beschreiben detailliert die Reihe der ÖNORM B 4008 Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Tragwerke für den Hochbau und den Brückenbau. Ausgehend von den Einwirkungen auf Hoch- und Brückenbauten wird auf den rechnerischen Nachweis der Tragfähigkeit von Hochbauten und von Brücken eingegangen. Interessant ist auch die Verifikation mittels Probelastung oder Belastungsversuchen, wenn ein rechnerischer Nachweis der Tragfähigkeit eines Tragwerks nicht möglich ist. Bei einer Probelastung wird die Belastung des Tragwerks stufenweise bis zu einer maximalen Belastung gesteigert, das Tragverhalten der Konstruktion und der Konstruktionsteile messtechnisch und durch Augenschein beobachtet und dokumentiert. Dabei ist zu überprüfen, ob die Verformungen reversibel sind und keine übermäßigen Rissbildungen, Schwingungen oder Verschiebungen auftreten.

Ein weiterer Abschnitt widmet sich dem Mindestwiderstand bestehender Gebäude unter Erdbebeneinwirkung. Abschließend werden noch Hinweise zu Konstruktions- und Berechnungsansätzen älterer Normen für Betonbauwerke sowie zur Entscheidungsfindung von Maßnahmen an Bestandsbauwerken gegeben.

Die neue DAfStb-Richtlinie zu den Belastungsversuchen von Betonbauwerken wird von Steffen Marx, Guido Bolle und Gregor Schacht erläutert. Auf der Basis der abgelösten DAfStb-Richtlinie von 2000 wurden mittlerweile Erfahrungen gesammelt und Erkenntnisse gewonnen. Die Autoren stellen die Grundlagen der Sicherheitstheorie dar, bringen Erkenntnisse zur Identifikation der Versuchsgrenzlast und erklären anhand eines Beispiels, wann ingenieurmäßig sinnvoll reduzierte Übertragungsfaktoren verwendet werden können. Wertvoll ist auch der Überblick über die internationale Praxis und die Normung zu den Belastungsversuchen.

Das Kapitel Normen und Regelwerke hat wiederum Frank Fingerloos mit großer Fachkenntnis zusammengestellt. Aufbauend auf dem Thema der Instandhal-

tung und damit der Verifikation bestehender Bauwerke wird die Richtlinie „Belastungsversuche an Betonbauwerken“ des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton abgedruckt. Die Verzeichnisse der wichtigsten für den Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau relevanten Baunormen und technischen Baubestimmungen werden genauso wie die aktuellen Richtlinien und Hefte des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) und des Deutschen Beton- und Bautechnik-Vereins (DBV) sowie jene der Österreichischen Bautechnik Vereinigung (öbv) dargestellt.

Dieser Beton-Kalender 2022 mit den Themenschwerpunkten Nachhaltigkeit, Digitalisierung und Instandhaltung stellt ein außergewöhnlich aktuelles, wissenschaftlich fundiertes und für die Ingenieurpraxis hervorragendes Nachschlagewerk dar. Erstmals werden zukunftsweisende Themengebiete nicht nur auf Basis aktueller Forschungs- und Praxiserfahrungen aufgezeigt, sondern richtungsweisend innovative Wege und fundierte Vorschläge veröffentlicht.

Diese Beiträge mit Autoren aus Deutschland, Österreich und der Schweiz zeigen aber auch deutlich auf, dass es bisher weder bei Neubauten noch bei der Bewertung und Instandsetzung von Bestandsbauten gelungen ist, zwischen den deutschsprachigen Ländern eine Harmonisierung der Vorschriften und Normen zu erzielen. Jedes Land entwickelt mit großem Aufwand die eigenen Normen, Regelwerke und Vorschriften!

Es muss daher unser aller Anliegen sein, gerade durch die rasante Entwicklung der Digitalisierung und die absolut notwendige Verbesserung der Ressourceneffizienz und Erreichung der Klimaneutralität noch in dieser Generation, der Ingenieurkreativität wieder mehr Freiräume zu geben und die Anzahl der Regeln drastisch auf das Notwendigste zu reduzieren. Auf der Grundlage einer natur- und geisteswissenschaftlich fundierten kontinuierlichen Aus- und Weiterbildung und mit wenigen einheitlichen, europäischen Normen und Vorschriften ohne länderspezifische Anpassungen kann dem zukünftigen klimaverträglichen Bauen eine realistische Zukunft gegeben werden.

Wien,
Berlin,
Darmstadt,
im Juli 2021

Konrad Bergmeister
Frank Fingerloos
Johann-Dietrich Wörner

Inhaltsverzeichnis Teil 1

I Beton 1

Frank Dehn, Udo Wiens

1	Einführung und Definition	5	4.5	Bestimmung der Festigkeit von jungem Beton	55
1.1	Allgemeines	5	5	Lastunabhängige Verformungen	56
1.2	Definition	5	5.1	Allgemeines	56
1.3	Klassifizierung von Beton	7	5.2	Temperaturdehnung	56
1.3.1	Betonarten	7	5.3	Schwinden	57
1.3.2	Betonklassen	7	5.3.1	Ursachen	57
1.3.3	Betonfamilie	9	5.3.2	Mathematische Beschreibung	58
2	Ausgangsstoffe	10	6	Festigkeit und Verformung von Festbeton	60
2.1	Zement	10	6.1	Strukturmerkmale	60
2.1.1	Arten und Zusammensetzung	10	6.2	Druckfestigkeit	60
2.1.2	Bautechnische Eigenschaften	14	6.2.1	Spannungszustand und Bruchverhalten von Beton bei Druckbeanspruchung	60
2.1.3	Bezeichnung, Lieferung und Lagerung	16	6.2.2	Einflüsse auf die Druckfestigkeit	61
2.1.4	Anwendungsbereiche	17	6.2.2.1	Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung	61
2.1.5	Zementhydratation	21	6.2.2.2	Erhärtungsbedingungen und Reife	62
2.1.6	Der Zementstein	21	6.2.2.3	Prüfeinflüsse	65
2.2	Gesteinskörnungen für Beton	24	6.2.3	Festigkeitsklassen	66
2.2.1	Allgemeines	24	6.3	Zugfestigkeit	67
2.2.2	Art und Eigenschaften des Gesteins	24	6.3.1	Bruchverhalten und Bruchenergie	67
2.2.3	Schädliche Bestandteile	26	6.3.2	Einflüsse auf die Zugfestigkeit	68
2.2.4	Kornform und Oberfläche	30	6.3.3	Zentrische Zugfestigkeit	68
2.2.5	Größtkorn und Kornzusammensetzung	30	6.3.4	Biegezugfestigkeit	68
2.3	Betonzusatzmittel	32	6.3.5	Spaltzugfestigkeit	68
2.3.1	Definition	32	6.3.6	Verhältnisswerte für Druck- und Zugfestigkeit	69
2.3.2	Arten von Betonzusatzmitteln	32	6.4	Festigkeit bei mehrachsiger Beanspruchung	70
2.3.3	Anwendungsregeln für Betonzusatzmittel	36	6.5	Spannungs-Dehnungsbeziehungen	70
2.4	Betonzusatzstoffe	36	6.5.1	Elastizitätsmodul und Querdehnzahl	71
2.4.1	Definitionen	36	6.6	Einfluss der Zeit auf Festigkeit und Verformung	72
2.4.2	Inerte Stoffe und Pigmente	37	6.6.1	Die zeitliche Entwicklung von Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul	72
2.4.3	Puzzolanische Stoffe	37	6.6.2	Verhalten bei Dauerstandsbeanspruchung	73
2.4.4	Latent-hydraulische Stoffe	42	6.6.3	Zeitabhängige Verformungen	73
2.4.5	Kunststoffdispersionen	43	6.6.3.1	Definitionen	73
2.4.6	Fasern	43	6.6.3.2	Kriechverhalten von Beton	74
2.5	Zugabewasser	43	6.6.3.3	Vorhersageverfahren	76
3	Frischbeton und Nachbehandlung	44	6.6.4	Verhalten bei dynamischer Beanspruchung	77
3.1	Allgemeine Anforderungen	44	6.6.5	Ermüdung	78
3.2	Mehlkorngehalt	44	7	Dauerhaftigkeit	81
3.3	Rohdichte und Luftgehalt	45	7.1	Überblick über die Umweltbedingungen, Schädigungsmechanismen und Mindestanforderungen	82
3.4	Verarbeitbarkeit und Konsistenz	45			
3.5	Transport und Einbau	47			
3.6	Entmischen	49			
3.7	Nachbehandlung	50			
3.7.1	Nachbehandlungsarten	50			
3.7.2	Dauer der Nachbehandlung	51			
3.7.3	Zusätzliche Schutzmaßnahmen	52			
4	Junger Beton	53			
4.1	Bedeutung und Definition	53			
4.2	Hydratationswärme	53			
4.3	Verformungen	53			
4.4	Dehnfähigkeit und Rissneigung	54			

7.2	Widerstand gegen das Eindringen aggressiver Stoffe	83	11.3	Fasern	127
7.3	Korrosionsschutz der Bewehrung im Beton	89	11.3.1	Stahlfasern	129
7.3.1	Allgemeine Anforderungen	89	11.3.2	Glasfasern	129
7.3.2	Karbonatisierung	90	11.3.3	Organische Fasern	130
7.3.3	Eindringen von Chloriden	92	11.3.3.1	Kunststofffasern (Polymerfasern)	130
7.4	Frostwiderstand und Frost-Taumittel-Widerstand	93	11.3.3.2	Kohlenstofffasern	131
7.5	Widerstand gegen chemische Angriffe	96	11.3.3.3	Fasern natürlicher Herkunft – Zellulosefasern	131
7.6	Verschleißwiderstand	96	11.4	Zusammensetzung	131
7.7	Feuchtigkeitsklassen nach Alkali-Richtlinie	97	11.4.1	Beton	131
8	Selbstverdichtender Beton	97	11.4.2	Fasern	132
8.1	Allgemeines	97	11.5	Eigenschaften	132
8.2	Mischungsentwurf	98	11.5.1	Verhalten bei Druckbeanspruchung	132
8.3	Frischbetonprüfverfahren an Mörtel	99	11.5.2	Verhalten bei Zugbeanspruchung und bei Biegebeanspruchung	133
8.4	Prüfungen am Beton	100	11.5.3	Verhalten bei Querkraft- und Torsionsbeanspruchung	133
8.5	Eigenschaften	102	11.5.4	Verhalten bei Explosions-, Schlag- und Stoßbeanspruchung	134
9	Sichtbeton	103	11.5.5	Kriechen und Schwinden	134
9.1	Einführung	103	11.5.6	Dauerhaftigkeit	134
9.2	Planung und Ausschreibung	103	11.5.7	Frost- und Taumittel-Widerstand	135
9.3	Betonzusammensetzung und Betonherstellung	104	11.5.8	Verhalten bei hoher Temperatur	135
9.4	Einbau und Nachbehandlung	105	11.5.9	Verschleißwiderstand	135
9.4.1	Schalung und Trennmittel	105	11.6	Normen und Grundlagen	136
9.4.2	Ausführung und Nachbehandlung	105	12	Ultrahochfester Beton	136
9.5	Beurteilung	106	13	Carbonbeton	136
9.6	Mängel und Mängelbeseitigung	106	14	Betone unter Verwendung von Geopolymeren und alkalisch-aktivierten Bindemitteln	137
9.6.1	Sichtbetonmängel	106	15	Nachhaltigkeit im Betonbau	139
9.6.2	Mängelbeseitigung bei Sichtbeton	107	15.1	Einführung	139
9.6.3	Architektonisch bedeutsame Bausubstanz	108	15.2	Nachhaltigkeitsbewertung	140
9.7	Sonder-Sichtbetone	108	15.3	Klinkereffiziente Zemente	141
10	Leichtbeton	109	15.4	Ökobetone	141
10.1	Einführung und Überblick	109	15.5	Neue Bindemittel	142
10.2	Konstruktionsleichtbeton nach DIN EN 1992-1-1	110	16	Betonrecycling	143
10.2.1	Grundlegende Eigenschaften	110	16.1	Allgemeines	143
10.2.2	Leichte Gesteinskörnung	110	16.2	Rezyklierte Gesteinskörnungen aus Betonbruch	143
10.2.3	Betonzusammensetzung	112	16.3	Betonbrechsande als Bindemittelkomponente	144
10.2.4	Herstellung, Transport und Verarbeitung	114	16.4	Frischbetonrecycling	145
10.2.5	Festbetonverhalten von Konstruktionsleichtbeton	115	17	Numerische Simulation des Betonverhaltens	145
10.2.6	Zur Planung von Bauwerken aus Konstruktionsleichtbeton	118	18	Normative Entwicklungen und neue Richtlinien	147
10.2.7	Selbstverdichtender Konstruktionsleichtbeton	118	18.1	Die neue Normenreihe DIN 1045 – Weiterentwicklung der Betonbauqualität (BBQ)	147
10.3	Porenbeton	119	18.1.1	Hintergrund	147
10.4	Haufwerksporiger Leichtbeton	120	18.1.2	DAfStb-Richtlinie zur Betonbauqualität	148
11	Faserbeton	121	18.1.3	Zuordnungsbeispiele	149
11.1	Allgemeines	121			
11.2	Zusammenwirken von Fasern und Matrix	122			
11.2.1	Ungerissener Beton	122			
11.2.2	Gerissener Beton	123			

18.1.4	Überführung der BBQ-Richtlinie in eine neue Normenreihe DIN 1045	150	18.2.2	Expositions-Widerstandsklassen	151
18.2	Dauerhaftigkeitskonzept im neuen Eurocode 2 – Expositions-Widerstandsklassen	151	18.3	Neue DAfStb-Richtlinien	153
18.2.1	Allgemeines	151	18.3.1	Umweltverträglichkeit von Beton	153
			18.3.2	Betonausgangsstoffe	156
			19	Literatur	156

II Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen in Deutschland 173

Heinrich Bastert, Hans-Carsten Kühne, Christoph Dauberschmidt, Stephan Vestner, Hendrik Morgenstern, Michael Raupach, Lars Wolff, Bernd Schwamborn, Angelika Eßer, Ingo Schachinger

1	Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen – Aktueller Stand der Regelwerke	177	2.1	Hintergrund der aktuellen Regelwerksituation	185
1.1	Regelungsbereiche und Regelsetzer in Deutschland	177	2.2	Vorgehensweise gemäß deutschen Regelwerken	186
1.1.1	Allgemeiner Hochbau	177	2.3	Prinzip der Darstellungen in den Regelwerken bzw. den Planungs-Hinweisen bzw. -Empfehlungen	187
1.1.2	Bauliche Anlagen der öffentlichen Verkehrsträger	177	2.4	Zusammenfassung	188
1.2	Das öffentliche Baurecht	177	3	Bauwerksdiagnose bei chloridbelasteten Stahlbetonbauteilen – mit einer zielgerichteten Konzeption zu einer erfolgreichen Instandsetzungsplanung	189
1.2.1	Landesbauordnung und Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen	178	3.1	Einleitung	189
1.2.2	Hersteller- und Anwenderverordnung	178	3.2	Chloridbelastung von Stahlbetonbauwerken	190
1.2.2.1	Anforderungen nach HAVO	178	3.2.1	Einleitungsphase	190
1.2.2.2	Nachweise nach HAVO	178	3.2.2	Ansatz des kritischen Chloridgehalts	190
1.2.3	Verordnung über die Überwachung von Tätigkeiten mit Bauprodukten und bei Bauarten	178	3.2.3	Schädigungsphase	192
1.2.4	Qualifikation für die Erbringung von Planungsleistungen	179	3.3	Instandsetzungsprinzipien nach TR IH	192
1.3	Geltende Regelwerke	179	3.4	Methoden der Bauwerksdiagnose für chloridbelastete Bauteile	194
1.3.1	Regelwerke für den allgemeinen Hochbau	179	3.4.1	Inaugenscheinnahme	194
1.3.1.1	Technische Regel Instandhaltung von Betonbauwerken (Stand: Mai 2020)	180	3.4.2	Potentialfeldmessung	194
1.3.1.2	DAfStb-Richtlinie Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (RL SIB von 2001)	180	3.4.3	Betondeckungsmessung	196
1.3.1.3	DAfStb-Richtlinie Instandhaltung von Betonbauteilen (IH-RL, Entwurf)	181	3.4.4	Bestimmung der Elektrolytwiderstände	196
1.3.2	ATV DIN 18349 Betonreparaturarbeiten als Bestandteil der VOB/C	181	3.4.5	Bestimmung von Chloridtieftiefenprofilen	197
1.3.3	Regelwerke für bauliche Anlagen der öffentlichen Verkehrsträger	182	3.4.6	Erstellung von Sondierungsöffnungen	198
1.3.3.1	ZTV-ING	182	3.4.7	Monitoring	198
1.3.3.2	ZTV-W	183	3.5	Prinzip des abgestuften Vorgehens bei der Bauwerksdiagnose	198
1.4	Normen	183	3.6	Bauwerksdiagnose in der Einleitungsphase	200
1.4.1	Baustoffnormen	183	3.6.1	Bestimmung des Abnutzungsvorrates nach TR IH/IH-RL	200
1.4.1.1	Instandsetzungsbaustoffe mit bekannter Zusammensetzung	183	3.6.1.1	Aufgabe des Sachkundigen Planers	200
1.4.1.2	Instandsetzungsbaustoffe mit unbekannter Zusammensetzung	183	3.6.1.2	Nachweisverfahren nach IH-RL für Chloridbelastung	200
1.4.1.3	Normenreihe DIN EN 1504	183	3.6.2	Bauwerksdiagnose bei Verfahren 7.7	204
1.5	Zusammenfassung	185	3.6.3	Bauwerksdiagnose bei Verfahren 7.1	204
2	Regelkonforme Produktauswahl und Nachweise der Verwendbarkeit in Deutschland	185	3.7	Bauwerksdiagnose in der Schädigungsphase	205
			3.7.1	Untersuchungskonzepte bei Anwendung des Verfahrens 7.2 (Entfernen des chloridbelasteten Betons)	205
			3.7.1.1	Ungerissene Bereiche	205
			3.7.1.2	Vorgehen bei chloridbelasteten Rissen	205

3.7.2	Untersuchungskonzeption bei Instandsetzungsverfahren 8.3 (W-CI)	206	6	Übersicht zum Betonerersatz in der stand-sicherheitsrelevanten Instandsetzung	229
3.7.3	Untersuchungskonzept bei Instandsetzungsverfahren 10.1 (Kathodischer Korrosionsschutz)	207	6.1	Einleitung	229
3.8	Zusammenfassung	209	6.2	Planungsgrundlagen für die Instandhaltung	230
4	Sachkundige Planung der Betoninstandsetzung mit dem System von Prinzipien und Verfahren	210	6.3	Zur aktuellen Situation der harmonisierten Produktnormen insbesondere der DIN EN 1504-3:2006	232
4.1	Grundlagen der sachkundigen Instandsetzungsplanung	210	6.4	Instandsetzungsmörtel und -betone – Inhalte der DIN EN 1504-3:2006	233
4.2	Prinzipien nach RL SIB	211	6.4.1	Hinweise zu Betonerersatz nach der DIN EN 1504-3:2006	235
4.2.1	Prinzip R	211	6.4.2	Vergleich PCC-R4 (DIN EN 1504-3) – RM-A4 und RC-A4 (TR IH)	236
4.2.2	Prinzip C	212	6.4.3	PCC-R1, PCC-R2, PCC-R3 DIN EN 1504-3:2005	237
4.2.3	Prinzip K	212	6.4.4	RM-A5 und RC-A5 (TR IH)	237
4.2.4	Prinzip W	213	6.4.5	PC, PRM und PRC (TR IH)	237
4.3	Prinzipien und Verfahren nach TR IH, Teil 1 und DIN EN 1504-9 bzw. ISO 16311-3	213	6.4.6	SRM, SRC nach TR IH	238
4.3.1	Prinzipien und Verfahren bei Schäden im Beton	214	6.5	Verfahren zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit und Genauigkeit der erklärten Leistung	247
4.3.1.1	Prinzip 1 – Schutz gegen das Eindringen von Stoffen	214	6.5.1	Abweichende Regelungen für Betonerersatz nach den Regelwerken der BAST und der BAW	247
4.3.1.2	Prinzip 2 – Regulierung des Wasserhaushaltes des Betons	216	6.6	Zusammenfassung	248
4.3.1.3	Prinzip 3 – Reprofilierung oder Querschnittsergänzung	216	7	Rissfüllstoffe in der Betoninstandsetzung – Hinweise und Praxisbeispiele zur Produktauswahl und Verwendung	249
4.3.1.4	Prinzip 4 – Verstärken des Betontragwerks	217	7.1	Rissfüllstoffe nach aktuellen Regelwerken	249
4.3.1.5	Prinzip 5 – Erhöhung des physikalischen Widerstands	218	7.2	Instandsetzungsprinzipien, Verfahren und Ziele zur Instandsetzung von Rissen	249
4.3.1.6	Prinzip 6 – Erhöhung des Widerstandes gegen chemischen Angriff	219	7.2.1	Instandsetzungsprinzipien zur Instandsetzung von Rissen	249
4.3.2	Prinzipien und Verfahren bei Bewehrungskorrosion	219	7.2.2	Instandsetzungsverfahren zur Instandsetzung von Rissen	250
4.3.2.1	Prinzip 7 – Erhalt oder Wiederherstellung der Passivität	219	7.2.3	Instandsetzungsziele zur Instandsetzung von Rissen	250
4.3.2.2	Prinzip 8 – Erhöhung des elektrischen Widerstandes	221	7.3	Planungsgrundlagen	252
4.3.2.3	Prinzip 9 – Kontrolle kathodischer Bereiche	221	7.3.1	Projektspezifische Auswahlkriterien	252
4.3.2.4	Prinzip 10 – Kathodischer Schutz	221	7.3.2	Feststellung und Bewertung von Riss-/Hohlraummerkmalen	252
4.3.2.5	Prinzip 11 – Kontrolle anodischer Bereiche	222	7.4	Rissfüllstoffe	254
5	Oberflächenschutzsysteme – Hinweise und Praxisbeispiele zur Produktauswahl und Verwendung	222	7.4.1	Anforderungen an Rissfüllstoffe und Systeme	254
5.1	Einleitung	222	7.4.2	Rissfüllstoffe zum kraftschlüssigen Füllen (F)	254
5.2	Kriterien für die Auswahl der relevanten Regelwerke	223	7.4.3	Rissfüllstoffe zum dehnbaren Füllen (D)	256
5.3	TR Instandhaltung (TR IH)	224	7.4.4	Rissfüllstoffe zum Schließen von Rissen und Abdichten	256
5.4	Abwasseranlagen	226	7.4.5	Verwendung von Rissfüllstoffen in Abhängigkeit von Füllzielen, Verfahren, Füllarten, Feuchtezustand und Einwirkungen	256
5.5	Trinkwasseranlagen	227	7.4.6	Übereinstimmungsnachweis	257
5.6	Kühltürme und Schornsteine	227			
5.7	Gewässerschutz – allgemeine und spezielle Zulassungs- und Prüfgrundsätze des DIBt	228			
5.8	Zusammenfassung und Ausblick	229			

7.5	Typische Verwendungsbeispiele für die Praxis 260	8.2.8	Nachbearbeitung von Betonoberflächen im Anschluss an mechanische Abtragsverfahren 268
7.5.1	Verwendungsbeispiel zum Schließen von Rissen 260	8.3	Betonabtrag 269
7.5.2	Verwendungsbeispiel Abdichten von Rissen 260	8.3.1	Im Handlanzeinsatz 269
7.5.3	Verwendungsbeispiel kraftschlüssiges Verbinden 260	8.3.2	Automatisiert mit Abtragsrahmen und Kleinrobotern 270
7.5.4	Verwendungsbeispiel dehnbares Verbinden 260	8.3.3	Automatisiert mit Großrobotern 270
7.6	Überwachung auf der Baustelle 262	8.3.4	Nacharbeiten 271
7.7	Zusammenfassung 263	8.3.4.1	Abtrag der Strahlschatten 271
8	Ausführung – Untergrundvorbereitung und Betonabtrag mittels Hochdruckwasserstrahlen (kurz: HDWS) 263	8.3.4.2	Grobreinigung 271
8.1	Allgemeines 263	8.3.4.3	Feinreinigung 272
8.1.1	Wirkungsweise des Hochdruckwasserstrahls auf den Betonuntergrund 263	8.4	Arbeits- und Lärmschutz 272
8.1.2	Vorzüge des Hochdruckwasserstrahlens bei der Instandsetzung von Betonbauteilen 264	8.4.1	Arbeitsschutz Baustellen- und Bedienpersonal 272
8.2	Untergrundvorbereitung mittels HDWS 265	8.4.2	Lärmschutz Bedienpersonal und Umgebung 272
8.2.1	Allgemeines 265	8.5	Umweltschutz und Entsorgung 273
8.2.2	Reinigen von Oberflächen 266	8.5.1	Aufbereitung des Strahlwassers 273
8.2.3	Entfernen von Anstrichen und Beschichtungen (OS-Systeme) 266	8.5.2	Entwässerung Betonschlamm 274
8.2.4	Entfernen der Zementhaut und Öffnen von Poren und Lunkern 266	8.5.3	Betonabbruch 274
8.2.5	Abtrag von mineralischen und/oder kunststoffmodifizierten Schichten 266	9	Instandhaltungsplan für Betonbauwerke 274
8.2.6	Dekontamination von Oberflächen und Abtrag von schadstoffhaltigen Beschichtungen 267	9.1	Begriffe und Definitionen 274
8.2.7	Aufrauen von Betonoberflächen 268	9.1.1	Normen und Regelwerke 274
		9.1.2	Begriffsdefinitionen 275
		9.1.3	Forderung der Instandhaltung in Vorschriften und Regelwerken 275
		9.2	Grundsätze für die Instandhaltungsplanung von Betonbauwerken 275
		9.3	Inspektion 277
		9.4	Wartung 278
		9.5	Bauwerksbuch 278
		9.6	Zusammenfassung 279
		10	Literatur 279
III	Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen in Österreich 287		
	Reinhard Pamminer		
1	Einleitung 289	3.2.2	Ist-Zustandserhebung (Bauwerksprüfung) 292
2	Grundlegende Regelwerke hinsichtlich des Schutzes und der Instandsetzung von Betonbauteilen in Österreich 289	3.2.2.1	Organoleptische Prüfung des Bauwerkszustands 292
2.1	Anwendungsbereich und Gliederung der öbv-Richtlinie „Erhaltung und Instandsetzung von Bauten aus Beton und Stahlbeton“ und der ÖNORM B 4706 – „Instandsetzung von Betonbauwerken“ 290	3.2.2.2	Zerstörungsfreie Prüfverfahren 292
		3.2.2.3	Bauteilgefügestörende Prüfverfahren 295
		3.2.3	Dokumentation der Bauwerksprüfungen 298
3	Festlegungen hinsichtlich der Bewertung des Bauwerkszustands/Bestandsanalyse 290	3.2.4	Bewertung der Ist-Zustandserhebung/ Bewertung des Bauwerkszustands 298
3.1	Qualifikation der Prüfer/ Gutachter/Planer 290	4	Grundsätze der Instandsetzung in Österreich 300
3.2	Durchführung der Bestandsanalyse 291	4.1	Beurteilung der Korrosionsgefahr 300
3.2.1	Sichtung und Bewertung der Bestandsunterlagen 291	4.1.1	Korrosionsgefährdung durch karbonatisierten Beton 300
		4.1.2	Korrosionsgefährdung durch chloridkontaminierten Beton 301

4.1.3	Beeinträchtigung von Anstrichen oder Beschichtungen durch Chloridkontamination im (unbewehrten) Betonuntergrund	303	4.3.1.8	Oberflächenschutz	314
4.2	Anwendung der Schutzprinzipien in Österreich	303	4.3.1.9	Risse und Hohlräume	314
4.2.1	Wiederherstellen des aktiven Korrosionsschutzes der Bewehrung durch einen hydraulisch gebundenen Mörtel ausreichender Dicke und Dichte – Aktiver Korrosionsschutz	304	4.3.1.10	Umbau, Teilerneuerung, Verstärkung	315
4.2.1.1	Karbonatisierungsbedingte Bewehrungskorrosion	304	5	Instandsetzungsprodukte	315
4.2.1.2	Chloridinduzierte Bewehrungskorrosion	304	5.1	Eignungs- und Gütenachweise für Instandsetzungsprodukte	316
4.2.2	Sicherstellung des aktiven Korrosionsschutzes der Bewehrung durch einen hydraulisch gebundenen Mörtel ausreichender Dicke und Dichte oder durch einen Oberflächenschutz – Passiver Korrosionsschutz	305	5.1.1	CE-Kennzeichnung, Leistungs-erklärung, wPk	316
4.2.3	Wiederherstellen des aktiven Korrosionsschutzes der Bewehrung, wenn die ausreichende Betonüberdeckung mit einem Mörtel nicht hergestellt werden kann	306	5.1.2	Typprüfung	317
4.3	Instandsetzungskonzept	306	5.1.3	Einbauprüfung	317
4.3.1	Untergrundvorbereitung, Freilegen und Reinigen der Bewehrung, Korrosionsschutz	306	5.1.4	Gütezeichenprüfung (GP) und Regelprüfung (RP)	317
4.3.1.1	Untergrundvorbereitung	306	5.1.5	öbv-Gütezeichen für Instandsetzungsprodukte	317
4.3.1.2	Freilegen und Reinigen der Bewehrung	307	5.2	Anforderungen an die Instandsetzungsprodukte	317
4.3.1.3	Korrosionsschutz	309	5.2.1	Oberflächenschutzsystem (OFS)	318
4.3.1.4	Feuchtezustand Untergrundbeton und Haftbrücke	310	5.2.1.1	Hydrophobierung	318
4.3.1.5	Reprofilieren der Ausbruchstellen	311	5.2.1.2	Imprägnierung	318
4.3.1.6	(Punktueller) Erhöhung der Betonüberdeckung	311	5.2.1.3	Anstrich und Beschichtung	319
4.3.1.7	Nacharbeiten, Nachbehandlung	314	5.2.2	Instandsetzungsmörtel	320
			5.2.3	Korrosionsschutz	321
			6	Instandsetzungsarbeiten	321
			6.1	Anforderungen an die Instandsetzungsfachbetriebe	321
			6.1.1	öbv-Gütezeichen für Instandsetzungsfachbetriebe	322
			6.2	Überwachung der Instandsetzungsarbeiten	322
			6.2.1	Prüfungen bei der Anwendung	322
			6.2.2	Eigenüberwachung während der Instandsetzungsarbeiten	322
			6.2.3	Fremdüberwachung der Instandsetzungsarbeiten	322
			7	Literatur	323

IV Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen in der Schweiz 325

Raphael List, Yves Schiegg, Björn Mühlhan

1	Schweizer Normen und Regelwerke	327	4	Injektionen an Betonbauteilen und Rissanierung	338
1.1	Regeln der Baukunde	327	4.1	Normative Bestimmungen	338
1.2	Übersicht Regelwerke Schweiz	327	4.2	Praxis Schweiz	338
1.3	Norm SIA 469: Erhaltung von Bauwerken	328	5	Korrosionsschutz der Bewehrung	338
1.4	Norm SIA 269	328	5.1	Normative Bestimmungen	338
1.5	Normenwerk SN EN 1504	332	5.2	Kathodischer Korrosionsschutz (KKS) und dessen Anwendung in der Schweiz	338
2	Oberflächenschutzsysteme für Beton	333	6	Ultra-Hochleistungs-Faserbeton – eine steigende Tendenz	340
2.1	Normative Bestimmungen	333	7	Erhaltungsplanung der Nationalstraßen	340
2.2	Praxis Schweiz	334	7.1	ASTRA	340
3	Statisch und nicht statisch relevante Instandsetzung	335	7.2	Prozess Erhaltungsplanung	340
3.1	Normative Bestimmungen	335			
3.2	Praxis Schweiz – konventionelle Instandsetzung	336			

- | | | | | | |
|-----|---|-----|-----|--------------------------|-----|
| 7.3 | Beispiel: Erhaltungsprojekt A4
Küssnacht-Brunnen | 341 | 8.2 | Anwendung in der Schweiz | 343 |
| 8 | Qualitätssicherung | 342 | 9 | Trend und Entwicklung | 344 |
| 8.1 | Normative Bestimmungen | 342 | 10 | Literatur | 345 |

V Die neue Erhaltungsstrategie für Brücken der Bundesfernstraßen 347

Andreas Jackmuth, Wilfried König, Gero Marzahn, Olaf Mertzsch, René Pinnel

- | | | | | | |
|-------|---|-----|-------|--|-----|
| 1 | Einleitung | 349 | 4.4.3 | Kombinierte Strategien | 361 |
| 2 | Brückenbestand der Bundesfernstraßen | 349 | 4.5 | Berücksichtigung der Brücken-
modernisierung | 362 |
| 3 | Erhalt und Modernisierung
von Brücken | 351 | 4.6 | Berücksichtigung exponierter
Bauwerke | 362 |
| 3.1 | Grundlagen und Systematik der
Bauwerkserhaltung | 351 | 5 | Anwendung der neuen Strategie | 363 |
| 3.2 | Erhaltungsmanagement im konstruktiven
Ingenieurbau | 352 | 5.1 | Erhaltungsbedarfsprognose | 363 |
| 3.3 | Brückenmodernisierung als Teil der
Erhaltung | 354 | 5.1.1 | Objektbezogene Bestandsdaten | 364 |
| 3.4 | Exponierte Bauwerke in der
Bauwerkserhaltung | 355 | 5.1.2 | Standarderhaltungsstrategie | 364 |
| 4 | Erhaltungsstrategie für Bauwerke
der Bundesfernstraßen | 355 | 5.1.3 | Schadensentwicklung | 364 |
| 4.1 | Erhaltungsziele | 355 | 5.1.4 | Baukostenfunktion | 364 |
| 4.1.1 | Zielkriterium „Verkehrssicherheit“ | 355 | 5.2 | Maßnahmenempfehlungen | 365 |
| 4.1.2 | Zielkriterium „Bauwerkszustand
und Tragfähigkeit“ | 357 | 5.3 | Investitionsprogramme | 365 |
| 4.1.3 | Zielkriterium „Wirtschaftlichkeit“ | 358 | 6 | Entwicklung eines Programmsystems
zur Erhaltungsbedarfsprognose
von Ingenieurbauwerken | 365 |
| 4.1.4 | Zielkriterium „Verfügbarkeit“ | 358 | 6.1 | Beispielrechnung 1: Reaktive Erhaltens-
strategie mit kontrollierter Schadens-
entwicklung und kontrollierter Alterung
in der zweiten Nutzungsphase | 367 |
| 4.2 | Leitsätze | 359 | 6.2 | Beispielrechnung 2: Präventive Erhaltens-
strategie mit kontrollierter Schadens-
entwicklung und kontrollierter Alterung in
der zweiten Nutzungsphase | 369 |
| 4.3 | Kennzahlen | 359 | 7 | Zusammenfassung und Ausblick | 372 |
| 4.4 | Erhaltungsstrategien | 359 | 8 | Literatur | 373 |
| 4.4.1 | Erhaltungsstrategie mit kontrollierter
Schadensentwicklung | 359 | | | |
| 4.4.2 | Erhaltungsstrategie mit regelmäßigen
Intervallen | 360 | | | |

VI Robustheit von Ingenieurstrukturen 375

Alfred Strauss, Andreas Pürgstaller, Stefano Pampanin, Panos Spyridis, Konrad Bergmeister

- | | | | | | |
|-----|---|-----|-------|---|-----|
| 1 | Was ist Robustheit? | 377 | 3.1 | Allgemeines | 389 |
| 1.1 | Allgemeines | 377 | 3.2 | Bekannte Ereignisse mit zufälliger
Eintrittswahrscheinlichkeit | 389 |
| 1.2 | Extremereignisse im Bauwesen | 377 | 3.3 | Unbekannte Ereignisse | 390 |
| 1.3 | Resilienz – eine Systembetrachtung | 378 | 3.3.1 | Fiktive Schadensszenarien | 390 |
| 2 | Entwurf und Konstruktion | 378 | 3.3.2 | Ausfall von tragenden Bauteilen | 390 |
| 2.1 | Allgemeines | 378 | 3.3.3 | Verschlechterungsszenarien
an Tragsystemen | 390 |
| 2.2 | Konstruktive Robustheit –
Schlüsselemente | 384 | 3.3.4 | Lasten für fiktive Schadensszenarien | 390 |
| 2.3 | Schadensbasierte Robustheit | 385 | 4 | Bewertungsmethoden zur Ermittlung
der Robustheit | 391 |
| 2.4 | Risikobasierte Robustheit | 386 | 4.1 | Allgemeines | 391 |
| 2.5 | Tragstrukturanalyse für eine konstruktive
Robustheit | 386 | 4.2 | Lastpfadstrategie | 391 |
| 2.6 | Robustheit bei redundanten Systemen | 388 | 4.3 | Folgenreduktions-Strategie | 392 |
| 2.7 | Robustheit bestehender Strukturen | 388 | 4.4 | Ereignissteuerungsstrategie | 392 |
| 3 | Einwirkungsszenarien | 389 | | | |

4.5	Quantifizierung der Einwirkungen und des Widerstands: Methode der Schlüsselemente	392	6.5.1	Einführung	399
5	Quantifizierung der Robustheit	392	6.5.2	Übersicht über das Verfahren	400
5.1	Allgemeines	392	6.5.3	Kapazitätsmodelle	401
5.2	Quantifizierungsarten	393	6.5.4	Hierarchie der Beanspruchbarkeiten	402
5.2.1	Deterministische Quantifizierung	393	6.5.5	Globale Kapazität	403
5.2.2	Schadensbasierte Quantifizierung	394	6.5.6	Kapazität versus Einwirkung	405
5.2.3	Risikobasierte Quantifizierung	394	6.6	Ableiten von Ertüchtigungsmaßnahmen – Robustheits- und Redundanzsteigerungen	405
5.2.4	Redundanzindexbasierte Quantifizierung	395	6.7	Zusammenfassung	409
5.2.5	Empfehlungen	395	7	Konzeptionelle Robustheitsbewertung und Robustheitsquantifizierung	410
6	Konzepte zur seismischen Robustheit	396	7.1	Konzeptionelle Robustheitsmaßnahmen	410
6.1	Kapazitätsbemessung	397	7.1.1	Empfehlungen und Richtlinien	410
6.2	Reduktion des seismischen Risikos	397	7.1.2	Ablauf der Robustheitsbewertung	410
6.3	Paradigmenwechsel: weg von einer reinen Kollapsvermeidung hin zu einer verhaltensbasierten Bemessung	398	7.1.3	Mikroebene	410
6.4	Numerische Berechnungsmethoden	399	7.1.4	Mesoebene	410
6.5	Vereinfachte Mechanismusmethode (SLaMA)	399	7.1.5	Makroebene	414
			7.2	Zusammenfassung	414
			8	Literatur	415

VII Nachhaltig konstruieren und bauen mit Beton 421

Michael Haist, Konrad Bergmeister, Manfred Curbach, Patrick Forman, Georgios Gaganelis, Jesko Gerlach, Peter Mark, Jack Moffatt, Christoph Müller, Harald S. Müller, Jochen Reiners, Christoph Scope, Matthias Tietze, Klaus Voit

1	Einführung	424	4.2.3.3	Optimierung der Kornverteilungskurve des Korngemischs	458
2	Anforderungen an das Bauen von Morgen	426	4.2.3.4	Berechnung der Packungsdichte des Korngemischs	458
2.1	Ausgangssituation	426	4.2.3.5	Berechnung der Mischungszusammensetzung	460
2.2	Zielszenario	427	4.2.4	Eigenschaften ökologisch optimierter Betone	460
3	Nachhaltigkeitsbewertung	427	4.2.4.1	Frischbetoneigenschaften	461
3.1	Ökobilanzierung von Baustoffen und Bauwerken	428	4.2.4.2	Mechanische Eigenschaften	466
3.2	Nachhaltigkeitszertifizierungssysteme	431	4.2.4.3	Dauerhaftigkeit	469
3.3	Umweltverträglichkeit	433	4.2.4.4	Umweltwirkungen	474
4	Nachhaltigkeit auf der Baustoffebene	434	4.3	Bewehrung	476
4.1	Einführung	434	4.3.1	Einführung	476
4.2	Beton	435	4.3.2	Betonstahl	476
4.2.1	Grundsätze zur Herstellung umwelt- und ressourceneffizienter Betone	435	4.3.3	Carbonfasern für Carbonbeton	479
4.2.2	Betonausgangsstoffe und deren Verfügbarkeit	437	4.3.3.1	Herstellprozess Carbonfasern	479
4.2.2.1	Bindemittel und Betonzusatzstoffe	440	4.3.3.2	Carbonbewehrung und deren Herstellung	480
4.2.2.2	Gesteinskörnungen	446	4.3.3.3	Ökobilanzielle Betrachtung des Herstellprozesses von Carbonfasern	480
4.2.2.3	Betonzusatzmittel	456	4.3.3.4	Ökobilanzielle Betrachtungen anderer relevanter Prozesse und Materialien für die Herstellung von carbonbasierten Bewehrungen	481
4.2.3	Mischungsentwicklung umwelt- und ressourceneffizienter Betone	456	4.3.3.5	Einordnung und Vorteilhaftigkeit der Carbonbewehrung	481
4.2.3.1	Prinzipielles Vorgehen	457	4.3.4	Sonstige alternative Bewehrungssysteme	482
4.2.3.2	Experimentelle Bestimmung der Packungsdichte der einzelnen Ausgangsstoffe	458			

4.4	Einflüsse aus Herstellung, Transport und Einbau des Betons	483	6.1	Grundlagen	501
5	Nachhaltigkeit auf der Bauteil- und Bauwerksebene	485	6.2	Klimaverträglichkeit auf der Baustoffebene	501
5.1	Einführung	485	6.3	Grenzzustand der Klimaverträglichkeit auf der Bauteilebene	502
5.2	Optimierungsgestütztes Entwerfen und Bemessen	487	6.3.1	Grundlegendes Nachweisformat	502
5.2.1	Topologische Optimierung	488	6.3.2	Eingangsgrößen des Bemessungsansatzes	505
5.2.2	Materialgerechte Steuerung	489	6.3.2.1	Planmäßige Nutzungsdauer und rechnerische Lebensdauer	505
5.2.3	Innere Bewehrungsfindung	490	6.3.2.2	Umweltwirkungen $GWP_{eco,BM}$ und $GWP_{ref,BM}$	507
5.2.4	Hohlkörper in Platten und Wänden	491	6.3.2.3	Grenzzustand α_{GWP}	508
5.3	Aspekte der Herstellung und Bauverfahren	492	6.3.3	Anwendungsbeispiel	509
5.4	Bauteile aus Carbonbeton	492	6.4	Grenzzustand der Klimaverträglichkeit auf Tragwerks- bzw. Bauwerksebene	514
5.4.1	Einführung in die Carbonbetonbauweise	492	7	Konsequenzen	515
5.4.2	Abgrenzung Carbonbeton zu Stahl- und Faserbetonen	493	7.1	Konsequenzen für das Bauen	515
5.4.3	Regulatorischer Druck	494	7.2	Konsequenzen für die Ausbildung von Studierenden und PraktikerInnen	516
5.4.4	Ausgewählte Fallstudienresultate für Carbonbeton	495	7.2.1	GeologInnen und MineralogInnen	516
5.4.5	Carbonbeton als kreislauffähiges Material	498	7.2.2	Baustoff- und BetontechnologInnen	516
5.5	Gesetzliche und normative Regelungen	499	7.2.3	BauingenieurInnen	517
6	Bemessung im Grenzzustand der Klimaverträglichkeit	501	8	Danksagung	517
			9	Literatur	518

Inhaltsverzeichnis Teil 2

VIII Digitale Zustandserfassung von Gebäuden, Infrastrukturbauwerken und Naturgefahren 533

Konrad Bergmeister, Alfred Strauss, Markus Hoffmann

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 1 Einleitung 535 2 Aktueller Stand der Technik 536 <ul style="list-style-type: none"> 2.1 Schallemissionsverfahren 536 2.2 Impuls-Echo 537 2.3 Radar 537 2.4 Georadar 538 2.5 Infrarot-Verfahren 540 2.6 Elektromagnetische Verfahren 540 2.7 Laserscan 541 2.8 LiDAR 541 2.9 Infrarotkamera 541 2.10 Hyperspektralkamera 543 2.11 Sensoren für Drohnen 545 2.12 Sensoren für die Navigation 545 2.13 Digitale Bilderfassung mit Drohnen und Sensoren 546 2.14 Radarinterferometrie 550 2.15 Übersicht über digitale Zustandserfassungsmethoden und Sensoren mittels Drohnen 551 2.16 Digitale Zustandserfassungsmethoden für Bauwerke und Naturgefahren 554 2.17 Automatisierte Schadensdetektion 555 3 Datenmanagement bei der digitalen Zustandserhebung 556 <ul style="list-style-type: none"> 3.1 Einführung 556 3.2 Datenformate 558 3.3 Digitale Erfassung mit Drohnen 559 <ul style="list-style-type: none"> 3.3.1 Erfassung 559 3.3.2 Flugplanung 559 3.3.3 Fotogrammetrische Erfassung 561 3.3.4 Laserscanning 561 3.3.5 Weitere Erfassungsmethoden 562 3.4 Prozessierung der Daten 563 3.5 Visualisierung der Ergebnisse 563 3.6 Datenauswertung und Aufbereitung 567 | <ul style="list-style-type: none"> 3.7 Georeferenzierung 570 3.8 Tiles, Clipping und Layering 570 3.9 Punktwolke, Tin, Mesh, 3D-Objekte, Textur 571 3.10 Filterung, Editierung und Visualisierung 571 3.11 Datenbankkonzept 572 3.12 Lebenszyklus-Management auf digitaler Basis 573 4 Beispiele einer digitalen Zustandserfassung von Bauwerken 575 <ul style="list-style-type: none"> 4.1 Konzeption einer Zustandserfassung 575 4.2 Bestandserfassung eines Gebäudes 576 4.3 Digitale Zustandserfassung einer Bogenbrücke 580 4.4 Datenauswertung am Beispiel von Schutzbauwerken 584 4.5 Zustandsanalyse mit digitalen, mobilen Methoden 588 5 Digitale Zustandserfassung von Naturgefahren 592 <ul style="list-style-type: none"> 5.1 Einleitung 592 5.2 Konzeption einer Zustandserfassung 593 5.3 Einsatzplanung und Sicherheitsvorkehrung am Beispiel einer Mure 594 5.4 Einsatzplanung und Sicherheitsvorkehrungen bei Schneemächtigkeitserfassungen und Lawinensprengung 595 5.5 Datenauswertung UAS 596 <ul style="list-style-type: none"> 5.5.1 Schüttmuren 596 5.5.2 Schneezustandserfassung 599 5.6 Empfehlungen 603 6 Zusammenfassung und Ausblick 604 7 Literatur 604 |
|---|---|

IX Künstliche Intelligenz – multiskale und cross-domäne Synergien von Raumfahrt und Bauwesen 607

Michael A. Kraus, Michael Drass, Bianca Hörsch, Jens Schneider, Walter Kaufmann

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> 1 Einleitung und Motivation 614 2 Digitale Transformation als Voraussetzung für den Einsatz von künstlicher Intelligenz – Status quo und aktuelle Trends in der Raumfahrt und dem Bauwesen 615 <ul style="list-style-type: none"> 2.1 Allgemeines 615 2.2 Building Information Modeling (BIM) 615 <ul style="list-style-type: none"> 2.2.1 Definitionen und Hintergrund 615 2.2.2 Industry Foundation Class (IFC) 617 | <ul style="list-style-type: none"> 2.2.3 Level of Development, Detail, Geometry, Information, Information Need 617 2.2.4 Vergleich von Product Lifecycle Management und BIM 619 2.3 Digitaler Zwilling/Digital Twin 620 <ul style="list-style-type: none"> 2.3.1 Überblick und Definitionen 620 2.3.2 Wechselbeziehung der BIM- und Digitaler-Zwilling-Technologie 620 2.4 Internet der Dinge/Internet of Things (IoT) und Bauen/Construction 4.0 620 |
|--|--|

2.5	Digitale Bauproduktion, Automatisierung und Robotik	622	4.5.5	Telekommunikationsdaten	649
3	Künstliche Intelligenz – Einführung und Grundlagen	624	4.6	Digitale Zwillinge in der Raumfahrt	650
3.1	Allgemeine KI-Methodik aus der Raumfahrt	624	4.6.1	Konzeption aus der Raumfahrt	650
3.2	Wahrnehmung und Lernen/Perception und Learning	625	4.6.2	Digitaler Zwilling „Weltraum-Mission“ in der Entwicklungsphase	651
3.2.1	Allgemeines	625	4.6.3	Digitaler Zwilling „Erde“	653
3.2.2	Grundlagen zu KI-Algorithmen, Modellen und Daten	625	5	Anwendungsbeispiele zum Einsatz von künstlicher Intelligenz bei Brücken	654
3.2.3	Maschinelles Lernen/Machine Learning	630	5.1	Hintergrundinformationen zu Lebenszyklusphasen von Brücken	654
3.2.4	Tiefes Lernen/Deep Learning	634	5.2	Lebenszyklusphase „Entwurf“	655
3.2.5	Prädiktion und Vorhersage/Prediction and Forecasting	636	5.2.1	Konzeptionelle Idee	655
3.2.6	Textanalyse/Text Mining	636	5.2.2	KI-FEM-Hybride zur Analyse und Bemessung von Stahlbetonstrukturen	656
3.2.7	Sprachverarbeitung/Natural Language Processing	637	5.2.3	Pareto-optimales generatives Design für Stahlbetonbrücken	659
3.3	Wissensrepräsentation und Schlussfolgerung/ Knowledge Representation and Reasoning	637	5.3	Lebenszyklusphase „Konstruktion“	663
3.3.1	Hintergrund zur Wissensrepräsentation	637	5.4	Lebenszyklusphasen „Betrieb und Instandhaltung“	666
3.3.2	Wissensmodellierung/Knowledge Engineering	637	5.4.1	Lebenszykluskosten einer baulichen Anlage	666
3.3.3	Erklärbare künstliche Intelligenz/ Explainable Artificial Intelligence	638	5.4.2	Beispiel – Deep Learning zur Schadensdetektion von Bahnbrücken	666
3.3.4	Planung und Terminierung/Planning and Scheduling	638	6	Zusammenfassung, Synopse und Epilog	670
4	Status quo und Zukunftsagenda von künstlicher Intelligenz in der Raumfahrt	639	6.1	Allgemeine Hinweise	670
4.1	KI-Strategie der Europäischen Weltraumorganisation	639	6.2	Zusammenfassung	670
4.2	Design und Planung	639	6.3	Synopse und Resümee	671
4.2.1	System Engineering	639	6.3.1	Allgemeines	671
4.2.2	Design von Satelliten und Nutzlast-/ Daten-Optimierung	640	6.3.2	Synopse von Raumfahrt und Bauwesen bezüglich des Austauschs von Daten	671
4.2.3	Führung, Navigation und Kontrolle	641	6.3.3	Synopse von Raumfahrt und Bauwesen bezüglich der digitalen Transformation und künstlichen Intelligenz	674
4.2.4	Entwurf operativer Konzepte	643	6.3.4	Implikationen für die Forschung in Architektur und Bauwesen	677
4.3	Bau, Integration und Verifikation	643	6.3.5	Implikationen für die Praxis in Architektur und Bauwesen	679
4.3.1	Entwicklung und Bau	643	6.3.6	Implikationen für die Ausbildung, Lehre und Weiterbildung	679
4.3.2	Zuverlässigkeit und Sicherheit	644	6.4	Ausblick und allgemeine Trends der künstlichen Intelligenz	680
4.4	Operationelle Phase und Betrieb	644	6.4.1	Gartner Hype-Cycle zu emergenten Technologien	680
4.4.1	Allgemeines	644	6.4.2	Erklärbare KI	680
4.4.2	Anomalien im Betrieb	644	6.4.3	Demokratisierung von KI	681
4.4.3	Missionsplanung und Optimierung	645	6.4.4	Automatisierte KI	681
4.4.4	Automatisierter Missionsbetrieb	645	6.4.5	KI-Sprachmodelle	682
4.4.5	Autonomie von Missionen	645	6.4.6	Augmentierte Intelligenz durch KI	682
4.5	Datenauswertung	647	6.5	Epilog der Autoren	682
4.5.1	Allgemeine Informationen	647	7	Danksagung	683
4.5.2	Erdbeobachtungsdaten	647	8	Literatur	683
4.5.3	Weltraumwissenschaftliche Daten	647			
4.5.4	Navigationswissenschaftliche Daten	648			

X Digitale Fertigung im Betonbau 691

Ksenija Vasilic, Norman Hack, Harald Kloft, Dirk Lowke, Viktor Mechtcherine, Venkatesh Naidu Nerella, Timothy Wangler

- | | | | | | |
|-----|---|-----|-----|---|-----|
| 1 | Einleitung | 693 | 5.1 | Betone für den 3D-Druck – neue Anforderungen | 704 |
| 2 | Digitale Fertigung – Allgemeines | 693 | 5.2 | Kontrolle der Materialeigenschaften (Rheologie) | 706 |
| 3 | Digitale Fertigung in der Architektur- und der Bauindustrie | 694 | 5.3 | Kontrolle der Materialeigenschaften (Hydratation etc.) | 708 |
| 3.1 | Historischer Überblick | 694 | 6 | Integration von Bewehrung | 709 |
| 3.2 | Potenziale der digitalen Fertigung für das Bauwesen | 696 | 6.1 | Statisch-konstruktive Anforderungen und prozessspezifische Funktionen | 709 |
| 3.3 | Klassifizierung | 696 | 6.2 | Repräsentative Bewehrungsstrategien | 710 |
| 4 | Digitale Fertigungsverfahren im Betonbau | 698 | 6.3 | Bewehrungsintegration als automatisierter Prozessschritt | 712 |
| 4.1 | Auf Extrusion basierende Fertigungsverfahren | 698 | 7 | Industrielle Implementierung der additiven Fertigung im Bauwesen | 715 |
| 4.2 | Partikelbett-3D-Drucken | 699 | 8 | Herausforderungen und Perspektiven | 718 |
| 4.3 | Spritzbetonverfahren | 701 | 9 | Schlussfolgerungen und Ausblick | 718 |
| 4.4 | Digital Casting | 702 | 10 | Literatur | 719 |
| 5 | Materialaspekte | 704 | | | |

XI Die Digitalisierung des Planens und Bauens – Ansätze und Ziele 725

Lucio Blandini, Roland Bechmann, Matteo Brunetti

- | | | | | | |
|-------|---|-----|-------|---|-----|
| 1 | Einleitung | 727 | 4.4 | Engineering | 743 |
| 2 | Die BIM-Methode: Einfluss beim Planen und Bauen | 727 | 4.4.1 | Allgemeines | 743 |
| 3 | Das Bahnprojekt Stuttgart 21 | 731 | 4.4.2 | Vorgespannte Bogenträger | 744 |
| 3.1 | Projektbeschreibung und Tragwerk | 731 | 4.4.3 | Schalentragwerk | 744 |
| 3.2 | Prozesse und Engineering | 733 | 4.4.4 | Einbauteile | 747 |
| 3.2.1 | Genehmigungsplanung | 733 | 4.5 | Fertigung | 748 |
| 3.2.2 | Ausführungsplanung | 734 | 5 | Forschung und Entwicklung | 751 |
| 3.3 | Fertigung | 736 | 5.1 | Gradientenbeton | 751 |
| 4 | Kuwait International Airport, Terminal 2 | 737 | 5.2 | Digital gestützte Fertigungsmethoden | 753 |
| 4.1 | Das Projekt – Struktur und Kontext | 737 | 5.3 | Adaptivität | 755 |
| 4.2 | Tragwerksbeschreibung | 738 | 5.4 | Prozessoptimierung durch digitale Werkzeuge | 756 |
| 4.3 | Prozesse | 740 | 5.5 | Kreislaufwirtschaft und Emissionsvermeidung | 757 |
| 4.3.1 | Allgemeines | 740 | 6 | Zusammenfassung und Ausblick | 758 |
| 4.3.2 | BIM-Modell | 741 | 7 | Danksagung | 758 |
| 4.3.3 | Berechnungsmodell | 742 | 8 | Literatur | 759 |

XII Verstärken mit Carbonbeton 761

Manfred Curbach, Sebastian May, Egbert Müller, Alexander Schumann, Elisabeth Schütze, Juliane Wagner

- | | | | | | |
|-------|-------------------------------|-----|---------|------------------------------------|-----|
| 1 | Allgemeines/Einführung | 763 | 1.2.3.1 | Dauerhaftigkeit | 765 |
| 1.1 | Motivation für diesen Beitrag | 763 | 1.2.3.2 | Dauerstandfestigkeit | 765 |
| 1.2 | Eigenschaften von Carbonbeton | 764 | 1.2.3.3 | Ermüdungsfestigkeit | 766 |
| 1.2.1 | Zugtragverhalten | 764 | 1.2.4 | Brand- und Hochtemperaturverhalten | 766 |
| 1.2.2 | Verbundverhalten | 764 | 1.3 | Nachhaltigkeit | 767 |
| 1.2.3 | Langzeitverhalten | 765 | | | |

2	Verstärkung	767	2.3.4	Längskraft	781
2.1	Einführung	767	2.3.4.1	Modellvorstellung für textilbetonverstärkte Stützen	781
2.2	Vorteile, Verfahrensschritte und Anwendungspotenziale von Carbonbeton in der Verstärkung	768	2.3.4.2	Hinweise zur Längskraftverstärkung	782
2.2.1	Verfahrensschritte bei der Verstärkung oder Sanierung	769	2.4	Regelwerke	782
2.2.2	Carbonbeton im Denkmalschutzbereich	770	2.4.1	abZ/aBG	783
2.2.2.1	Hochbau	770	2.4.2	ZiE/vBG	785
2.2.2.2	Brückenbau	771	2.4.3	Zukünftiges	785
2.2.2.3	Instandsetzung von Fahrbahndecken und -platten	772	2.5	Ausgeführte Projekte	787
2.2.2.4	Sonstige Anwendungsbereiche	772	2.5.1	Instandsetzung der Hyparschale Magdeburg	787
2.3	Berechnungsgrundlagen	773	2.5.2	Verstärkung des Beyer-Baus der TU Dresden	789
2.3.1	Biegung	773	2.5.3	Verstärkung der Brücken über die Nidda im Zuge der BAB A 648	791
2.3.1.1	Allgemeines	773	2.5.4	Verstärkung der Brücke Donauwörth	793
2.3.1.2	Herleitung des Berechnungsansatzes	774	2.5.5	Verstärkung einer Plattenbrücke in Kleinsaubernitz	793
2.3.1.3	Versagensmechanismen und weitere Bemessungsschritte	776	3	Neubau	794
2.3.2	Querkraft	777	3.1	CUBE	794
2.3.2.1	Allgemeines	777	3.2	S111	795
2.3.2.2	Berechnungsmodelle	778	3.3	Carport	796
2.3.3	Torsion	779	3.4	Brückenprojekte	796
2.3.3.1	Berechnungsmodell	779	3.5	Fassaden	797
2.3.3.2	Hinweise zur Verstärkung von torsionsbeanspruchten Bauteilen	780	4	Literatur	798

XIII Tragwerksplanung im Bestand in Österreich 805 Walter Potucek, Markus Vill

1	Einleitung	807	4.3.2.1	Mindestabmessungen und Mindestbewehrungen	812
2	Grundsätze	808	4.3.2.2	Mindestgüten von Werkstoffen	812
2.1	Allgemeines	808	4.3.2.3	Konstruktive Regeln	812
2.2	Anwendungsbereich	808	4.3.2.4	Baustoffe und deren Eigenschaften	812
2.3	Vertrauensgrundsatz	808	4.3.2.5	Nachweise für heute nicht mehr übliche Bauverfahren	812
2.4	Bestandserhebung bei Hochbauten	809	4.3.2.6	Nachweise der Gebrauchstauglichkeit	813
2.5	Zustandsbewertung bei Brücken	809	4.4	Nachrechnung mit reduzierter Zuverlässigkeit	813
2.6	Klassifizierung von Bauwerken	809	4.4.1	Allgemeines	813
3	Einwirkungen	810	4.4.2	Außergewöhnliche Beanspruchungen	813
3.1	Allgemeines	810	4.4.3	Erdbeben	814
3.2	Nutzlasten von Hochbauten	810	4.5	Rechnerischer Nachweis der Tragfähigkeit nach Normen, die bei der Errichtung des Bauwerks gültig waren	814
3.3	Verkehrslasten von Brücken	810	5	Rechnerischer Nachweis der Tragfähigkeit von Brücken	814
3.4	Außergewöhnliche Einwirkungen und Erdbeben	811	5.1	Allgemeines	814
4	Rechnerischer Nachweis der Tragfähigkeit von Hochbauten	811	5.2	Rechnerischer Nachweis der Tragfähigkeit	814
4.1	Allgemeines	811	5.3	Berechnung nach dem letztgültigen Normenstand	815
4.2	Nachrechnung nach aktuellem Normenstand	811	5.3.1	Nachrechnung nach Stufe 1	815
4.3	Zulässige Abweichungen vom aktuellen Normenstand	811			
4.3.1	Allgemeines	811			
4.3.2	Konstruktive Regeln und Regeln für die Ausführung	812			

5.3.2	Nachrechnung nach Stufe 2	815	8	Zustandsaufnahme bestehender Bauwerke	819
5.3.2.1	Allgemeines	815	9	Mindestwiderstand bestehender Gebäude gegen Erdbeben	820
5.3.2.2	Ermüdungsnachweise	816	9.1	Beanspruchungen infolge Erdbeben	820
5.3.2.3	Verkehrslasten	816	9.2	Widerstand bestehender Gebäude gegen Erdbebenbeanspruchungen	821
5.3.2.4	Außergewöhnliche Einwirkungen, Erdbeben	816	10	Hinweise zu Konstruktions- und Berechnungsansätzen älterer Normen für Betonbauwerke	824
5.3.3	Nachrechnung nach Stufe 3	816	11	Ergänzende Festlegungen zu baulichen Maßnahmen an Brücken	824
5.3.4	Bewertung nach Stufe 4	817	11.1	Entscheidungsfindung für geplante bauliche Maßnahmen	824
6	Qualitative Bewertung der Tragfähigkeit	818	11.1.1	Instandsetzungsmaßnahmen	825
6.1	Qualitative Bewertung von Hochbauten	818	11.1.2	Ertüchtigungsmaßnahmen	826
6.2	Qualitative Bewertung von Brücken	818	12	Zusammenfassung	826
7	Experimentelle Tragfähigkeitsbewertung am Bauwerk	818	13	Literatur	827
7.1	Bewertung von Tragwerken im Hochbau	818			
7.2	Bewertung von Brücken	819			
XIV	Erläuterungen zur Richtlinie Belastungsversuche	829			
	Steffen Marx, Guido Bolle, Gregor Schacht				
1	Vorbemerkungen	831	3.4	Versuchsdurchführung und Bewertung vor Ort	842
2	Normative Grundlagen und Einordnung in den Planungsprozess	831	3.5	Versuchsgrenzlastkriterien	843
2.1	Normative Grundlagen	831	3.6	Versuchsauswertung und -bericht	844
2.2	Einordnung in die Bestandsbewertung	832	4	Internationaler Stand der Technik	845
2.3	Anwendungsbereich der Richtlinie für Belastungsversuche	833	4.1	Vorbemerkungen	845
3	Erläuterungen zur neuen Richtlinie „Belastungsversuche an Betonbauwerken“	834	4.2	Großbritannien	845
3.1	Begriffe und Versuchsarten	834	4.3	United States of America	845
3.2	Sicherheitskonzept	835	4.4	Weitere Staaten	846
3.2.1	Allgemeines	835	4.5	Vergleich und Diskussion	847
3.2.2	Neues Konzept zur Bestimmung von Übertragungsbeiwerten	836	5	Beispielberechnungen	848
3.2.3	Ableitung von Übertragungsbeiwerten bei kleiner Grundgesamtheit	837	5.1	Aufgabenstellung	848
3.2.4	Festlegung der Übertragungsbeiwerte in der Richtlinie	838	5.2	Orientierende Berechnungen zur Abschätzung des Tragverhaltens	848
3.3	Versuchsplanung	840	5.3	Beispielberechnungen zum Sicherheitskonzept	850
XV	Normen und Regelwerke	855	6	Schlussbetrachtungen	851
	Frank Fingerloos		7	Literatur	852
1	Einleitung	857	2.3	Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E. V. (DBV): Merkblätter, Sachstandberichte und Hefte	879
2	Listen und Verzeichnisse	857	2.4	Österreichische Bautechnik Vereinigung (ÖBV): Richtlinien, Merkblätter und Sachstandberichte	881
2.1	Technische Baubestimmungen für den Beton- und Stahlbetonbau	857			
2.2	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. (DAfStb): Richtlinien und Hefte	876			

3	DAfStb-Richtlinie Belastungsversuche an Betonbauwerken	883	7.3.2	Versuchslasten	887
Inhalt	883		7.3.2.1	Tragsicherheitsbewertung (Versuchsart A)	887
Vorbemerkung	883		7.3.2.2	Systemmessung (Versuchsart B)	888
Änderungen gegenüber der Ausgabe „September 2000“	883		7.3.2.3	Tragfähigkeitsermittlung (Versuchsart C)	889
1	Anwendungsbereich	883	7.4	Messtechnik	889
2	Normative Verweisungen und ergänzende Regelwerke	884	7.5	Versuchsprogramm	889
3	Begriffe	884	8	Durchführung und Bewertung	889
4	Fachliche und technische Voraussetzungen	884	8.1	Allgemeines	889
5	Versuchsarten	885	8.2	Belastung	889
6	Voruntersuchungen	885	8.2.1	Lasterzeugung und -anordnung	889
6.1	Grundsätzliches	885	8.2.2	Belastungsfolge	889
6.2	Tragsystem, Geometrieparameter und Baustoffkennwerte	885	8.3	Messtechnik	890
6.3	Beurteilung des Erhaltungszustandes	886	8.4	Versuchsgrenzkriterien	890
6.4	Beurteilung des Tragverhaltens vor Versuchsdurchführung	886	8.5	Protokoll	892
7	Versuchsplanung	886	9	Auswertung	892
7.1	Allgemeines	886	9.1	Allgemeines	892
7.2	Zuverlässigkeitskonzept	886	9.2	Experimentelle Tragsicherheitsbewertung (Versuchsart A)	892
7.3	Ermittlung der Versuchslasten	887	9.3	Systemmessungen (Versuchsart B)	892
7.3.1	Lastanordnung	887	9.4	Experimentelle Tragfähigkeitsermittlung (Versuchsart C)	892
			9.5	Untersuchungsbericht	892
			Anhang A – Tabellen für die Bestimmung der Übertragungsfaktoren $\gamma_{\text{ÜR}}$ bei anderen Variationskoeffizienten (normativ) 893		
			4	Literatur	895

Stichwortverzeichnis	897
----------------------	-----

bei auf einer detaillierten Erläuterung der Bedeutung der einzelnen Kennwerte einer Ökobilanz, die es Planerinnen und Planern ermöglichen soll, die von Baustofflieferanten bereitgestellten Ökobilanzdaten einer Plausibilitätsprüfung zu unterziehen.

3.1 Ökobilanzierung von Baustoffen und Bauwerken

Methoden der Ökobilanzierung

Eine Ökobilanz ist die Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges [3.1]. Ökobilanzen von Bauprodukten werden aktuell insbesondere in Umweltproduktdeklarationen (engl. Environmental Product Declaration, EPD) veröffentlicht. Die unabhängige Verifizierung dieser EPDs soll die Glaubwürdigkeit der EPD-Daten erhöhen und dafür sorgen, dass robuste Eingangsdaten für Ökobilanzen auf Bauteil- und Bauwerksebene zur Verfügung stehen.

Grundsätzlich wird bei Ökobilanzen zwischen der „zuordnenden“ und der „indirekten“ Modellierung unterschieden:

- Das Prinzip der „zuordnenden“ Ökobilanzierung (attributional LCA) wird auch als „buchhalterisch“, „retrospektiv“ oder „beschreibend“ bezeichnet. Es nutzt historische, faktenbasierte, messbare Daten mit bekannten Unsicherheiten, und schließt alle Prozesse ein, für die festgestellt wurde, dass sie einen relevanten Beitrag zum untersuchten System leisten.
- Das Prinzip der „indirekten“ Ökobilanzierung (consequential LCA) wird auch als „veränderungsorientiert“ bezeichnet. Ziel ist es, die Konsequenzen zu identifizieren, die eine Entscheidung im betrachteten System für andere Prozesse und Systeme der Wirtschaft hat. Das konsequente Lebenszyklusmodell spiegelt daher nicht eine tatsächliche (oder prognostizierte) spezifische oder durchschnittliche Lieferkette wider, sondern es wird eine hypothetische generische Lieferkette modelliert, die anhand von Marktmechanismen prognostiziert wird und gegebenenfalls auch politische Interaktionen und Änderungen des Verbraucherverhaltens umfasst [3.2].

Üblicherweise wird für Ökobilanzen, die in Umweltproduktdeklarationen veröffentlicht werden, die zuordnende Ökobilanzierung verwendet, da diese klaren Regeln folgt, während bei der indirekten Ökobilanz sehr viel Spielraum für den Ersteller bleibt. Auch die europäischen Normen für die ökobilanzielle Bewertung von Bauprodukten, die in den letzten Jahren entwickelt worden sind, basieren auf der zuordnenden Ökobilanzierung. Die Einführung dieser Normen hat in hohem Maße zur Vereinheitlichung von Ökobilanzen im Baubereich und zur Transparenz hinsichtlich der Datenqualität beigetragen. Zu nennen ist hier insbesondere die horizontale Norm

- DIN EN 15804 [3.3] Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln

für die Produktkategorie Bauprodukte in ihrer aktuellen Fassung vom März 2020.

Die europäischen Normungsgremien für Bauprodukte sind aufgefordert, die Interpretation der baustoffübergreifenden Regeln der DIN EN 15804 [3.3] für ihre jeweiligen Produkte in weiteren Normen festzulegen. Die Methodik für die Ökobilanzierung von Zement und Beton ist den beiden Normen

- DIN EN 16757:2017-10 [3.4] Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Produktkategorieregeln für Beton und Betonelemente
- DIN EN 16908:2017-05 [3.5] Zement und Baukalk – Umweltproduktdeklarationen – Produktkategorieregeln in Ergänzung zu EN 15804 [3.6]

geregelt.

Folgende wichtige Regeln zur Ökobilanzierung von Bauprodukten in Umweltproduktdeklarationen wurden in den o. g. Normen festgelegt:

- Ein Vergleich von Ökobilanzen kann nicht auf der Produktebene stattfinden, sondern nur auf Grundlage quantifizierter funktionaler und technischer Anforderungen an einem Bauwerk oder an einem Bauteil.
- Umweltauswirkungen von Bauprodukten und Bauwerken sind modular anzugeben und der jeweiligen Lebenszyklusphase zuzuordnen, in der sie auftreten (Modularitätsprinzip).
- Abfallverarbeitungsprozesse sind dem Produktsystem zuzuordnen, das den Abfall erzeugt hat, bis das Ende der Abfalleigenschaft erreicht ist (Verursacherprinzip). Dieses Prinzip beeinflusst die ökobilanzielle Bewertung der Abfallverbrennung in Zementwerken, aber auch z. B. die Frage, welche Aufbereitungsprozesse von rezyklierter Gesteinskörnung in Ökobilanzen von Beton auszuweisen sind.

Darüber hinaus enthalten die Normen

- Anforderungen an die technologische, geografische und zeitbezogene Repräsentativität der Hintergrunddaten von Ökobilanzen;
- Regeln zur Allokation bei der gemeinsamen Herstellung mehrerer Produkte, also zur Frage, nach welchem Schlüssel die Umweltwirkungen von Koppelprozessen, also Prozessen, bei denen mehrere Produkte hergestellt werden, auf diese Produkte zu verteilen sind. Bei der Beton- und Zementherstellung betrifft dies z. B. die ökobilanzielle Bewertung von Hüttensand, Silikastaub oder Kraftwerksnebenprodukten wie Flugaschen und REA-Gips. Üblicherweise wird für diese Produkte eine ökonomische Allokation durchgeführt. Bei der ökonomischen Allokation dient das Verhältnis des wirtschaftlichen Ertrags, der mit dem Vertrieb der Produkte eines Koppelprozesses erzielt werden kann, zur Festlegung des Schlüssels, nach dem die Umweltwirkungen auf diese Produkte zu verteilen sind. Für das Beispiel Steinkohleflugasche wird also der Erlös, den ein Steinkohlekraftwerk mit dem Vertrieb von Flugasche erzielt, zu dem Erlös aus dem Vertrieb von Elektrizität am Energiemarkt und ggf. dem Erlös aus wei-

teren Nebenprodukten ins Verhältnis gesetzt und die Umweltwirkungen des Kraftwerks entsprechend aufteilt.

Mit sogenannten „Systemgrenzen“ wird in Ökobilanzen festgelegt, welche mit dem zu untersuchenden Produkt verbundenen Prozesse in die Bewertung einbezogen werden. Auch hierzu machen die o. g. Normen Vorgaben:

- In Umweltproduktdeklarationen für Zement werden i. d. R. sogenannte „Cradle to gate“-Ökobilanzen veröffentlicht. Hierbei umfassen die Systemgrenzen alle Prozesse der Produktherstellung, beginnend mit dem Abbau von Ressourcen und endend mit der Bereitstellung des fertigen Produkts am Werkort des Herstellers. Hierin einbezogen werden z. B. die Entnahme von Rohstoffen und fossilen Energieträgern, die Transporte von Roh- und Brennstoffen zum Zementwerk, allozierte Umweltwirkungen verwendeter Koppelprodukte anderer Industrien (z. B. Hüttsand, s. o.), bei der Klinkerherzeugung entstehende Emissionen am Ofen, die Erzeugung der verwendeten Elektrizität für z. B. Mahlprozesse und ggf. die Verpackung des Zements [3.5].
- In Umweltproduktdeklarationen für Beton sind nach der zuletzt veröffentlichten Version der EN 15804 [3.6] neben der Produktionsphase auch die zu erwartenden Umweltwirkungen am „Lebensende“ des jeweiligen Bauwerks, also für Abbruch, Wiederaufbereitung/Recycling und ggf. die Entsorgung auszuweisen. Bei der Wiederverwendung von gebrochenem Beton können entsprechende Gutschriften für die Substitution natürlicher Gesteinskörnung geltend gemacht werden. Die CO_2 -Aufnahme durch die Karbonatisierung des Betons während und nach der Nutzung kann als negatives Treibhauspotenzial (als Treibhauspotenzial werden die Folgen einer Freisetzung bestimmter Stoffe für die globale Erwärmung bezeichnet; international hat man sich zur Messung des Treibhauspotenzials auf freigesetzte Menge des Gases CO_2 geeinigt) ausgedrückt werden [3.4].

Mit der Norm EN 15804+A2 [3.6] wurden die zu bewertenden Umweltindikatoren und die zugehörigen Berechnungsmethoden an die Indikatoren des Product Environmental Footprint (PEF), eines Bewertungssystems der Umweltwirkungen für Produkte aus allen Bereichen, das von der Europäischen Kommission entwickelt wurde, angeglichen. Neben den seit vielen Jahren gängigen Indikatoren wie Treibhauspotenzial (Global Warming Potential) GWP, Versauerungspotenzial (Acidification Potential) AP und Eutrophierungspotenzial EP werden damit z. B. auch Indikatoren zur toxischen Wirkung von Bauprodukten auf die menschliche Gesundheit oder Ökosysteme bewertet (s. Tabelle 1).

Gewichtung von Indikatoren

In Ökobilanzen nach EN 15804+A2 [3.3] und EN 15978 [3.7] werden die Umweltwirkungen von Baupro-

dukten und Bauwerken mit über 20 Indikatoren bewertet. Die Vielzahl der Indikatoren erschwert häufig im direkten Vergleich eine Gesamtaussage hinsichtlich der „besseren“ oder „schlechteren“ Ökobilanz. Hieraus kann der Wunsch nach einer Aggregation dieser Indikatoren zu einem einzelnen Gesamtwert erwachsen. Für eine solche Aggregation sind zwei Schritte erforderlich [3.8]:

- Normierung:

Die Normierung ist der Schritt, bei dem die Ökobilanzergebnisse mit Normierungsfaktoren multipliziert werden, um die Größe ihrer Beiträge zu den Umweltwirkungskategorien relativ zu einer Bezugseinheit zu berechnen und zu vergleichen. Hierbei wird z. B. berücksichtigt, wie groß der Beitrag einer Emission zur entsprechenden Gesamtemission in der betrachteten Region ist. Als Ergebnis erhält man dimensionslose, normierte Ergebnisse. Diese spiegeln die Belastungen wider, die einem Produkt relativ zur Bezugseinheit zuzuordnen sind.

- Gewichtung:

Bei einer Gewichtung werden die normierten Ergebnisse mit Gewichtungsfaktoren (in %) multipliziert, die die empfundene relative Bedeutung der betrachteten Lebenszyklus-Auswirkungskategorien widerspiegeln. Die gewichteten Ergebnisse der verschiedenen Wirkungskategorien können dann aggregiert werden, um eine Gesamtbewertung zu erhalten.

Normierungs- und Gewichtungsfaktoren werden z. B. im „Product Environmental Footprint (PEF)“ [3.9] vorgegeben. Berechnet man mit den PEF-Faktoren einen dimensionslosen Gesamtwert für einen Portlandzement [3.10], so zeigt sich, dass dieser vor allem durch die Indikatoren „Treibhauspotenzial“ und „Nutzung fossiler Ressourcen“ beeinflusst wird (Tabelle 1).

Bei der „Methode der ökologischen Knappheit“ werden Emissionen und Ressourcenverbrauch mittels Ökofaktoren gewichtet. Diese Ökofaktoren berechnen sich aus dem Verhältnis der aktuellen Emissions- und Verbrauchswerte in einer Region zu Toleranzwerten, die sich aus rechtlich oder politisch verankerten Umweltqualitätszielen ergeben. Je mehr die tolerierte Emissions- oder Rohstoffmenge überschritten wird, desto stärker wird die Belastung gewichtet. Die jeweiligen Ökofaktoren werden in Umweltbelastungspunkten (UBP) pro Mengeneinheit ausgedrückt. Die Methode der ökologischen Knappheit wird daher auch als UBP-Methode bezeichnet. Für jede berücksichtigte Emission oder Ressource ergibt sich nach Multiplikation mit der ermittelten Menge eine Anzahl UBP. Die Umweltbelastungspunkte aus allen berücksichtigten Emissionen und Ressourcen werden schließlich zu einer Gesamtpunktzahl addiert. Bei der Umsetzung der Methodik in der Schweiz werden beispielsweise der Emission eines Kilogramms CO_2 460 Umweltbelastungspunkte zugeordnet, der Emission eines Kilogramms Schwefeldioxid 21000 Umweltbelastungspunkte und dem Abbau eines Kilogramms Kies 30 Umweltbelastungspunkte [3.11]. Für andere Län-

Tabelle 1. Normierung und Gewichtung von Umweltindikatoren gemäß Product Environmental Footprint PEF für einen Portlandzement CEM I [3.9, 3.10]

	Normierungsfaktor [–]	Gewichtungsfaktor [%]	Wert für CEM I; CEMBUREAU	Einheit	normiert	gewichtet	Anteil an aggregiertem Wert [%]
Klimawandel (GWP)	$5,35 \cdot 10^{13}$	21,06	803	kg CO _{2,e}	$1,50 \cdot 10^{-11}$	$3,16 \cdot 10^{-12}$	39
Ozonabbau (ODP)	$1,61 \cdot 10^8$	6,31	$1,80 \cdot 10^{-7}$	kg R11 _e	$1,12 \cdot 10^{-15}$	$7,05 \cdot 10^{-17}$	0
Humantoxizität, Krebs (HTP-c)	$2,66 \cdot 10^5$	2,13	$2,20 \cdot 10^{-6}$	CTUh	$8,27 \cdot 10^{-12}$	$1,76 \cdot 10^{-13}$	2
Humantoxizität, nicht-Krebs (HTP-nc)	$3,27 \cdot 10^6$	1,84	$2,02 \cdot 10^{-5}$	CTUh	$6,18 \cdot 10^{-12}$	$1,14 \cdot 10^{-13}$	1
Feinstaub (PM)	$4,39 \cdot 10^6$	8,96	$1,07 \cdot 10^{-5}$	disease incidence	$2,44 \cdot 10^{-12}$	$2,18 \cdot 10^{-13}$	3
Ionisierende Strahlung (IRP)	$2,91 \cdot 10^{13}$	5,01	13,3	kg Bq U ²³⁵ _e	$4,57 \cdot 10^{-13}$	$2,29 \cdot 10^{-14}$	0
Bildung von photochemischem Ozon (POCP)	$2,80 \cdot 10^{11}$	4,78	2,33	kg C ₂ H _{4,e}	$8,32 \cdot 10^{-12}$	$3,98 \cdot 10^{-13}$	5
Versauerung (AP)	$3,83 \cdot 10^{11}$	6,20	1,82	kg SO _{2,e}	$4,75 \cdot 10^{-12}$	$2,95 \cdot 10^{-13}$	4
terrestrische Eutrophierung (EP-terrestrial)	$1,22 \cdot 10^{12}$	3,71	6,01	mol NO _{3,e}	$4,93 \cdot 10^{-12}$	$1,83 \cdot 10^{-13}$	2
Eutrophierung von Binnengewässern (EP-freshwater)	$1,76 \cdot 10^{10}$	2,80	$0,324 \cdot 10^{-3}$	kg P _{04,e}	$1,84 \cdot 10^{-14}$	$5,15 \cdot 10^{-16}$	0
Eutrophierung von Meeresgewässern (EP-marine)	$1,95 \cdot 10^{11}$	2,96	0,51	kg NO _{3,e}	$2,62 \cdot 10^{-12}$	$7,74 \cdot 10^{-14}$	1
Ökotoxizität Frischwasser (ETP-fw)	$8,15 \cdot 10^{13}$	1,92	520	CTU _e	$6,38 \cdot 10^{-12}$	$1,23 \cdot 10^{-13}$	2
Landnutzung (SQP)	$9,20 \cdot 10^{15}$	7,94	2150	pt	$2,34 \cdot 10^{-13}$	$1,86 \cdot 10^{-14}$	0
Wassernutzung (WDP)	$7,91 \cdot 10^{13}$	8,51	14,1	m ³ Welt _e	$1,78 \cdot 10^{-13}$	$1,52 \cdot 10^{-14}$	0
Ressourcenverbrauch, Mineralien und Metalle (ADP-minerals and metals)	$3,99 \cdot 10^8$	7,55	$1,82 \cdot 10^{-5}$	kg Sb _e	$4,56 \cdot 10^{-14}$	$3,44 \cdot 10^{-15}$	0
Ressourcenverbrauch fossile Brennstoffe (ADP-fossil)	$7,91 \cdot 10^{13}$	8,32	3130	MJ	$3,96 \cdot 10^{-11}$	$3,29 \cdot 10^{-12}$	41
Summe	–	100	–	–	–	$8,10 \cdot 10^{-12}$	–

Tabelle 2. „Schattenpreise“ der niederländischen „Stichting Nationale Milieudatabase“ [3.12]

Umweltwirkungskategorie	Einheit	Gewichtungsfaktor [€/kg Äquivalent]
Potenzial für den abiotischen Ressourcenverbrauch (ohne fossile Energieträger) – ADP	kg Sb _e	0,16
Potenzial für den abiotischen Ressourcenverbrauch fossile Energieträger – ADP	kg Sb _e	0,16
Treibhauspotenzial – GWP 100	kg CO _{2,e}	0,05
Ozonabbaupotenzial – ODP	kg R11 _e	30,0
Ozonbildungspotenzial – POCP	kg C ₂ H _{4,e}	2,0
Versauerungspotenzial – AP	kg SO _{2,e}	4,0
Eutrophierungspotenzial – EP	kg PO _{4,e}	9,0
Humantoxizitätspotenzial – HTP	kg 1,4-DCB _e	0,09
Ökotoxizitätspotenzial Frischwasser – FAETP	kg 1,4-DCB _e	0,03
Ökotoxizitätspotenzial in marinen Gewässern – MAETP	kg 1,4-DCB _e	0,0001
Terrestrisches Ökotoxizitätspotenzial – TETP	kg 1,4-DCB _e	0,06

der oder Regionen wäre der Bewertungsmaßstab an die dort geltenden umweltgesetzlichen Ziele anzupassen. Eine weitere Möglichkeit, die Umweltauswirkungen von Bauprodukten und Bauwerken zu einem Gesamtwert zu aggregieren, besteht darin, den ermittelten Umweltwirkungen Kosten zuzuordnen. Die Höhe dieser Kosten sollte sich dabei an den mutmaßlichen Kosten orientieren, die der Gesellschaft für die ermittelten Umweltauswirkungen entstehen. Ein solches Verfahren kommt beispielsweise bei der Vergabe öffentlicher Bauaufträge in den Niederlanden zur Anwendung. Die Emission einer Tonne CO₂ wird z. B. mit einem sogenannten „Schattenpreis“ in Höhe von 50 EUR bewertet [3.12] (s. Tabelle 2) Bei der Vergabe von öffentlichen Bauprojekten werden die so quantifizierten Umweltkosten zu den Angebotspreisen der verschiedenen Anbieter addiert und somit in die Vergabeentscheidung einbezogen. Für die nächsten Jahre ist mit einem schrittweisen Anstieg dieses Preises für CO₂ zu rechnen, um die Klimaziele zu erreichen.

3.2 Nachhaltigkeitszertifizierungssysteme

Die Nachhaltigkeitszertifizierung von Gebäuden ist ein Instrument, das sich weltweit etabliert hat, um nachhaltiges Bauen zu bewerten und damit auch zu fördern. Die Bewertung der Nachhaltigkeit berücksichtigt dabei das sogenannte „Drei-Säulen-Modell“ einer nachhaltigen Entwicklung, bei dem Ökologie, Ökonomie und soziale Ziele berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 1). Auf dem Drei-Säulen-Modell bauen 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals) auf, die auf dem Weltgipfel für nachhaltige Entwicklung 2015 der Vereinten Nationen verabschiedet wurden (s. Abschnitt 1).

Die Nachhaltigkeitsbewertung in den technischen Disziplinen basiert auf dem „Drei-Säulen-Modell“ und kombiniert die ökologischen, ökonomischen und soziokulturellen Aspekte und Maßnahmen [3.13]. Durch ein gleichberechtigtes Nebeneinander sollen der Erhalt, der Schutz und die Wiederherstellung der natürlichen Lebensräume gewährleistet werden.

Die Natur soll als Lebens- und Wirtschaftsgrundlage für die heutige und für die zukünftigen Generationen gesichert werden.

Die soziale Dimension impliziert den Erhalt der Ressourcen für die nachfolgenden Generationen und soll die Grundbedürfnisse der heutigen und zukünftigen Generation sicherstellen.

Die Ziele der ökonomischen Dimension sollen die Funktionsfähigkeit der ökonomischen Systeme sichern. Im Vordergrund der Nachhaltigkeitsbewertungen steht immer das verantwortungsbewusste und umweltverträgliche unternehmerische Handeln.

Die Umsetzung der Nachhaltigkeit im Bauwesen beginnt bereits beim Entwurf und der Systemwahl, setzt sich bei der Wahl der Baustoffe fort und wird entscheidend während der Planung und Ausschreibung festgelegt. Auf der operativen Ebene, nämlich bei der Bauabwicklung und beim Betrieb von Bauwerken gilt es, die operativen Prozesse nach der Lebensdauer und den Instandhaltungszyklen auszurichten.

Insgesamt wird deutlich, dass die Konzepte der Ressourceneffizienz und -schonung sowie jene einer nachhaltigen Entwicklung miteinander betrachtet werden sollten [3.14].

International gibt es eine Vielzahl verschiedener Zertifizierungssysteme mit den unterschiedlichsten Herangehensweisen und Zielsetzungen. Das britische System BREEAM (Building Research Establishment Environ-

mental Assessment Methodology) war in den 1990er-Jahren das erste seiner Art. Nachfolgend wurden in zahlreichen weiteren Ländern Zertifizierungssysteme entwickelt. Zu nennen sind hier beispielsweise

- die US-amerikanische Variante LEED (Leadership in Energy and Environmental Design),
- HQE (Haute Qualité Environnementale) in Frankreich,
- CASBEE (Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency) in Japan,
- Green Star in Australien,
- BNB und DGNB in Deutschland,
- klima:aktiv, TQB und ÖGNI in Österreich,
- LEED, DGNB, BREEAM, Minergie und Minergie-eco in der Schweiz.

In **Deutschland** gibt es seit 2009 das System der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB). Die Grundsystematik zur Bewertung der Nachhaltigkeitsqualität von Gebäuden wurde gemeinsam von der DGNB und dem damaligen Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) entwickelt. Das BMVBS entwickelte diese Grundlage zum BNB-System weiter, mit dem Bundesbauten bewertet werden [3.15]. In beiden Systemen werden neben den drei Säulen Ökologie, Ökonomie und Soziales auch die technische Qualität, die Prozessqualität und Standortmerkmale bewertet [3.16, 3.17].

Die DGNB hat zwischenzeitlich Zertifizierungssysteme für verschiedenste Gebäudearten entwickelt. Die ökologische Qualität, die ökonomische Qualität sowie die soziokulturelle/funktionale Qualität werden im DGNB-System gleichwertig betrachtet und tragen mit je 22,5% zur Gesamtbewertung bei. Diese Ausgewogenheit der Bewertung führt dazu, dass bei den meisten Gebäudetypen auf die Ökobilanz nur 9,5% der Gesamtbewertung entfallen. Hiervon wiederum entfallen 40% auf das Treibhauspotenzial (GPW). Da dies auch das Treibhauspotenzial der Gebäudenutzung und des Lebensendes (also Abbruch, Aufbereitung zur Wiederverwertung bzw. Deponierung) einschließt, hat das Treibhauspotenzial der Baustoff- und Gebäudeherstellung nur noch einen geringen Einfluss auf die Gesamtbewertung eines Gebäudes im DGNB-System.

Eine ebenfalls tendenziell unzureichende Betrachtung der Stoffkreisläufe – mit priorisierter Betrachtung der energetischen Leistungsfähigkeit von Gebäuden – existiert derzeit auch für die in **Österreich** zur Verfügung stehenden Gebäudebewertungssysteme klima:aktiv, TQB (total quality building) der ÖGNB (Österreichische Gesellschaft für nachhaltiges Bauen) und ÖGNI (Österreichische Gesellschaft für Nachhaltige Immobilienwirtschaft).

Bei dem in Österreich häufig verwendeten Gebäudestandard klima:aktiv des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie handelt es sich um ein umfassendes Bewertungssystem für die Nachhaltigkeit von Gebäuden mit besonderem Fokus auf Energieeffizienz, Klimaschutz und Ressourceneffizienz [3.18]. Die Bewertung erfolgt mittels eines 1000-Punkte-Systems

an einer überschaubaren Anzahl an Kriterien. Berücksichtigt werden Planungs- und Ausführungsqualität (max. 130 zu erreichende Punkte), Energie und Versorgung (max. 600 Punkte), Qualität der Baustoffe und Konstruktionen (max. 150 Punkte) sowie Komfort und Raumluftqualität betreffende Kriterien (max. 120 Punkte). Es erfolgt eine Einstufung in drei Qualitätsstufen: Gold (≥ 900 Punkte), Silber (≥ 750 Punkte) und Bronze (Erfüllung der Muss-Kriterien). Umsetzung findet die Bewertung durch ein online-Selbstdokumentationssystem (www.klimaaktiv.at) mit Plausibilitätsprüfung der Energie-, Baustoff-, Planungs- bzw. Ausführungs- und Komfortnachweise durch das zuständige österreichische Bundesministerium. Basiskriterien, die die Energieeffizienz betreffen, sind Heizwärme- und Kühlbedarf, erneuerbare Energieträger (CO₂-Emissionen), für Baustoffe der Öko-Index OI3 des Österreichischen Instituts für Bauen und Ökologie (IBO) [3.19].

Mit dem TQB-System (total quality building) der Österreichischen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (ÖGNB) existiert ein mit den Systemen BREEAM und LEED vergleichbares Gebäudebewertungssystem als Zusammenführung aus klima:aktiv und IBO-Ökopass. Zur Bewertung wird ebenfalls ein 1000-Punkte-System herangezogen, wobei jeweils 200 Punkte für die Kriterien „Baustoffe und Ressourceneffizienz“, „Gesundheit und Komfort“, „Standort und Ausstattung“, „Wirtschaftlichkeit und technische Qualität“ sowie „Energie und Versorgung“ vergeben werden, wodurch ein etwas stärkerer Fokus auf die Ressourcenschonung gelegt wird [3.20].

Das Bewertungssystem der Österreichische Gesellschaft für Nachhaltige Immobilienwirtschaft (ÖGNI) wiederum basiert auf den Kriterien der Deutschen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB), wobei die Kriterien an die österreichischen Baustandards angepasst wurden.

In der **Schweiz** existieren zahlreiche Standards und Labels zur Bewertung von nachhaltigem Bauen, wobei jedes System unterschiedliche Kriterien abdeckt bzw. unterschiedlich stark wichtet. Neben den bereits erwähnten und in der Schweiz ebenfalls anerkannten Bewertungssystemen LEED, DGNB, BREEAM existiert das Zertifizierungs-Label „Minergie“ und „Minergie-eco“ als bekannteste und auf Energieeffizienz fokussierte Schweiz-eigene Zertifizierungsmodelle. Die maßgeblichen Kriterien umfassen Anforderungen an den Energie- und Heizwärmebedarf, die Eigenstromproduktion, kontrollierte Lüfterneuerung, sommerlichen Wärmeschutz sowie den Verzicht auf fossile Brennstoffe. Bei „Minergie-eco“ wird zusätzlich ein Fokus auf den Ressourcenverbrauch und die Rückbaubarkeit gelegt [3.21]. Eine Übersicht über die zur Verfügung stehenden Bewertungssysteme finden sich auf der Homepage des Schweizer Vereins „Netzwerk Nachhaltiges Bauen Schweiz“ NNBS [3.22].

In **Südtirol** werden durch die seit 2002 existierende KlimaHaus Agentur neben der Energieeffizienz von Gebäuden auch die Baumaterialien und Bausysteme auf

deren Nachhaltigkeit hin bewertet und mit „Klima-Haus Nature“ zertifiziert.

Weitere Systeme zur Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden bzw. Bauprodukten sind das System Level(s) sowie das CSC-System. **Level(s)** ist ein Bewertungstool für Büro- und Wohngebäude, das wie der „Product Environmental Footprint (PEF)“ von der Europäischen Kommission entwickelt wurde. Level(s) verwendet Basisindikatoren zur Nachhaltigkeit wie das Treibhauspotenzial, Material- und Wasserverbrauch, Auswirkungen auf Gesundheit und Wohlbefinden unter Berücksichtigung von Lebenszykluskosten und Wertermittlungen (s. Tabelle 3). Die Indikatoren von Level(s) können auf verschiedenen Stufen eines Bauprojekts (Planung, Fertigstellung, Inbetriebnahme und Phase nach dem Bezug) angewendet werden. Level(s) ist Open Source-Software und wird dem Anwender kostenlos zur Verfügung gestellt [3.23].

Für die Bewertung der Betonherstellung bzw. der Herstellung von Betonprodukten wurde im November 2016 der Concrete Sustainability Council (CSC) gegründet. Er hat im Jahr 2017 ein weltweites Zertifizierungssystem eingeführt, das Unternehmen im Bereich Beton, Zement und Gesteinskörnung dahingehend bewerten soll, inwieweit nachhaltig operiert wird [3.25]. Das CSC-System ist ein Produktzertifizierungssystem,

das normalerweise für alle Produkte gilt, die in einem Werk hergestellt werden. Die Zertifizierung umfasst sowohl Betonunternehmen bzw. -werke als auch deren Lieferkette und erfolgt in den vier Kategorien Ökonomie, Ökologie, Soziales und Management. Mit CSC-zertifiziertem Beton ist es z. B. möglich, zusätzliche Punkte im DGNB-Zertifizierungsprozess von Gebäude zu erhalten (Indikator ENV1.3 „Verantwortungsvolle Ressourcengewinnung“) [3.26].

3.3 Umweltverträglichkeit

Das Bauordnungsrecht in Deutschland ist Ländersache. Die für Bau zuständigen Minister und Senatoren der 16 Länder (Bauministerkonferenz; BMK) erarbeiten gemeinsam eine Musterbauordnung (MBO). Die meisten Länder übernehmen diese Musterbauordnung nahezu unverändert in ihre Landesbauordnungen. Gemäß § 3 „Allgemeine Anforderungen“ der MBO sind bauliche Anlagen so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden; dabei sind die Grundanforderungen an Bauwerke gemäß Anhang I der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 zu berücksichtigen. Dies gilt auch für die

Tabelle 3. System Level(s): Überblick über die betrachteten Themengebiete und Makroziele sowie die entsprechenden Indikatoren [3.24]

Thematische Eingrenzung	Zielsetzung auf der Makroebene	Indikatoren			
Ressourcenverbrauch und Umweltverträglichkeit	1. Treibhausgasemissionen über den Bauwerkslebenszyklus	1.1 Energieverbrauch in der Nutzungsphase (kWh/m ² /a)	1.2 Treibhauspotenzial über den Lebenszyklus (CO _{2,e} /m ² /a)		
	2. Ressourceneffiziente und zyklische Baustofflebenszyklen	2.1 Bewertung von Quantitäten, Stoffen und Nutzungsdauern	2.2 Bau- und Rückbauabfälle	2.3 Adaptivität und Erneuerungspotenzial als Entwurfskriterium	2.4 Rückbaubarkeit als Entwurfskriterium
	3. Effiziente Nutzung von Wasserressourcen	3.1 Wasserverbrauch in der Nutzungsphase (m ³ /Bewohner/a)			
Gesundheit und Behaglichkeit	4. Gesundheitskonforme und behagliche Raumgestaltung	4.1 Qualität der Innenluft	4.2 Anteil der Zeiträume außerhalb der thermischen Behaglichkeit	4.3 Beleuchtungsqualität	4.4 Akustische Qualität
Kosten, Nutzen und Risiken	5. Anpassungsfähigkeit und Resilienz gegenüber dem Klimawandel	5.1 Prognosewerkzeuge für den Lebenszyklus: Szenarien für zukünftige klimatische Bedingungen	5.2 Erhöhtes Risiko für Extremwetterereignisse	5.3 Erhöhtes Risiko für Überflutungen	
	6. Optimierte Lebenszykluskosten und -werte	6.1 Lebenszykluskosten (€/m ² /a)	6.2 Wertschöpfung und Risikofaktoren		

Beseitigung von Anlagen und bei der Änderung ihrer Nutzung.

Anhang I der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 (BauPVO) enthält folgende Grundanforderungen an Bauwerke:

- mechanische Festigkeit und Standsicherheit,
- Brandschutz,
- Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz,
- Sicherheit und Barrierefreiheit bei der Nutzung,
- Schallschutz,
- Energieeinsparung und Wärmeschutz,
- nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen.

In Anhang 8 „Anforderungen an bauliche Anlagen bezüglich des Gesundheitsschutzes“ und Anhang 10 „Anforderungen an bauliche Anlagen bezüglich der Auswirkungen auf Boden und Gewässer“ der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB, [3.27]) werden die in § 3 der MBO formulierten Anforderungen hinsichtlich des Gesundheits- und Umweltschutzes konkretisiert. Nachfolgend werden die Anforderungen an bauliche Anlagen bezüglich der Auswirkungen auf Boden und Grundwasser betrachtet und wurden [3.28] entnommen.

Beton gemäß DIN EN 206-1 [3.29] in Verbindung mit DIN 1045-2 [3.30], der lediglich aus den in Tabelle 4 zusammengefassten genormten Ausgangsstoffen hergestellt wird, benötigt keinen Nachweis der Umweltverträglichkeit.

Bei der Verwendung der in Tabelle 5 zusammengefassten genormten Ausgangsstoffe ist ein Nachweis der Umweltverträglichkeit dieser Stoffe erforderlich. Beton, der mit nach Tabelle 5 geprüften Ausgangsstoffen hergestellt ist, bedarf dann ebenfalls keines weiteren Nachweises.

4 Nachhaltigkeit auf der Baustoffebene

4.1 Einführung

Wie bereits in Abschnitt 1 erläutert, gehen mit der Herstellung von Bauteilen aus Stahlbeton erhebliche Umweltwirkungen – und hier insbesondere Emissionen des Treibhausgases CO₂ – einher, was im Wesentlichen auf die Umweltwirkungen des Betonausgangsstoffs Zement sowie auf das bei der Herstellung von Bewehrungsstahl freigesetzte CO₂ zurückzuführen ist. Um den ökologischen Fußabdruck der Betonbauweise zu reduzieren, ist ein zentraler Ansatz somit, den Anteil von Ausgangsstoffen mit starken Umweltwirkungen in der Betonzusammensetzung bzw. bei der Bewehrung eines Bauteils zu reduzieren. Hierbei stehen Planerinnen und Planer vor der Herausforderung, trotz reduzierter Umweltwirkungen gleichzeitig die Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit des herzustellenden Bauteils sicherzustellen.

Tabelle 4. Genormte Ausgangsstoffe, bei deren Verwendung keine Nachweise der Umweltverträglichkeit des Betons erforderlich sind [3.28]

Spalte	1	2	3
Zeile	Produkt	Norm	Referenz
1	Zement	DIN EN 197	[3.31, 3.32]
2		DIN EN 14216	[3.33]
3		DIN 1164	[3.34–3.36]
4	Natürliche Gesteinskörnung, Hochofenstüchschlacke, Hüttensand, Schmelzkammergranulat	DIN EN 12620	[3.37]
5	Blähglimmer (Vermikulit), Blähperlit, Blähschiefer, Blähton, Ziegelsplitt aus ungebrauchten Ziegeln	DIN EN 13055-1	[3.38]
6	Hüttenbims	DIN 4301	[3.39]
7	Rezyklierte Gesteinskörnung aus Fehlchargen bei der Betonherstellung (Einsatz direkt im Herstellwerk)	DIN EN 12620	[3.37]
8	Flugasche aus Wärmekraftwerken, in denen nur Kohle und keine Mitverbrennungsstoffe, mit Ausnahme von kommunalem Klärschlamm in einem Anteil von bis zu 5 M.-% mitverbrannt werden	DIN EN 450-1	[3.40]
9	Gesinterte Steinkohlenflugasche und Kesselsand aus Wärmekraftwerken, in denen nur Kohle und keine Mitverbrennungsstoffe, mit Ausnahme von kommunalem Klärschlamm in einem Anteil von bis zu 5 M.-% mitverbrannt werden	DIN EN 13055-1	[3.38]
10	Betonzusatzmittel	DIN EN 934	[3.41, 3.42]

Tabelle 5. Genormte Ausgangsstoffe bei deren Verwendung Nachweise der Umweltverträglichkeit erforderlich sind [3.28]

Spalte	1	2	3
Zeile	Produkt	Norm	Referenz
1	Sulfathüttenzement	DIN EN 15743	[3.43]
2	Weitere, nicht in Tabelle 4 aufgeführte industriell hergestellte Gesteinskörnungen	DIN EN 12620	[3.37]
3	Weitere, nicht in Tabelle 4 aufgeführte industriell hergestellte leichte Gesteinskörnungen	DIN EN 13055-1	[3.38]
4	Rezyklierte Gesteinskörnungen	DIN EN 12620 unter Beachtung von DIN 4226-101 und DIN 4226-102	[3.37, 3.44, 3.45]
5	Flugasche aus Wärmekraftwerken zur Verwendung als Betonzusatzstoff, wenn mehr als 5 M.-% (Trockenmasse) kommunaler Klärschlamm oder weitere Sekundärbrennstoffe mitverbrannt werden	DIN EN 450-1 unter Beachtung der DAfStb-Richtlinie [3.46]	[3.40]
6	Gesinterte Steinkohlenflugasche und Kesselsand aus Wärmekraftwerken, wenn mehr als 5 M.-% (Trockenmasse) kommunaler Klärschlamm oder weitere Sekundärbrennstoffe mitverbrannt werden	DIN EN 13055-1 unter Beachtung der DAfStb-Richtlinie [3.46]	[3.38]

Baustoffe wie Beton, Bewehrungsstahl oder Spannstahl sind per Definition nicht nachhaltig. Stattdessen verfügen sie über bestimmte Eigenschaften, die es durch Planerinnen und Planer optimal zu nutzen gilt. Bei anderen Baustoffen, wie Holz, Lehm oder auch Carbonbeton, muss die Ökobilanz über die Lebensdauer bewertet werden. Vor diesem Hintergrund kann man auf der Baustoffebene allenfalls von einem „Potenzial für eine nachhaltige Nutzung“ („Nachhaltigkeitspotenzial“) sprechen.

Im vorliegenden Abschnitt 4 wird der aktuelle Wissensstand zur ökologischen Optimierung von bewehrtem Beton auf der Baustoffebene vorgestellt. Abschnitt 4.2 gibt hierzu einen Überblick über die bestehenden Ansätze zur Steigerung des Nachhaltigkeitspotenzials von Beton und geht insbesondere auf Technologien zur Verbesserung der Umweltbilanz der Betonausgangsstoffe Bindemittel (Abschnitt 4.2.2.1), Gesteinskörnungen (Abschnitt 4.2.2.2) und Zusatzmittel (Abschnitt 4.2.2.3) ein. Hierbei wird (soweit möglich) auch jeweils eine grobe Einschätzung der Marktreife bzw. des erwarteten Wirkungsgrads der jeweiligen Technologie gegeben. Weiterhin werden Verbesserungspotenziale im Bereich der Mischungsentwicklung von Beton erläutert (Abschnitt 4.2.3) und die Eigenschaften ökologisch optimierter Betone vorgestellt (Abschnitt 4.2.4). Um den Leserinnen und Lesern eine möglichst einfache Anwendung der geschilderten Technologien zu ermöglichen, wurden zu jedem Abschnitt die Ökobilanzdaten einzelner Stoffe recherchiert und in übersichtlicher Tabellenform zusammengefasst (s. Tabelle 6 für Betonausgangsstoffe,

Tabelle 17 für Beton, Tabelle 18 für Bewehrung und Tabelle 20 für Transporte und Baustellenprozesse).

Analog zur Vorgehensweise beim Beton gibt Abschnitt 4.3 einen Überblick über die Umweltwirkungen bei der Herstellung klassischen Bewehrungsstahls sowie zeigt neue Möglichkeiten auf, wie beispielsweise durch den Einsatz von Carbonbewehrungen in Verbindung mit speziell angepassten Mineralmischungen, die Umweltwirkungen der Betonbauweise reduziert werden können.

Bauen ist ein hochgradig lokaler Prozess, bei dem große Massen bewegt werden müssen. Entsprechend spielen Emissionen aus Transporten – und hier insbesondere aus dem Transport der Bewehrung zur Baustelle – eine wichtige Rolle für die Ökobilanz der Betonbauweise. Abschnitt 4.4 gibt einen Überblick über die für Transporte anzusetzenden Umweltwirkungen.

4.2 Beton

4.2.1 Grundsätze zur Herstellung umwelt- und ressourceneffizienter Betone

Im Unterschied zur Klassifizierung von Betonen beispielsweise anhand ihrer Festigkeit oder ihrer Konsistenz, liegen bislang noch keine allgemein anerkannten Kriterien vor, anhand derer man einen Beton als umwelt- oder ressourceneffizient kategorisieren kann. Die Herstellung umwelt- und ressourceneffizienter Betone folgt vielmehr dem Grundsatz, den Anteil ökologisch knapper Ausgangsstoffe bzw. von Ausgangsstoffen mit einer hohen Umweltwirkungen – z. B. einer

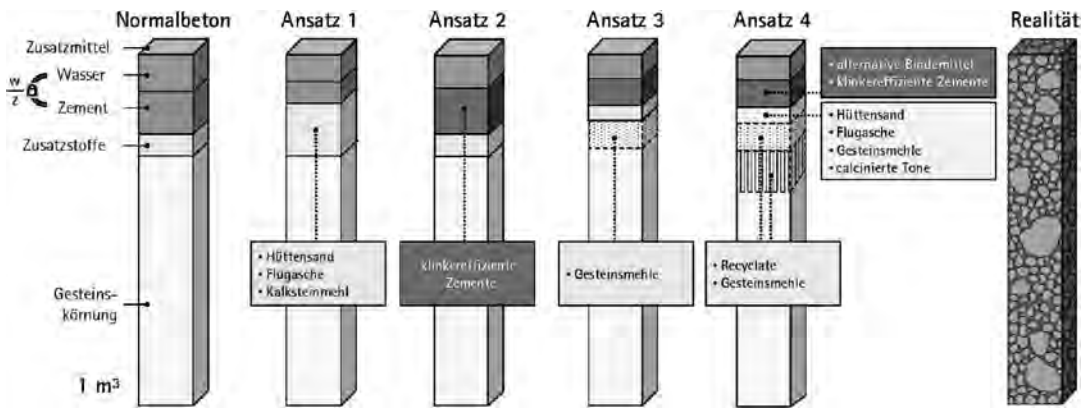


Bild 1. Schematische Darstellung von Ansätzen zur Herstellung umwelt- und ressourceneffizienter Betone

großen CO_2 -Emission pro Masseinheit – in der Mischungszusammensetzung zu minimieren, ohne dass dadurch jedoch die maßgebenden Betoneigenschaften, wie die Verarbeitbarkeit, die Leistungsfähigkeit (z. B. ausgedrückt durch die Festigkeit) und die Dauerhaftigkeit beeinträchtigt werden. Bild 1 gibt einen schematischen Überblick über mögliche Ansätze. Hierbei gilt, dass diese quasi beliebig miteinander kombiniert werden können.

Bild 1 zeigt zunächst die Zusammensetzung eines typischen Normalbetons. Das Volumen der hier dargestellten Säulen entspricht jeweils 1 m³. Ein gängiger **Ansatz 1**, die Umweltwirkungen von Beton zu reduzieren, ist seit vielen Jahren, Portlandzementklinker bzw. Zement durch sog. Secondary Cementitious Materials (SCMs) bzw. Zusatzstoffe wie Hüttensand, Flugasche oder Kalksteinmehl auszutauschen. Hüttensand und Flugasche bilden durch ihre latent-hydraulische bzw. puzzolane Reaktionsweise Calcium-Silikat-Hydrat-Phasen und tragen somit zur Bildung von Zementstein bei [4.1]. Kalksteinmehl ist hingegen nicht chemisch reaktiv, zeigt jedoch in Wechselwirkung mit Portlandzementklinker eine beschleunigende Wirkung auf dessen Hydratation, die von verschiedenen Autoren auf eine keimbildende Wirkung in Verbindung mit einer Ca-Freisetzung durch die extrem feinen Kalksteinmehlpartikel zurückgeführt werden konnte. Die Erkenntnis, dass die Hydratation des Portlandzements bzw. latent-hydraulischer bzw. puzzoloner Komponenten sich stark gegenseitig beeinflussen, hat in den vergangenen Jahren zur Entwicklung technisch hochentwickelter Kompositzemente geführt (s. Abschnitt 4.2.2.1). Parallel hierzu wurden aber auch neuartige Zementklinker vorgestellt, die sich insbesondere durch einen reduzierten Gehalt an Calciumoxid CaO auszeichnen. Da CaO bei der Zementherstellung durch eine Entsäuerung von Kalkstein CaCO_3 gewonnen werden muss – hierbei werden große Mengen an CO_2 freigesetzt –, führt diese Kalk-Reduktion automatisch zu einer Reduktion der spezifischen Treib-

hausgasemissionen pro hergestelltem Kilogramm Zementklinker. Die Verwendung solch klinkereffizienter Zemente zeigt **Ansatz 2**. Abschnitt 4.2.2.1 gibt einen Überblick über die Entwicklungen auf diesem Gebiet. Inwieweit die Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit damit hergestellter Betone denen entspricht, die mittels klassischer Zemente (Portlandzement, Hochofenzement etc.) und Betonzusatzstoffe entspricht, wird für solche Zemente in aufwendigen Zulassungsprüfungen überprüft. Nähere Informationen zur Dauerhaftigkeit gibt Abschnitt 4.2.4.3.

Den zuvor vorgestellten Ansätzen ist gemein, dass diese auf den Austausch klassischer Zemente und Zusatzstoffe durch umweltfreundlichere Systeme abzielen. **Ansatz 3** hingegen zeigt, dass ein großes Potenzial zur Reduktion der Umweltwirkungen und des Ressourcenverbrauchs auch in der Steigerung des Gesteinskorngehalts liegt. Dies erfordert jedoch eine gezielte Optimierung der Größenverteilung und Packungsdichte des Korngemischs, da ansonsten die Verarbeitbarkeit derartiger Betone nicht gewährleistet werden kann. **Ansatz 4** berücksichtigt weiterhin die Tatsache, dass die Verfügbarkeit hochwertiger Gesteinskörnungen einer ökologischen Verknappung unterliegt, der durch den Einsatz von Recyclaten und Gesteinsmehlen begegnet werden kann. Aktuelle Arbeiten beschäftigen sich zudem mit dem Recycling von Zementstein als Grundlage zur Herstellung beispielsweise von Belit-Zementklinkern.

Für alle hier vorgestellten Ansätze gilt, dass zur Sicherstellung einer gleichbleibenden Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit solcher Betone, der Wassergehalt im Beton i. d. R. reduziert werden muss. Die Menge an Wasser, die zur Füllung der Zwischenräume zwischen den Partikeln und Körnern eines frischen Betons zur Verfügung steht, geht somit zurück (vgl. Bild 1, Realität). Dies wirkt sich negativ auf die Verarbeitbarkeit solcher Betone aus. Dem kann zwar prinzipiell durch den Einsatz moderner Betonzusatzmittel begegnet werden, jedoch muss hierbei beachtet

werden, dass konventionelle Betonzusatzmittel ebenfalls ausgeprägte Umweltwirkungen aufweisen (s. Abschnitt 4.2.2.3). Der Schlüssel zur Sicherstellung einer guten Verarbeitbarkeit von Ökobetonen liegt somit in einer gezielten Packungsdichteoptimierung aller granularen Ausgangsstoffe des Betons. Anders als bei Normalbeton darf bei dieser Optimierung nicht nur die Sieblinie der Gesteinskörnung allein betrachtet werden, sondern es muss auch die Korngrößenverteilung der Feinstbestandteile (d. h. auch der Bindemittel) berücksichtigt werden. Die Vorgehensweise hierzu wird in Abschnitt 4.2.3 vorgestellt.

Für alle zuvor vorgestellten Ansätze gilt zum einen, dass die Anzahl der bei der Betonherstellung miteinander interagierenden Stoffe gegenüber einem heutigen Normalbeton stark zunimmt. Entsprechend sind neue Modelle erforderlich, die es ermöglichen, beispielsweise den Einfluss von Schwankungen in der Zusammensetzung, den Eigenschaften und dem Gehalt einzelner Zement- bzw. Betonausgangsstoffe auf die Betoneigenschaften vorherzusagen [4.2]. Insbesondere sind digitale Technologien erforderlich, mit denen es gelingt, diese Einflüsse in Echtzeit zu erfassen und durch Regelkreisläufe auszusteuern. Zum anderen muss bei diesen Ansätzen berücksichtigt werden, dass eine Zunahme der Anzahl der Betonausgangsstoffe auch mit einer Zunahme der notwendigen Transporte – und damit der transportbedingten Umweltwirkungen – einhergeht (vgl. Abschnitt 4.4). Insbesondere für Ausgangsstoffe mit nur geringem Unterschied in den Umweltwirkungen im Vergleich zu klassischen Ausgangsstoffen – vgl. z. B. Flussskies und recycelte Gesteinskörnung – werden daher nur lokal gewonnene und wieder eingesetzte Ausgangsstoffe nachhaltig sein.

Ein bislang noch nicht adressierter Ansatz, die Umweltwirkungen insbesondere bei der Zementherstellung zu reduzieren, besteht im Einsatz der sog. Carbon-Capture-and-Storage (CCS) bzw. Carbon-Capture, Utilization and Storage (CCUS) Technologie [4.3]. Hierbei wird das bei der Herstellung von Portlandzement freigesetzte CO_2 durch einen aufwendigen chemischen Prozess aus dem Rauchgas abgetrennt, verflüssigt, durch Pipelines zu unterirdischen Lagerstätten transportiert und dort gespeichert bzw. als Grundstoff für die chemische Industrie z. B. zur Herstellung von Methan verwendet. Diese Technologie befindet sich derzeit im Erprobungsstadium, bietet jedoch im Gegensatz zu den bereits zuvor genannten Ansätzen das Potenzial, Zement quasi klimaneutral herzustellen [4.3]. Neben technologischen Fragen sind hier jedoch noch enorme Herausforderungen beispielsweise in der Kapitalbereitstellung für die Umrüstung von Zementwerken sowie in Akzeptanzfragen für den Bau von CO_2 -Pipelines sowie für die geotechnische Speicherung von CO_2 zu bewältigen [4.4]. Schließlich sind CCS- bzw. CCUS-Technologien derzeit noch sehr kostenintensiv.

Die Ausführungen in den nachfolgenden Abschnitten beschränken sich auf Betone bzw. deren Ausgangs-

stoffe, bei denen es das explizite Ziel war, die Umweltwirkungen bei der Herstellung eines Kubikmeters Beton zu minimieren. Für spezifische Anwendungsfelder kann es jedoch auch zielführend sein, Betone mit deutlich größeren spezifischen Umweltwirkungen, aber gleichzeitig stark verbesserter Leistungsfähigkeit wie beispielsweise ultrahochfeste Betone einzusetzen und den ökologischen Mehraufwand durch eine signifikante Einsparung im Materialbedarf auszugleichen. Dabei müssen aber der im Fertigteilbau notwendige Energieaufwand und die durch die Baulogistik und Transporte entstehenden Emissionen betrachtet werden. Einen umfassenden Überblick über die Herstellung und die Eigenschaften ultrahochfester Betone gibt [2.12]. Auf die aus dem Einsatz von UHPC resultierenden ökologischen Möglichkeiten im Bereich der Tragwerksplanung wird eingehend in Abschnitt 5 eingegangen. Die Ökobilanz eines ultrahochfesten Betons ist exemplarisch in Tabelle 17 wiedergegeben. Interessant sowohl in Bezug auf eine erhöhte Tragfähigkeit und eine reduzierte Umweltwirkung sind optimierte Strukturen mit hochfestem Beton, wo auch Zuschläge aus Abbruch- und Tunnelausbruchmaterial sowie Bindemittelsysteme mit möglichst geringen spezifischen CO_2 -Emissionen verwendet werden.

4.2.2 Betonausgangsstoffe und deren Verfügbarkeit

Der Ausgangspunkt der Nachhaltigkeitsoptimierung bilden die Betonausgangsstoffe. Deren Umweltwirkungen werden i. d. R. pro Masseinheit, d. h. pro Kilogramm oder Tonne, angegeben und können mittels einer Ökobilanzanalyse gemäß Abschnitt 3.1 ermittelt werden. Multipliziert man die jeweils pro m^3 eingesetzte Ausgangsstoffmenge mit der Umweltwirkung des jeweiligen Stoffs und summiert diese, so erhält man die Umweltwirkung des Betons (s. Abschnitt 4.2.4.4). Hinzu kommen Umweltwirkungen aus Transporten, der Betonförderung etc. (s. Abschnitt 4.4).

Wie bereits in Abschnitt 3 erläutert, werden die Umweltwirkungen der Ausgangsstoffe den planenden Bontotechnologinnen und -technologern durch den Ausgangsstoffhersteller in Form einer Environmental Product Declaration (EPD) bereitgestellt. Zumeist handelt es sich hierbei um Daten, die nicht werkspezifisch ermittelt wurden – regionale Unterschiede werden somit nicht abgebildet – sondern vielmehr um Mittelwerte über verschiedene Werke, Produktionsstandorte, Regionen oder auch Produkte. Dies muss bei der Ermittlung der Ökobilanz des Betons zwingend berücksichtigt werden.

Tabelle 6 gibt einen Überblick über typische, durch Literaturangaben und Quellen belegte Werte, für die in den nachfolgenden Abschnitten aufgeführten Ausgangsstoffe. Diese Werte sollen dem Leser als Orientierung dienen und eine fachliche Bewertung bzw. Plausibilisierung der von Lieferanten bereitgestellten Werte ermöglichen.

Tabelle 6. Ökobilanzdaten typischer Betonausgangsstoffe für die Herstellungsphase (A1–A3) gemäß DIN EN ISO 14040 [4.5] und DIN EN ISO 14044 [4.6] (Hinweis: Die hier angegebenen Werte werden beispielhaft für die einzelnen Stoffe angegeben; nähere Informationen zu den Eigenschaften der jeweils verwendeten Stoffe geben die angegebenen Quellen; für ein spezifisches Bauprojekt sollten die Ökobilanzdaten der konkret vorgesehenen Ausgangsstoffe vom jeweiligen Hersteller angefragt und für die Berechnung der Ökobilanz des Betons angesetzt werden. A1–A3 bezeichnen das Produktionsstadium des Betonausgangsstoffs mit A1 „Rohstoffversorgung“, A2 „Transport“ und A3 „Herstellung“; Systemgrenze cradle-to-gate)

Ausgangsstoff	Primärenergieverbrauch		Treibhaus- potenzial GWP	Ozon-Abbau- potenzial ODP	Versauerungs- potenzial AP	Überdüngungs- potenzial EP	Bodennahes Ozon- bildungspotenzial POCP	Quelle
	nicht erneuerbar	erneuerbar						
	[MJ/kg]	[MJ/kg]		[kg R11 _e /kg]	[kg SO _{2,e} /kg]	[kg PO _{4,e} /kg]	[kg C ₂ H _{4,e} /kg]	
Zemente und Zusatzstoffe								
CEM I 42,5 R	2,931	0,219	0,7977	$3,985 \cdot 10^{-10}$	$9,717 \cdot 10^{-4}$	$1,217 \cdot 10^{-4}$	$1,014 \cdot 10^{-4}$	[4.7]
CEM I 52,5 R	3,207	0,266	0,8162	$4,857 \cdot 10^{-10}$	$1,005 \cdot 10^{-3}$	$1,246 \cdot 10^{-4}$	$1,038 \cdot 10^{-4}$	[4.8]
Mikrozement (µCEM)	2,80	0,459	0,8850	$1,119 \cdot 10^{-11}$ *)	$1,108 \cdot 10^{-3}$ *)	$1,213 \cdot 10^{-4}$ *)	$1,445 \cdot 10^{-4}$ *)	[4.9]
CEM II 52,5	2,312	0,8404	0,811	$4,61 \cdot 10^{-15}$	$5,935 \cdot 10^{-4}$	$9,934 \cdot 10^{-5}$	$9,219 \cdot 10^{-5}$	[4.8]
Flugasche (ohne Allokation)	0	0	0	0	0	0	0	[4.8]
Flugasche (mit Allokation)	4,84		0,350	$8,45 \cdot 10^{-9}$	$2,67 \cdot 10^{-3}$	$1,52 \cdot 10^{-4}$	$9,34 \cdot 10^{-5}$	[4.10]
Hüttensand (ohne Allokation)	0	0	0	0	0	0	0	[4.10]
Hüttensand (mit Allokation)	k. A.	k. A.	0,114	$4,371 \cdot 10^{-11}$	$4,222 \cdot 10^{-4}$	$4,983 \cdot 10^{-5}$	$2,107 \cdot 10^{-4}$	[4.7]
Trassmehl	$3,852 \cdot 10^{-1}$	$3,886 \cdot 10^{-2}$	0,026	$6,733 \cdot 10^{-11}$	$6,413 \cdot 10^{-5}$	$8,988 \cdot 10^{-6}$	$6,017 \cdot 10^{-6}$	[4.11]
Calcinerter Ton	k. A.	k. A.	0,125	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	s. Abschn. 4.2.2.1
Silikastraub (SF)	k. A.	k. A.	0,028	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	[4.11]

Tabelle 6. Ökobilanzdaten typischer Betonausgangsstoffe für die Herstellungsphase (A1–A3) gemäß DIN EN ISO 14040 [4.5] und DIN EN ISO 14044 [4.6] (Hinweis: Die hier angegebenen Werte werden beispielhaft für die einzelnen Stoffe angegeben; nähere Informationen zu den Eigenschaften der jeweils verwendeten Stoffe geben die angegebenen Quellen; für ein spezifisches Bauprojekt sollten die Ökobilanzdaten der konkret vorgesehenen Ausgangsstoffe vom jeweiligen Hersteller angefragt und für die Berechnung der Ökobilanz des Betons angesetzt werden. A1–A3 bezeichnen das Produktionsstadium des Betonausgangsstoffs mit A1 „Rohstoffversorgung“, A2 „Transport“ und A3 „Herstellung“; Systemgrenze cradle-to-gate (Fortsetzung)

Ausgangsstoff	Primärenergieverbrauch		Treibhaus- potenzial GWP	Ozon-Abbau- potenzial ODP	Versauerungs- potenzial AP	Überdüngungs- potenzial EP	Bodennahes Ozon- bildungspotenzial POCP	Quelle
	nicht erneuerbar	erneuerbar						
	[MJ/kg]	[MJ/kg]					[kg CO _{2,e} /kg]	[kg R11 _e /kg]
Gesteinsmehle und Gesteinskörnungen								
Quarzmehle	2,119	0,7407	0,1203	k. A.	4,1 · 10 ⁻⁴	k. A.	k. A.	[4.12]
Kalksteinmehl	3,852 · 10 ⁻¹	3,886 · 10 ⁻²	0,026	6,733 · 10 ⁻¹¹	6,413 · 10 ⁻⁵	8,988 · 10 ⁻⁶	6,017 · 10 ⁻⁶	[4.7]
Sand 0/2	7,044 · 10 ⁻³	4,057 · 10 ⁻²	2,955 · 10 ⁻³	1,520 · 10 ⁻¹³	8,965 · 10 ⁻⁶	1,757 · 10 ⁻⁶	-1,055 · 10 ⁻⁷	[4.9]
Kies 2/8 bzw. 8/16	7,044 · 10 ⁻³	4,057 · 10 ⁻²	2,955 · 10 ⁻³	1,520 · 10 ⁻¹³	8,965 · 10 ⁻⁶	1,757 · 10 ⁻⁶	-1,055 · 10 ⁻⁷	[4.9]
Recycelte GK 0/16	8,400 · 10 ⁻²	2,000 · 10 ⁻⁴	6,0 · 10 ⁻³	k. A.	5,700 · 10 ⁻⁵	9,000 · 10 ⁻⁶	8,000 · 10 ⁻⁶	[4.13]
Betonzusatzmittel und Wasser								
Fließmittel auf PCE-Basis	27,95	1,20	0,944	3,29 · 10 ⁻⁸	1,19 · 10 ⁻²	5,97 · 10 ⁻³	5,85 · 10 ⁻⁴	[4.14]
Fließmittel	3,14 · 10 ¹	1,51	1,88	2,3 · 10 ⁻¹⁰	2,92 · 10 ⁻³	1,03 · 10 ⁻³	3,12 · 10 ⁻⁴	[4.15]
Verzögerer	2,84 · 10 ¹	1,97	1,31 · 10 ⁰	3,5 · 10 ⁻¹⁰	1,04 · 10 ⁻²	5,32 · 10 ⁻⁴	6,73 · 10 ⁻⁴	[4.16]
Beschleuniger	3,42 · 10 ¹	8,51	2,28 · 10 ⁰	1,74 · 10 ⁻¹⁰	6,6 · 10 ⁻³	1,54 · 10 ⁻³	4,84 · 10 ⁻⁴	[4.17]
Luftporenbildner	1,42 · 10 ¹	8,14 · 10 ⁻¹	5,27 · 10 ⁻¹	7,56 · 10 ⁻¹¹	1,3 · 10 ⁻³	1,43 · 10 ⁻⁴	3,45 · 10 ⁻⁴	[4.18]
Wasser	1,22 · 10 ⁻³	4,2 · 10 ⁻⁴	2,56 · 10 ⁻⁴	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	[4.9]

*) Einfluss aus erhöhter Mahleinheit vernachlässigt; siehe [4.9].

Nachstehend wird auf die einzelnen Ausgangsstoffe zur Betonherstellung, untergliedert in Bindemittel und Betonzusatzstoffe, Gesteinskörnungen und Betonzusatzmittel eingegangen. Wo notwendig wird kurz der aktuelle Stand der Verfügbarkeit dieser Stoffe erläutert, da diese für die langfristige Planung von Bauprojekten von entscheidender Bedeutung ist. Angaben zur Ökobilanz und Leistungsfähigkeit von Bewehrung finden sich in Abschnitt 4.3.

4.2.2.1 Bindemittel und Betonzusatzstoffe

Allgemeines

Die Zementindustrie und damit die gesamte Wertschöpfungskette von Zement und Beton stehen auf dem Weg zur Klimaneutralität vor großen Herausforderungen. Hintergrund ist, dass bei der Herstellung von Zement bzw. seinem Vorprodukt Zementklinker große Mengen an CO_2 freigesetzt werden. Rund zwei Drittel davon entfallen auf rohstoffbedingte Prozessemissionen aus der Entsäuerung des Kalksteins und rund ein Drittel auf energiebedingte CO_2 -Emissionen aus dem Einsatz der für den Entsäuerungsprozess notwendigen Brennstoffe. Seit 1990 ist es den Zementherstellern im deutschsprachigen Raum gelungen, die CO_2 -Emissionen sowohl spezifisch als auch absolut in einer Größenordnung von 20 % bis 25 % zu reduzieren. Entscheidend für diese Minderungserfolge waren neben Verbesserungen der thermischen Effizienz vor allem zwei Faktoren:

- erstens die Senkung der Klinkergehalte im Zement und
- zweitens der verstärkte Einsatz biomassehaltiger alternativer Brennstoffe, durch die fossile Energieträger mehrheitlich ersetzt wurden.

Bei der weiteren Minderung ihrer CO_2 -Emissionen stößt die Zementindustrie jedoch zunehmend an Grenzen, denn insbesondere die prozessbedingten CO_2 -Emissionen der Klinkerherstellung sind mit konventionellen Maßnahmen nicht beliebig zu mindern. Sie benötigt dafür die Mitwirkung der gesamten Wertschöpfungskette, angefangen mit dem Anlagenbau und den Betonherstellern, über die bauausführende Industrie bis hin zu Planern und Architekten. Eine entscheidende Rolle bei der Dekarbonisierung von Zement und Beton werden dabei teils neue, CO_2 -effiziente Rohstoffe für die Klinker-, Zement- und Betonherstellung sowie CO_2 -effiziente Konstruktionsprinzipien spielen. Eine der wichtigsten Fragen im Hinblick auf den Einsatz CO_2 -effizienter Rohstoffe für die Klinker-, Zement- und Betonherstellung ist ihre Verfügbarkeit: Portlandzementklinker wird auf absehbare Zeit der wesentliche Bestandteil von Zement bleiben. Alternativen in ausreichender technischer Qualität, die den stetig wachsenden globalen Bedarf an Zement decken können, sind bislang nicht in Sicht. Tabelle 7 zeigt eine Auswahl an Bindemittelsystemen neben Portlandzement.

Tabelle 7. Übersicht über die derzeit verfügbaren bzw. sich in Entwicklung befindlichen Bindemittelsysteme neben Portlandzement [4.19]

Festigkeitsbildende Phase(n)	Zement/Binder
C-(A)-S-H:	Belit-Zement, Celitement
Aft/AFm/C-A-S-H:	Belit-Ca-Sulfoaluminat-Zement, AETHER, TernoCem, Naxt Base, ALIPRE ...
©-N-A-S-H:	Zeobond, E-Crete, HySSIL, GEOGREEN CRETE ... (Geopolymere)
CaCO_3 (Calcit, Aragonit): $\text{CaCO}_3/\text{amorphes SiO}_2$	Amorphes CaCO_3 (ACC-Vaterit) ... SOLIDIA (Wollastonit C/S ~ 1, CO_2), Carbstone ...
$\text{Mg-Cl/SO}_4\text{-H}$: $\text{MgPO}_4/\text{MgCO}_3$: Mg-S-H/MgCO_3 :	Sorel (1867, Steinholzböden) ... Mg-Phosphatzement (MPC) ... Novacem ...

Die Erforschung der Systeme ist vielfach noch im Laborstadium. Teilweise gibt es Demonstrationsobjekte und auch praktische Anwendungen. Die Marktentwicklung wird in einigen Fällen noch lange dauern. Aus heutiger Sicht wird es daher vielfach bei Nischenanwendungen bleiben (u. a. wegen der Rohstoffverfügbarkeit).

Daher bleibt die weitere Steigerung der Klinkereffizienz über die Senkung des Klinker/Zement-Faktors die wesentliche Herausforderung. Die Aufgabe besteht darin, die CO_2 -Bilanz des Betons weiter zu verbessern, ohne die technische Leistungsfähigkeit aus den Augen zu verlieren. Je nach Anwendungsfeld des Betons steht neben robusten Frischbetoneigenschaften und der Festigkeitsentwicklung die Dauerhaftigkeit im Mittelpunkt der Betrachtungen.

Die Studie „Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien“ des VDZ [4.3] betrachtet die Verfügbarkeit der Rohstoffe für zwei Szenarien: ein ambitioniertes Referenzszenario und ein Szenario Klimaneutralität.

- Das **ambitionierte Referenzszenario** basiert im Kern auf dem Einsatz heute verfügbarer CO_2 -Minderungstechnologien und legt hierbei sehr anspruchsvolle Annahmen zugrunde. Neben weiteren deutlichen Steigerungen der thermischen Effizienz und des Einsatzes biomassehaltiger alternativer Brennstoffe wird hier beispielsweise auch ein breiter Einsatz von CO_2 -effizienten CEM-II/C-Zementen angenommen, deren Normung mittlerweile abgeschlossen wurde. Mit einem Klinkeranteil zwischen 50 % und 65 % kann diese neue Zementart bereits heute deutlich zur CO_2 -Minderung beitragen. Zudem führen Weiterentwicklungen der Betonbauweise im Sinne der Ressourceneffizienz zu Materialein-

sparungen und damit auch in gewissem Umfang zur CO₂-Emissionsreduzierung.

- Das **Szenario Klimaneutralität** der zuvor genannten Studie geht über das ambitionierte Referenzszenario noch einmal hinaus und stößt damit an die Grenzen des aus heutiger Sicht technisch Machbaren. Wesentlicher Unterschied gegenüber dem Referenzszenario ist die zusätzliche Anwendung sog. Breakthrough-Technologien. Hierzu zählen etwa die Markteinführung von CEM-VI-Zementen mit einem Klinkeranteil zwischen 35 % und 50 % oder der Einsatz von Wasserstoff als Energieträger. Außerdem werden weitere Effizienzsteigerungen und Innovationen in der Herstellung und Anwendung von Beton angenommen. CO₂-Mengen in Höhe von rund 10,4 Mio. t pro Jahr werden dabei durch den flächendeckenden Einsatz von „Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS)“ Technologien reduziert. Zusätzlich können durch die nachhaltige Nutzung von biomassehaltigen Abfällen als Brennstoff bei gleichzeitiger CO₂-Abscheidung jährlich etwa 1,6 Mio. t CO₂ aus der Atmosphäre entnommen werden. Rechnerisch werden die Gesamtemissionen somit um mehr als 100 % verringert. Die Verwendung alternativer Bindemittel wurde nur im klimaneutralen Szenario betrachtet. Im Jahr 2050 werden ca. 5 % des Zementbedarfs durch neue Bindemittel gedeckt (2030: ca. 1 %).

Kompositzemente

Die Verwendung von klinkereffizienten Zementen macht im zuvor genannten Szenario „Klimaneutralität“ etwa 20 % der angenommenen Minderungen aus

und ist somit ein wichtiger Hebel. Dabei ist die Verwendung klinkereffizienter Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen nicht neu. Sie hat in vielen europäischen Ländern eine lange und erfolgreiche Tradition. Portlandhüttenzemente CEM II-S und Hochofenzemente CEM III mit Hüttensand als Hauptbestandteil neben dem Portlandzementklinker werden seit mehr als einem Jahrhundert industriell hergestellt und verwendet. Heute werden Hochofenzemente CEM III/A in einigen Regionen als Regelzemente für die Herstellung von Transportbeton im Hoch- und Ingenieurbau verwendet. Portlandkalksteinzemente CEM II/A-LL werden in Deutschland seit Beginn der 1980er-Jahre hergestellt und im Beton eingesetzt. Die Einführung erfolgte zunächst über allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen, im Jahre 1994 wurden Portlandkalksteinzemente in Deutschland, damals noch in der nationalen Zementnorm DIN 1164-10 [3.34], gemeinsam mit weiteren Portlandkompositzementen genormt. Von regionaler Bedeutung sind zum Beispiel Portlandölschieferzemente. Einige deutsche Zementhersteller haben in den vergangenen etwa 15 Jahren zudem Portlandkompositzemente CEM II/A-M und CEM II/B-M entwickelt und in den Markt eingeführt. Vor diesem Hintergrund hat sich der Anteil der Portlandzemente CEM I am Inlandsversand kontinuierlich verringert und der Anteil der CEM-II-Zemente hat entsprechend zugenommen (s. Bild 2).

Klinkereffiziente Zemente kommen in Europa also bereits seit vielen Jahren zum Einsatz, auch weil dadurch die CO₂-Emissionen aus der Zementherstellung reduziert werden können. Der Klinker/Zement-Faktor konnte in den letzten Jahrzehnten auf 71 % gesenkt und

Anteil am Inlandsversand der VDZ-Mitgliedsunternehmen

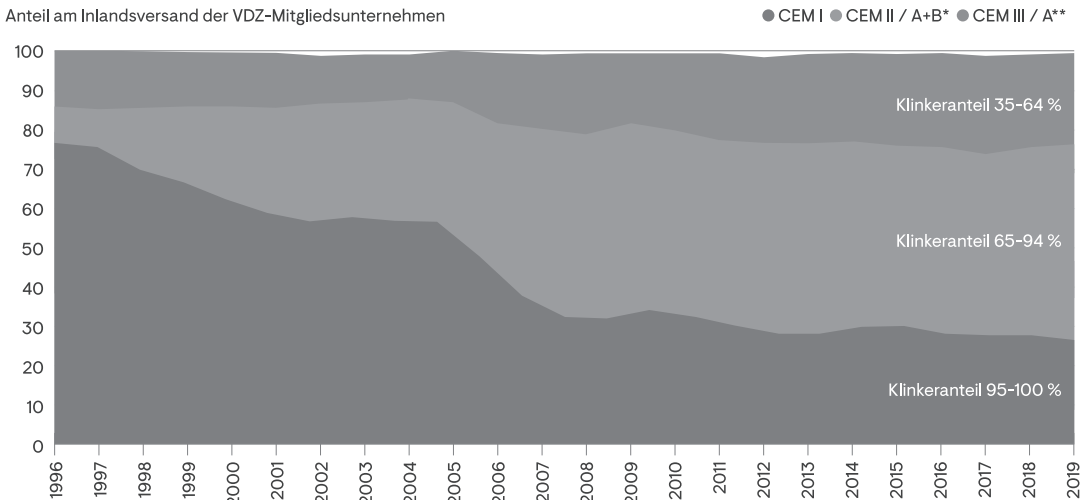
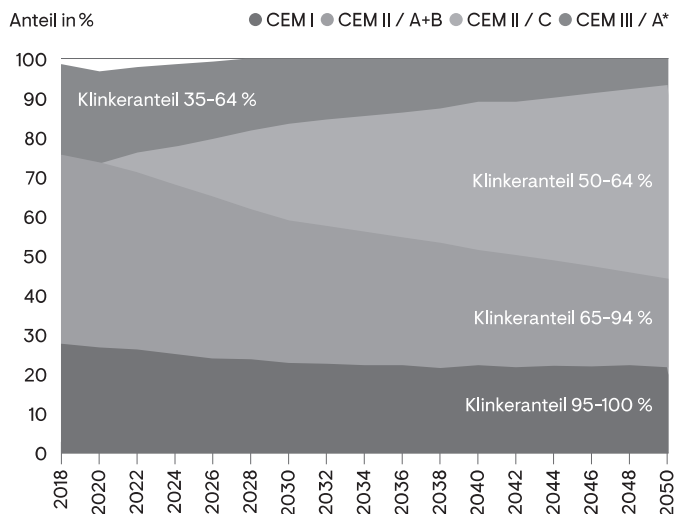


Bild 2. Trend zu klinkereffizienten Zementen im Produktmix der vergangenen Jahre [4.3]

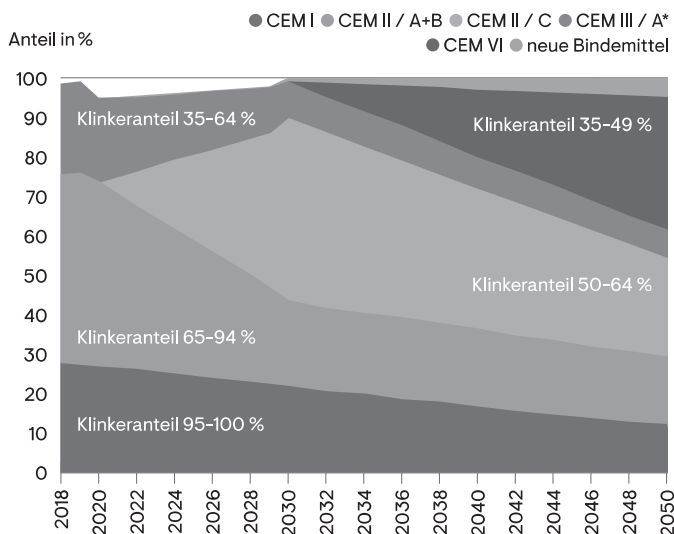
Anmerkungen: Differenz zu 100 % verteilt sich auf CEM IV, CEM V und sonstige Bindemittel

* CEM II/A+B unterteilt sich größtenteils in Portlandhütten-, Portlandkalkstein- und Portlandkompositzemente

** Deckt in Deutschland ca. 95 % aller CEM III-Zemente ab



a)



b)

Bild 3. Zementportfolio; a) im zuvor erwähnten ambitionierten Referenzszenario und b) im klimaneutralen Szenario [4.3]

damit in signifikanter Weise CO₂-Emissionen eingespart werden [4.3].

Für die zukünftige Entwicklung wurden in [4.3] Überlegungen für die beiden oben genannten Szenarien angestellt. Das Ergebnis dieser Überlegungen ist Bild 3 zu entnehmen. Die Herleitung und entsprechenden Details sind in [4.3] aufgeführt.

Die aktuellen Betonnormen DIN EN 206-1 [3.29] und DIN 1045-2 [3.30] enthalten die Anwendungsregeln für Normzemente in Abhängigkeit von den Expositionsklassen. Zum Zeitpunkt der Einführung dieser Normen etwa ab 2002 galten für einige Normzemente Anwendungsbeschränkungen, die vor allem auf die in Deutschland noch nicht hinreichenden praktischen Erfahrungen zurückzuführen waren. Da die derzeit gül-

tige Normausgabe aus dem Jahr 2008 datiert ist, sind die Anwendungsbeschränkungen noch enthalten.

In diesen Fällen wurde und wird auch heute noch der Nachweis der Eignung für die Anwendung in bestimmten Expositionsklassen durch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (Anwendungszulassung AZ) des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) erbracht. Aktuell (Auflistung des DIBt 06/2021) gibt es insgesamt 25 dieser Zulassungen (CEM II/B-M (S-LL): 13; CEM II/B-M (V-LL): 3; CEM II/B-M (T-LL): 2; CEM II/B-M (S-V): 1; CEM II/B-LL: 1; CEM II/A-P und CEM II/B-P: 1; CEM II/C-M (S-LL): 4).

Damit dürfen neben Portlandzementen folgende Zementarten in allen Expositionsklassen verwendet werden:

- Portlandhüttenzemente CEM II/A-S und CEM II/B-S,
- Portlandschieferzemente CEM II/A-T und CEM II/B-T,
- Portlandkalksteinzemente CEM II/A-LL,
- Portlandkalksteinzement CEM II/B-LL mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (Anwendungszulassung AZ),
- Portlandflugaschezemente CEM II/A-V und CEM II/B-V,
- Portlandpuzzolanzement CEM II/B-P mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (Anwendungszulassung AZ),
- Portlandkompositzemente CEM II/A-M mit den weiteren Hauptbestandteilen S, LL, T, D bzw. V,
- Portlandkompositzemente CEM II/B-M mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (Anwendungszulassung AZ),
- Hochofenzemente CEM III/A (Expositionsklasse XF4: CEM III/A der Festigkeitsklasse $\geq 42,5$ N oder der Festigkeitsklasse 32,5 R mit bis zu 50 M.-% Hüttensand) und CEM III/B (CEM III/B darf in XF4 für die folgenden Anwendungsfälle verwendet werden:
 - (a) Meerwasserbauteile: $w/z \leq 0,45$; Mindestfestigkeitsklasse C35/45 und $z \geq 340 \text{ kg/m}^3$;
 - (b) Räumlerlaufbahnen $w/z \leq 0,35$; Mindestfestigkeitsklasse C40/50 und $z \geq 360 \text{ kg/m}^3$)

Portlandkompositzemente CEM II/C-M mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (Anwendungszulassung AZ) können derzeit generell für alle Expositions-klassen außer XF2, XF3 und XF4 verwendet werden. Auf der Grundlage der Untersuchungen in [4.20] wird diese Regelung für CEM II/C-M (S-LL)-Zemente auch in der nächsten Ausgabe der Betonnorm DIN 1045-2 enthalten sein. Betone für den üblichen Hochbau (Innenbauteile XC1 und Außenbauteile XC4/XF1) können je nach Verfügbarkeit mit allen zuvor genannten Zementen hergestellt werden. Mit einem entsprechenden Nachweis (06/2021: eine Zulassung) ist auch die Anwendung in allen Expositions-klassen möglich. Wie zuvor beschrieben, stehen für Betone für den üblichen Hochbau (Innenbauteile XC1 und Außenbauteile XC4/XF1) je nach Verfügbarkeit alle genannten Zementarten zur Verfügung. Die Festigkeitsentwicklung von Betonen mit CEM II- und CEM III/A-Zementen ist unter baupraktischen Bedingungen ebenfalls vergleichbar. Um den Anforderungen der Praxis an die Frühfestigkeit zu genügen, werden CEM II/B- und CEM III/A-Zemente in vielen Fällen in der Festigkeitsklasse 42,5 N angeboten.

In Bild 4 ist die relative Druckfestigkeitsentwicklung von Betonen auf Basis handelsüblicher CEM I-, CEM II- und CEM III/A-Zemente der Festigkeitsklassen 32,5 R und 42,5 N bei vergleichbaren Betonzusammensetzungen und Lagerungsbedingungen beispielhaft dargestellt. Die Relativwerte ergeben sich aus dem Bezug der Betondruckfestigkeit im Alter von 2, 7 bzw. 28 Tagen auf die 28-Tage-Druckfestigkeit des Be-

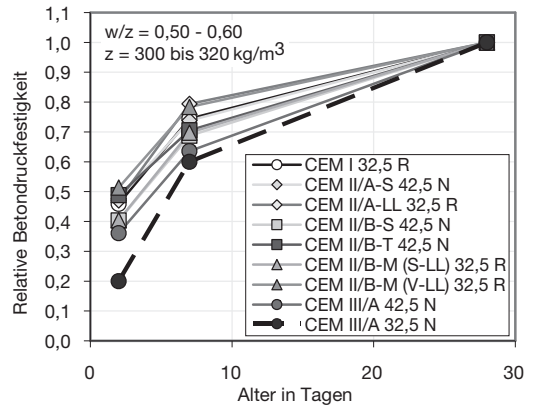


Bild 4. Relative Druckfestigkeit von Betonen mit verschiedenen CEM II- und CEM III/A-Zementen im Vergleich zu CEM I-Beton [4.21]

tons. Zum Vergleich sind ergänzend die Prüfwerte für einen CEM III/A 32,5 N enthalten. Die ausgewiesenen Ergebnisse ermöglichen die Einstufung der untersuchten Betone in die mittlere bzw. langsame Festigkeitsentwicklung. Dementsprechend ist hier der Beton mit dem Zement CEM III/A 32,5 N als langsam einzustufen. Diese Einstufung ist maßgebend für die Dauer der Nachbehandlung [4.21].

Die mit der Herstellung einer Tonne Zement verbundenen CO₂-Emissionen – ausgedrückt als Global Warming Potential (GWP) in kg CO₂-Äquivalent je Tonne Zement – sind aber durchaus unterschiedlich. Bild 5 zeigt dies am Beispiel des mittleren Zements CEM II im Vergleich zu CEM I (Portlandzement) und CEM III/A (Hochofenzement mit 50 % Hüttensand) aus Deutschland. Die Frage, welche Zementart bei vergleichbarer technischer Leistungsfähigkeit in einem Transportbetonwerk, einem Fertigteilwerk oder einer anderen Anwendung zum Einsatz kommt, hängt maßgeblich auch von der Verfügbarkeit der Ausgangsstoffe ab. Bei Vorgaben bzgl. zu verwendender Betonausgangsstoffe bzw. Betone sind somit immer auch die örtlich vorhandenen und verfügbaren Ressourcen zu beachten. Es kommt also auf eine gute Kommunikation der am Bau Beteiligten an.

In der nächsten Generation der Betonnormen DIN 1045 sind daher unter dem Stichwort „BetonBauQualität BBQ“ zwecks Austauschs relevanter Informationen und der Abstimmung wesentlicher Entscheidungen in vielen Fällen verbindliche BBQ-Ausschreibungs- und BBQ-Ausführungsgespräche vorgesehen. Im BBQ-Ausschreibungsgespräch erarbeiten Objektplaner, Tragwerksplaner, Ausschreibende und ein Experte für Betonbautechnik gemeinsam die Festlegungen für die Ausschreibung zur Herstellung, den Einbau und die Nachbehandlung von Beton unter Einbeziehung der projektspezifischen Randbedingungen, u. a. auch bzgl. der Nutzung von örtlich vorhandenen und

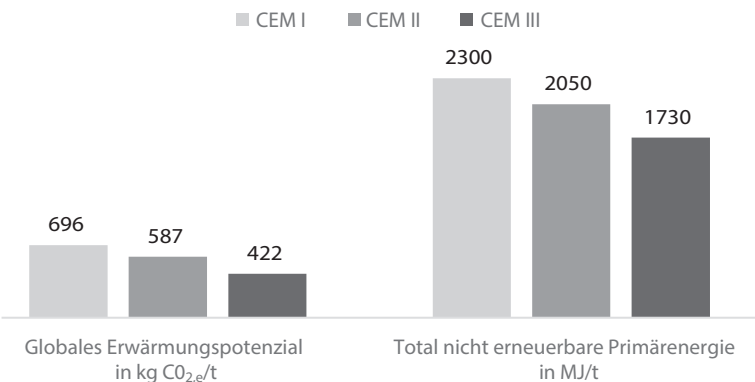


Bild 5. Globales Erwärmungspotenzial (GWP) und nicht erneuerbare Primärenergie von Zement in Deutschland: generischer mittlerer Zement CEM II, generischer Portlandlandzement CEM I, generischer Hochofenzement CEM III/A mit 50 % Hüttensand [4.22]

verfügbaren Ressourcen. Hier können dann ebenfalls gemeinsam Ziele für Ressourceneffizienz und Klimaverträglichkeit vereinbart werden. Tabelle 8 zeigt in Zeile 5 die heute mit der Herstellung von 1 m³ Beton im Mittel verbundenen CO₂-Emissionen – ausgedrückt als Global Warming Potential (GWP) in kg CO₂-Äquivalent je m³ Beton, auf Basis der Umweltproduktdeklarationen für Beton. Die Tabelle enthält zur Orientierung außerdem Werte für Betone, die bzgl. der zu ihrer Herstellung notwendigen Treibhausgasemissionen 20 % bzw. 30 % besser wären als der Durchschnitt oder bis zu 20 % über dem heutigen Durchschnitt liegen. Neben einer Einteilung anhand der Einheit kg CO₂-Äquivalent/m³ Beton zeigt Tabelle 9 eine Darstellung unter Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit des Betons (CO₂-Äquivalent/(m³ Beton × MPa)). Die Anwendbarkeit nach Expositionsclassen ist zu berücksichtigen. Die Werte in den Zeilen 4, 5 und 6 sind im Prinzip für alle Betone bzw. Betonbauteile für den üblichen Hochbau (Innenbauteile XC1 und Außenbauteile XC4/XF1) verwendbar. In den höheren Festigkeitsklassen sind die leistungsbezogenen Treibhausgasemissionen somit geringer als in den niedrigen

Festigkeitsklassen. Damit sollte der Planer/die Planerin natürlich nicht per se zu höheren Festigkeitsklassen greifen, wenn dies statisch oder aus Gründen der Dauerhaftigkeit nicht notwendig ist. Sinnvoll ist dies aber bei solchen Bauteilen, bei denen durch eine höhere Druckfestigkeit des Betons der Querschnitt des Bauteils und damit Materialeinsatz und auch CO₂ verringert werden können. Es sei nochmals betont, dass bei Vorgaben bzgl. zu verwendender Betonausgangsstoffe bzw. Betone immer die bautechnischen Anforderungen sowie die örtlich vorhandenen und verfügbaren Ressourcen zu beachten sind. Es kommt also auf eine gute Kommunikation und Abstimmung der am Bau Beteiligten an. So ließen sich bereits heute bei vergleichbarer technischer Leistungsfähigkeit bevorzugt Betone unter Verwendung klinkeffizienter Zemente (z. B. CEM II- bzw. CEM III-Zemente) verwenden. Dabei sind jedoch regionale Unterschiede in der Verfügbarkeit der Zemente bzw. der für ihre Herstellung notwendigen Rohstoffe zu beachten.

Tabelle 8. Orientierungswerte für Treibhausgasemissionen von Beton

1	Bezeichnung	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C45/55	C50/60
2		Treibhausgasemissionen (kg CO ₂ e/m ³ Beton)					
3	Beton z. B. mit CEM VI o. Ä.	150	160	180	200	230	250
4	Beton z. B. mit CEM III/A, CEM II/C o. Ä.	170	180	210	230	260	280
5	Beton heutiger Durchschnitt *)	210	230	260	290	330	350
6	Beton z. B. mit CEM I o. Ä.	250	280	310	350	400	420

*) Werte inkl. Verbrennung von Abfällen bei der Klinkerherstellung, gerundet auf die nächste „10er-Stelle“

1 Einleitung

Die erhöhte Leistungsfähigkeit von Computern und Programmen erlaubt es, immer größere Datensätze zu generieren und zu verarbeiten. Dadurch kann man Prozesse effektiver gestalten, komplexere Strukturen planbar (und damit auch baubar) machen – und vor allem die Frage der Ressourceneffizienz holistisch angehen. Dies ist vielleicht die wichtigste Konsequenz der Digitalisierung und sollte als übergeordnetes Ziel angesehen werden – denn wenn Architekten und Ingenieure dazu beitragen wollen, die Ziele der Pariser Klimakonferenz zu erreichen, brauchen wir dringend einen anderen Umgang mit den natürlichen Ressourcen und mit den klimaschädlichen Emissionen, die aus unserem eigenen Schaffen resultieren. Die Tatsache, dass das Bauwesen immer noch für mehr als 50 % des Ressourcenverbrauchs und mehr als 40 % der Treibhausgasemissionen (einschließlich der Baumaterialtransporte) steht [1], ist ein klares Signal dafür, dass wir in den kommenden Jahren vieles radikal ändern müssen [2]. Diese Änderungen sollten dazu führen, dass ökologische und ökonomische Aspekte durch innovative Lösungen und mit einem ganzheitlichen Denkansatz entlang der gesamten Wertschöpfungskette vom Entwurf zum Bau und darüber hinaus berücksichtigt werden. Hierbei können digitale Werkzeuge helfen – vorausgesetzt, sie werden sinnvoll eingesetzt.

Der zunehmende Einsatz von Methoden wie BIM (*Building Information Modelling*) in den letzten Jahren hat gezeigt, dass Prozesse mithilfe dieser Werkzeuge deutlich verbessert werden können: Relevante Informationen zu Gebäuden können viel leichter zwischen verschiedenen Fachplanern ausgetauscht werden. Dies dient nicht nur der Koordination, sondern unterstützt auch die Integration verschiedener Expertisen – selbst in frühen Planungsphasen. Die Grundlagen hierfür werden in Abschnitt 2 erläutert. Da Fertigung und Bau immer mehr durch numerische Modelle bestimmt werden, stellt sich die Frage, ob digitale Werkzeuge nicht die einmalige Chance bieten, die heute noch fragmentierte Kette von der ersten Skizze bis zum fertigen Bauwerk anders und effektiver zu gestalten.

Traditionell ist das Planen und Bauen durch verschiedene Leistungsphasen geprägt, welche sequenziell aufeinander folgen [3]. Bei jeder Phase sind verschiedene Akteure involviert; oft sind die Planer, welche konzeptionell am Anfang stark beteiligt waren, während der Ausführung nicht mehr aktiv im Projekt vertreten. Dies führt immer wieder zu Informationsverlusten und zu späten Änderungen, die nicht konsequent durchdacht sind, mit teils gravierenden Folgen für Kosten und Termine. Hinzu kommt, dass der Informationsaustausch selbst bei komplexen Bauvorhaben immer noch durch 2D-Pläne erfolgt, was zu deutlichen Informationsverlusten bzw. zu wiederholter Arbeit führt. Statt Änderungen als Optimierungschance in einem evolutionären Prozess zu sehen, wird im konventionel-

len Bauprozess jede Änderung schnell ein Anlass für Schuldzuweisungen bezüglich Kostensteigerungen und Terminverzögerungen. Es ist nicht leicht, diese über Jahrzehnte eingefahrene Herangehensweise zu ändern. Aber auch andere Branchen wie der Maschinen- oder Flugzeugbau haben die Aufgabe bewältigt, ihre Prozesse zu erneuern und ihre Zukunftsfähigkeit durch Innovationen unter Beweis zu stellen.

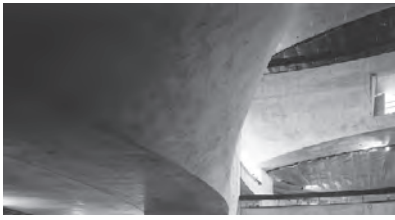
Zwei Projektbeispiele aus den letzten zehn Jahren zeigen, wie digitale Werkzeuge entlang der gesamten Wertschöpfungskette eingesetzt werden können, um das Planen und Bauen auch im Hinblick auf steigende Komplexität effizienter zu gestalten. Diese Projekte bauen unter anderem auf der Erfahrung auf, die das Büro Werner Sobek bereits Anfang des 21. Jahrhunderts bei der Planung der komplexen Betontragwerke für das Mercedes-Benz Museum sammeln konnte. Verschiedene digitale Werkzeuge wurden damals speziell für den Umgang mit der extrem komplexen Geometrie dieses von UN Studio entworfenen Gebäudes entwickelt, angepasst und getestet (Bild 1). Diese Werkzeuge kamen sowohl bei der Berechnung des Tragwerks als auch bei der Entwicklung und Fertigung der Schalung zum Einsatz [4]. Die weitere Entwicklung in der Praxis zeigte inzwischen, dass eine solche Arbeitsweise nicht nur eine hohe Qualität und eine bessere Kontrolle von Terminen und Kosten in verschiedenen Plan- und Bauphasen ermöglicht – sie bietet auch das Potenzial für eine höhere Ressourceneffizienz. Maßgebend hierfür sind Prozesse, bei denen alle Akteure – idealerweise von Anfang an – involviert sind.

Aktuelle Arbeiten im Bereich Forschung und Entwicklung zeigen zudem, wie das Planen und Bauen in den kommenden Jahren innovativer gestaltet werden könnte. Es geht dabei nicht nur darum, wie die Planungs- und Fertigungsprozesse optimiert werden können, sondern auch welche Möglichkeiten durch neue Betonbauweisen (Gradientenbeton, additive Fertigung etc.) entstehen bzw. welche Bilanzierungsmöglichkeiten integriert werden können, um eine höhere Ressourceneffizienz zu ermöglichen.

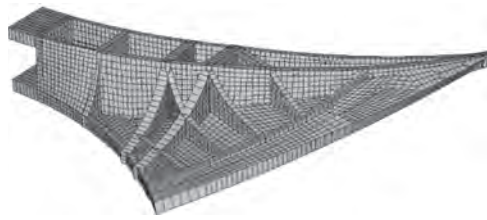
In unserer Erfahrung bleibt letztendlich – auch in einer starken digitalisierten Umgebung – der Beitrag und der kreative Einsatz der Planer essenziell, denn es geht bei jedem Projekt darum, die in einer ganzheitlichen Perspektive sinnvollste Lösung zu entwickeln. Dies wird in den Beispielen aus Praxis und Forschung, welche in den Abschnitten 3 bis 5 aufgeführt sind, ersichtlich. Digitalbasierte Methoden und Werkzeuge sind dabei sehr wichtige Hilfsmittel, die den Planern viele neue Wege eröffnen.

2 Die BIM-Methode: Einfluss beim Planen und Bauen

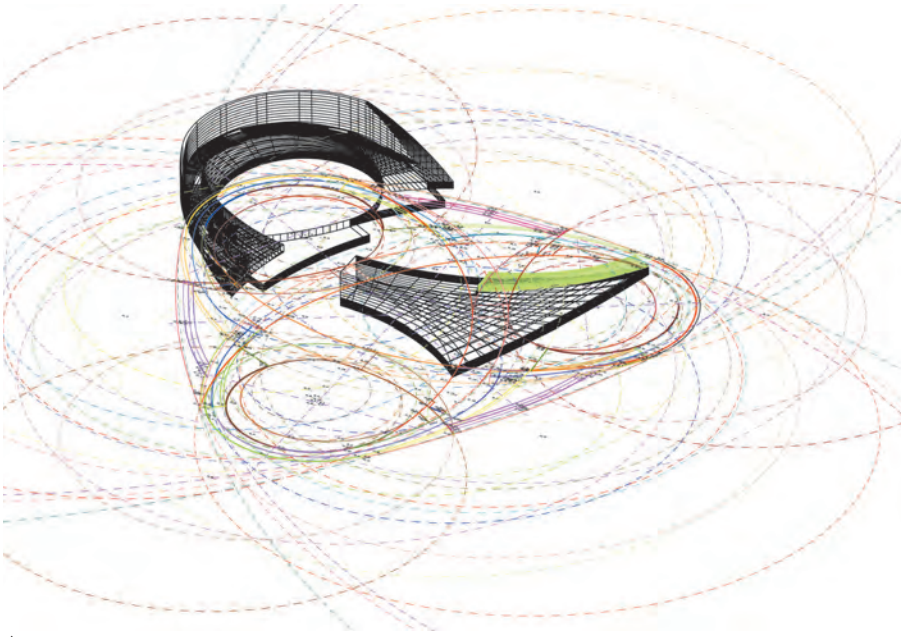
BIM ist eine Methode zur Optimierung von Planung, Ausführung, Betrieb und Rückbau eines Bauwerks.



a)



b)



c)

Bild 1. Mercedes-Benz Museum; a) Sicht von innen (Brigida Gonzalez), b) Tragwerksmodell des „Twist“-Bereichs (© Werner Sobek AG), c) geometrische Analyse (© UN Studio)

Verwendet wird dabei ein digitaler Zwilling, der die geometrischen Daten ebenso wie eine Vielzahl an weiteren Informationen (alphanumerische Attribute) enthält. BIM ersetzt nicht die Kerntätigkeiten der einzelnen Fachplaner; diese werden aber unterstützt, indem Projektdaten computerlesbar und offen austauschbar sind [5].

Klassische Strichzeichnungen können – selbst, wenn sie als digitale CAD-Zeichnungen entstanden sind – in der Regel von Computern nicht interpretiert werden [6]. Hierdurch können sie auch nicht automatisiert verarbeitet werden. Aus diesem Grund konnte die Konsistenz solcher Zeichnungen bislang nur manuell geprüft werden [6] – nicht nur aufgrund der großen Anzahl an involvierten Akteuren eine bedeutende Fehlerquelle. Viele Fehler wurden (und werden) oft erst im Rahmen der Ausführung entdeckt, was zu Kostensteigerungen und Terminverzögerungen führt.

BIM ist objektorientiert und parametrisch aufgebaut: Jedes Objekt steht für ein Bauelement und hat Beziehungen zu anderen Elementen [5]. Dadurch es ist möglich, Prozesse wie die oben genannte Konsistenzprüfung zu automatisieren und eine kollaborative und interaktive Planung auf Grundlage des gleichen Modells zu realisieren. Das Prinzip selbst ist nicht neu: Digitale Zwillinge werden in vielen Branchen wie zum Beispiel in der Produktentwicklung und -fertigung, schon lange verwendet [6]. Im Gegensatz zur industriellen Produktion liegt der Fokus bei den Bauprozessen aber auf Unikaten; zudem ist die Wertschöpfungskette über eine Vielzahl von Unternehmen (Architekten, Fachplaner, Baufirmen) verteilt [6], was zu einer viel höheren Anzahl an Schnittstellen bei einem deutlich reduzierten Wiederholungsgrad in Planung und Fertigung führt. Die Koordination der verschiedenen Akteure ist dementsprechend besonders wichtig und wird in der Regel von den Objektplanern übernommen, die einen BIM-

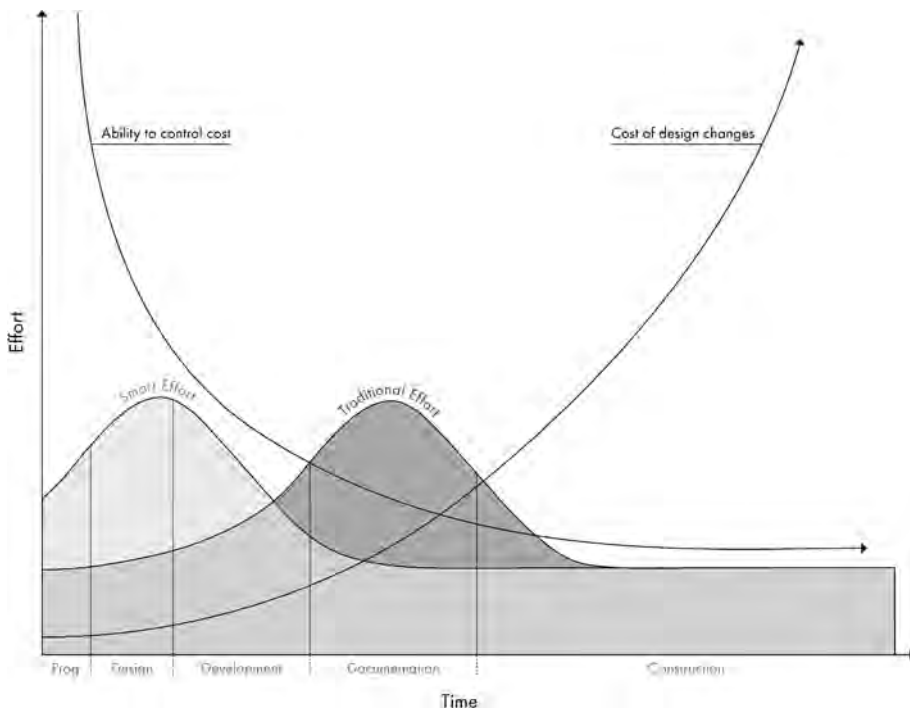


Bild 2. Die MacLeamy Kurve [7]

Gesamtkoordinator für ein Projekt benennen. Aufseiten des Auftraggebers definiert ein übergeordneter BIM-Manager entsprechende Regeln zu Workflows, Projektzielen und Methoden und prüft deren Einhaltung. Die einzelnen Planungsschritte sind dabei transparent, weil jeder sehen kann, welche Auswirkungen sein Handeln auf andere Gebäudeteile hat. Dies stellt einen Paradigmenwechsel in Richtung integraler Planung dar [6], hat aber auch einen starken Einfluss auf die Arbeitsverteilung entlang der Zeitschiene. Die Verwendung der BIM-Methode verursacht in den ersten Phasen höhere Planungskosten. Die gute Verfügbarkeit an Informationen (Kollisionsprüfungen, Ergebnisse aus Simulationen und Analyse etc.) hilft aber dabei, fundierte Entscheidungen frühzeitig und mit einer guten Wissensbasis zu treffen und wirkt so auch unvorhergesehenen Kostensteigerungen während der Bauphase entgegen. Dies wurde u. a. von Patrick MacLeamy, Chairman der buildingSMART¹⁾ und ehemaliger CEO des amerikanischen Planungsbüros HOK, in einer einfachen Kurve gezeigt (s. Bild 2).

OpenBIM bedeutet, dass nicht nur eine *Softwareplattform* verwendet wird (*closedBIM*), sondern dass verschiedene Programme eingesetzt werden und die verschiedenen Modelle bzw. deren Ergebnisse durch Aus-

tauschformate koordiniert und integriert werden. Das am meisten verbreitete Format heißt IFC (*Industry Foundation Class*): Dieses stellt eine Kopie des ursprünglichen Modells mit Geometrie und Attributen dar, lässt aber keine Editierung zu [5]. Eine solche Arbeitsweise erlaubt es nicht nur, entlang der gesamten Kette zwischen Planung und Rückbau immer die bestmöglichen Programme einzusetzen, sondern öffnet die Tür zur Integration von verschiedenen Simulationsprogrammen in den laufenden Prozess. In der Tragwerksplanung wird es aufgrund der steigenden Komplexität der Bauwerke immer wichtiger, die Bemessung des Tragwerks mit der geometrischen und funktionalen Beschreibung zu koppeln. Dadurch können Geometrie- bzw. Profiländerungen automatisiert in den Berechnungsmodellen berücksichtigt werden. Bauteile, die als kritisch identifiziert wurden, können leichter korrigiert werden. Die Tatsache, dass diese interaktiven und bidirektionalen Anpassungen automatisch oder semi-automatisch erfolgen, minimiert das Risiko von Fehlern und erhöht die Prozesseffizienz.

Die Kopplung von intra- und interdisziplinärer Kollisionskontrolle erlaubt es, von Änderungen betroffene Bauteile viel schneller und leichter zu identifizieren und in den einzelnen (Teil-)Modellen anzupassen. Über den openBIM standard bcf (*BIM collaboration format*) können diese Änderungen offen und dokumentierbar mit weiteren Projektbeteiligten ausgetauscht werden. Die einheitliche 3D-Modellierung der

1) Building Smart ist eine internationale Organisation, welche die Entwicklung von Normen für openBIM vorantreibt.

maßgebenden Bauteile erlaubt es, diesen Prozess bereits in frühen Planungsphasen durchzuführen – bislang erfolgt dies erst im Rahmen der Ausführungsplanung oder gar während des Baus. Dies spart Kosten und verbessert die Terminplanung. Zudem erfolgt die Kollisionskontrolle zum Großteil automatisch. Sobald Kollisionen erkannt werden, können die betroffenen Fachplaner durch eine sinnvolle Klassifizierung und eine zentrale Kommunikationsplattform die Kollisionen mit relativ geringem Aufwand beheben [6].

Weitere wichtigen Analysen, die sich in die laufende Planung integrieren lassen, sind die Betrachtungen von Bauphysik und Lebenszyklus; diese unterstützen eine immer fundiertere Prüfung der Entwurfsentscheidungen und tragen zur Optimierung sowie einer gesteigerten Ressourceneffizienz bei. Die durch BIM ermöglichte Interaktion zwischen vielen verschiedenen Computerprogrammen macht deutlich, wie essenziell die Beherrschung der verschiedenen Schnittstellen ist. Denn der korrekte Austausch von Informationen zwischen den für Modellierung, Bemessung, Simulation, Ausführung, Koordination und Kommunikation verwendeten Programmen ist bislang – trotz der Bemühungen der verschiedenen Hersteller – alles andere als sicher bzw. einfach. Die Erfahrung zeigt (siehe Projektbeispiele in Abschnitt 3 und Bild 4), dass bislang vieles noch ad hoc entwickelt und programmiert werden muss.

Trotz zunehmender Rechnerkapazitäten bleibt die Entscheidung, welche Informationsmenge in den verschiedenen Planungs- und Ausführungsphasen für ein bestimmtes Modell verwendet wird, von besonderer Bedeutung. Denn: Nicht benötigte Daten machen die Modelle schwer verwaltbar und erhöhen den Planungsaufwand exponentiell. Hieraus resultieren Mehrkosten, aber keine planerischen Vorteile. Das American Institute of Architects (AIA) hat sich bereits vor mehr als 15 Jahren mit diesem Thema auseinandergesetzt und fünf Detaillierungsstufen (LOD: *Level of Development*) vorgeschlagen (s. Bild 3, [8]). Dabei soll unterschieden werden zwischen geometrischen Daten (LOG: *Level of Geometry*) und anderen Informationen (LOI: *Level of Information*). In der klassischen Planung war der Informationsinhalt durch den Planmaßstab gesteuert: Da beim BIM in parametrischen 1:1-Modellen gearbeitet wird, muss die Informationstiefe jetzt anders geregelt

werden. In Europa begann die Auseinandersetzung mit diesen Themen später als in Amerika. Die EN ISO 19650 [9] wurde erst kürzlich eingeführt; sie ist aber hauptsächlich aus dem Blickwinkel von Auftraggebern entwickelt worden, sodass die maßgebenden Planungs- und Ausführungsaktivitäten eher nebenbei angesprochen werden [5].

Wichtiger für Planung und Ausführung sind daher die umfangreichen Informationen, die in VDI 2552 [10] enthalten sind (s. Tabelle 1). Die Richtlinie beleuchtet allgemeine Themen (z. B. Blatt 5: Datenmanagement) ebenso wie fachspezifische Angelegenheiten (Blatt 11.3: Schalungs- und Gerüsttechnik) und liefert dadurch einen strukturierten Ansatz für die effektive Implementierung von BIM in die Prozesse des Planens, Bauens und Betreibens. Dies spiegelt die international bewährten Regeln der Technik, Erfahrungen und Entwicklungen bei der Anwendung von BIM wider.

Die zitierten Richtlinien helfen, einen Gesamtrahmen zu definieren; die Vorgabe bei der Projektbearbeitung müssen aber spezifischer sein und entsprechend den Projektzielen und den Bauherrenwünschen definiert werden. Hierzu dient der BIM-Abwicklungsplan (BEP: *BIM Execution Plan*). Er definiert, wie Informationen und Modelle verwaltet, dokumentiert und übermittelt werden. Hierzu gehört auch eine Beschreibung der Rollen und Verantwortlichkeiten der einzelnen Projektpartner. Der BEP benennt darüber hinaus die einzuhaltenden Genehmigungsprozesse, die bereits vorhandenen Informationen und die relevanten Projekt-Meilensteine. Das Papier definiert für jeden Meilenstein die Detaillierungsstufe (LOD), die bis zu einem bestimmten Punkt erreicht sein muss. In letzter Instanz ist in der Erfahrung der Autoren die Entscheidung, was und wie modelliert werden wird, während Planungsbesprechungen zwischen den Beteiligten auf Basis der Projektziele und Bedürfnisse zu finalisieren [11].

Die mögliche Kopplung der Fertigungsinformationen an die Planungsinformationen ist eine effiziente und vielversprechende Erweiterung der BIM-Methode. Da die Fertigungsprozesse insbesondere bei komplexen Bauvorhaben bereits heute sehr stark durch Computer unterstützt werden (CAM: *computer aided manufacturing*), ist diese Integration sinnvoll und wichtig. Informationsverluste und Fehler werden vermie-

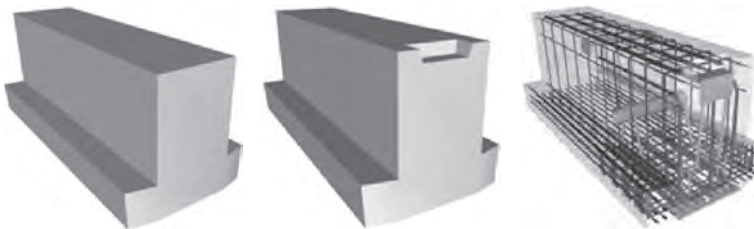


Bild 3. Genauigkeitsgrad der Darstellung eines Modellelements nach dem BIM-Forum [8]

Tabelle 1. Ausarbeitungsgrad je nach HOAI Leistungsphase und LOD [10]

Level of Development	HOAI Leistungsphase	Ausarbeitungsgrad (LOG/LOI)	Planableitung Planmaßstab
LOD 100	LPH 1 (Grundlagenermittlung) LPH 2 (Vorentwurfsplanung)	Das Modellelement wird sehr vereinfacht mithilfe eines Symbols oder einer generischen Repräsentation dargestellt. Des Weiteren werden wesentliche Eigenschaften definiert, die für die Vorplanung (konzeptionelle Planung) erforderlich sind.	1 : 500 bis 1 : 200
LOD 200	LPH 3 (Entwurfsplanung) LPH 4 (Genehmigungsplanung)	Das Modellelement wird mit seiner ungefähren Position und Geometrie sowie wichtigen Eigenschaften angegeben. Ganz wesentlich sind Informationen zur Kostenberechnung, z. B. nach DIN 276.	1 : 200 bis 1 : 100
LOD 300	LPH 5 (Ausführungsplanung)	Das Modellelement wird mit seiner genauen Position und Geometrie für die Ausführungsplanung angegeben. Auf Basis dieses Modellelements kann die eigentliche Arbeitsvorbereitung erfolgen. In der Regel wird dieser Ausarbeitungsgrad auch für die Ermittlung der Mengen und das Aufstellen von Leistungsverzeichnissen verwendet.	1 : 50 bis 1 : 20
LOD 400	LPH 8 (Ausführungsphase, Objektüberwachung)	Das Modellelement enthält alle geometrischen und alphanumerischen Informationen, die für die Erstellung oder den Umbau des Elements erforderlich sind. Hierzu gehören auch Montageanweisungen und die im Rahmen der Arbeitsvorbereitung spezifizierten Bauverfahren.	≥ 1 : 20
LOD 500	LPH 9 (Objektbetreuung)	Das Modellelement repräsentiert das reale Element bezüglich Position und Geometrie. Des Weiteren werden Informationen zur Bauüberwachung und Dokumentation gespeichert.	

den, da ein durchlaufender computerunterstützter Prozess vom Entwurf bis zur Fertigung gesichert ist. Zudem sind Änderungen im Lauf der Ausführungsplanung und der Fertigung viel leichter zu überprüfen (Kollisionskontrolle, Tragfähigkeit der Elemente, Einfluss auf verschiedenen Simulationen oder auf die Lebenszyklusanalyse etc.).

Die resultierende integrale Wertschöpfungskette hat in der Regel eine maßgebende Informationsquelle (SSoT: *Single Source of Truth*), in der die wesentlichen Daten und geometrische Informationen hinterlegt sind. Da die Fertigungsprogramme in der Regel etwas anders als die üblichen BIM-Programme aufgebaut sind, erfordert dies die Steuerung einer weiteren Schnittstelle. Dieser Aufwand lohnt sich, wie die folgenden Projektbeispiele zeigen, auch wenn an verschiedenen Stellen sicher noch Verbesserungsbedarf besteht (s. dazu den Bericht zum Projekt Digital Twin in Abschnitt 5.4).

Aus den erläuterten Projekten wird klar, dass einige der verwendeten digitalen Hilfsmittel auf die BIM-Methode bzw. ihre Erweiterung zurückzuführen sind; andererseits basiert vieles auch auf der Leistungssteigerung von Berechnungs- und Simulationsprogrammen, die zum Teil seit Langem im Einsatz sind. Deswegen ist im Folgenden eher von digitalen Werkzeugen als nur allgemein von „BIM“ die Rede.

3 Das Bahnprojekt Stuttgart 21

3.1 Projektbeschreibung und Tragwerk

Das Bahnprojekt Stuttgart Ulm („S21“) ist das größte Ausbaukonzept für den öffentlichen Schienenverkehr in Baden-Württemberg seit dem 19. Jahrhundert. Es umfasst neben dem Neubau von zahlreichen Tunneln und Trassen auch eine komplette Umgestaltung des Eisenbahnknotens Stuttgart. Hierbei wird der alte Kopfbahnhof durch einen neuen achtgleisigen unterirdischen Durchgangsbahnhof ersetzt. Durch die neue, unterirdische Streckenführung können umfangreiche Gleisflächen im Zentrum Stuttgarts rückgebaut und durch Parkanlagen und ein neues Stadtquartier, das 85 Hektar große, nachhaltige und klimagerechte Rosenstein-Quartier, ersetzt werden. Für Stuttgart ist das Projekt daher nicht nur ein Infrastrukturprojekt, sondern auch und insbesondere ein städtebauliches Projekt, das in Zeiten der zunehmenden Urbanisierung und Wohnraumknappheit ein erhebliches Entwicklungspotenzial bietet.

Der Neubau des Bahnhofs macht dabei nur einen von insgesamt 57 Streckenkilometern des Projekts aus, ist aber sicherlich dessen Herzstück. Die neue Stuttgarter Bahnsteighalle ist unmittelbar hinter dem historischen und weiterhin genutzten Empfangsgebäude positioniert. Sie schließt im Nordosten und Südwesten an Tunnelköpfe an, welche die Verbindung zu dem un-

terirdischen Schienennetz bilden. Dabei muss die Halle einerseits tief genug liegen, um eine städtebaulich fließende oberirdische Parknutzung zu ermöglichen, ist aber andererseits in der Ausdehnung nach unten ebenfalls durch die noch tiefer liegende S-Bahn limitiert. Geometrisch kann die Bahnsteighalle daher nur mit einer sehr begrenzten Konstruktionshöhe realisiert werden. Gleichzeitig sollte die Halle aber eine offene und großzügige Atmosphäre bieten und durch Tageslicht beleuchtet werden. Aus diesen Randbedingungen heraus entwickelte *Christoph Ingenhoven* eine schalenartige Form, mit der es gelang, bei vergleichsweise geringer Bauhöhe weit zu spannen und gleichzeitig flexibel auf die diversen Anschlusspunkte zu reagieren [12].

Die Formfindung erfolgte in Kooperation mit *Frei Otto* und orientierte sich an physikalischen Methoden, die am Institut für Leichte Flächentragwerke (heute ILEK) der Universität Stuttgart entwickelt wurden und bereits bei verschiedenen anderen Projekten (zum Beispiel beim deutschen Pavillon auf der Weltausstellung in Montreal im Jahr 1967) verwendet worden waren. Mittels Seifenhaut- und Hängemodellen wurde eine Membranfläche generiert. Dies ist eine Fläche, in der infolge der Eigengewichtslasten ein isotroper, gleichmäßiger Zugspannungsverlauf wirkt. Um singuläre Kräfte in diese Membranflächen einzuleiten, wird die Form mit Löchern (sogenannten Lichtaugen) versehen; so können Spannungsspitzen an den Lasteinleitungspunkten, vermieden werden. Da bei der Stuttgarter Bahnhofshalle neben den Eigengewichtslasten zusätzlich eine erhebliche Auflast aus der neuen Parkanlage zur berücksichtigen war, ließ sich eine vorgespannte, zugbeanspruchte Seilnetzkonstruktion nicht realisieren. Die im Hängemodell entwickelte Form wurde also „eingefroren“ und entsprechend der sogenannten „Umkehrmethode“ auf den Kopf gestellt. So war die Geometrie nun geeignet für eine druckbeanspruchte Betonkonstruktion. Durch diesen Formfindungsprozess konnte bei Spannweiten von ca. 36 m die Konstruktionshöhe der Halle begrenzt und der Materialverbrauch auch erheblich minimiert werden. Da dieser Vorgang in der Natur vorkommenden physikalischen Selbstbildungsprozessen ähnelt, wirkt die Geometrie zeitlos. Die Lichtaugen werden mit leichten transparenten Fassadenkonstruktionen verschlossen; diese dienen zur natürlichen Belüftung und Belichtung der Halle und gehen fließend in die Satzkonstruktionen, die Kelchstützen, über. Die Kelchstützen reflektieren durch ihre geschwungene Form das auf die helle Betonstruktur treffende Tageslicht weit in die Halle hinein (Bild 4). Ventilationsklappen erlauben eine natürliche Belüftung und – durch den Luftaustausch mit den Tunnelröhren – auch eine natürliche Klimatisierung.

Ingenieurtechnisch wurden *Ingenhoven* und *Otto* im Rahmen des Wettbewerbs vom Ingenieurbüro Hapold unterstützt, später auch vom Büro Leonhardt, Andrä und Partner; 1999 begann das Team mit den Vorplanungen zum Projekt. Die Werner Sobek AG



Bild 4. Innenansicht der neuen Bahnsteighalle
(© Ingenhoven Architekten, Düsseldorf)

übernahm ab dem Jahr 2009 die Tragwerks- und Fassadenplanung für die neue Bahnsteighalle sowie für den Umbau des Bonatz-Baus und den Neubau der angrenzenden Stadtbahn-Haltestelle Staatsgalerie. Im Rahmen dieser Planung wurden die Entwurfsplanung technischen Anforderungen vollständig überarbeitet und die Genehmigungs- und Ausführungsplanung erstellt.

Die 420 m lange, 80 m breite und bis zu 12 m hohe Bahnsteighalle wird monolithisch in weißem Sichtbeton ausgeführt. Sie untergliedert sich in die Trogkonstruktion und das Schalendach. Die Deckenunterseite des Schalendachs ist eine doppelt gekrümmte Fläche; die Bauteilstärken variieren entsprechend der Beanspruchung von 40 cm im Feldbereich bis zu 110 cm im Randbereich. Gestützt wird das Schalendach durch die Trogwände und 28 Kelchstützen. Diese Stützen können in drei Typen unterschieden werden:

- 23 Regelkelche mit einem randverstärkenden Überzug an der Oberseite (die sogenannte Hutze),
- vier Flachkelche ohne Randverstärkung,
- ein größerer Sonderkelch mit integrierter Erschließung.

Topografisch bedingt ist der Abstand zwischen Dach und Trog nicht durchgehend gleich, sondern variiert. Hierdurch verändert sich auch die Bauhöhe der Regelkelche. Die Kelchstützen werden im oberen Bereich immer mit gleicher Geometrie ausgeführt, damit die in der Herstellung sehr aufwendigen Schalungselemente wiederverwendet werden können. Die erforderliche Geometrieadaptation erfolgt im sogenannten Fußbereich der Kelche.

Die Geometrie des Schalendachs kann als Freiform bezeichnet werden, da es keine mathematischen Regelmäßigkeiten gibt, die sie beschreiben. Entwickelt ist die Form, allerdings wie oben beschrieben, nicht frei; sie ist vielmehr eine hocheffiziente Leistungsform, die dem Verlauf der Kräfte folgt und die gesetzten Anforderungen einer weitspannenden und lichtdurchfluteten Bahnhofshalle materialoptimiert umsetzt.

3.2 Prozesse und Engineering

Die neue Bahnhofshalle hat eine geometrisch höchst anspruchsvolle Form. Während diese im Wettbewerb zunächst experimentell entwickelt wurde, kamen im Zuge der Planung und der softwaretechnischen Entwicklung immer mehr digitale Planungsmittel zum Einsatz. Die Entwicklung der digitalen Werkzeuge und Prozesse ging Hand in Hand mit dem Fortschritt der Planung: im Nachhinein betrachtet wäre die Umsetzung des Projekts ohne digitale Hilfsmittel kaum möglich gewesen. Zur damaligen Zeit war aber die BIM-Methode in Europa kaum verbreitet: Der Fokus wurde von daher auf die Herstellung von geometrischen Modellen und FE-Modellen gesetzt: durch die Definition von Parametern und programmierten Prozessen und Schnittstellen konnte man die Planung in einem semi-automatischen *Workflow* organisieren und steuern, was in den folgenden Jahren zum klaren Vorteil wurde. Der gleiche Ansatz wurde auch als Unterstützung für die Fertigung verwendet. Obwohl die Herstellung eines BIM-Modells nicht Ziel der Arbeit war, viele der Ansätze, die in Abschnitt 2 beschrieben sind, konnten hier bereits angewendet werden (wenn auch noch ohne BEP, LOD-Definitionen etc.).

3.2.1 Genehmigungsplanung

Die nötigen Informationen für die Berechnung des Flächentragwerks wie Knotenlage und -stärke (*pre-processing*) wurden auf Grundlage des architektonischen Flächenmodells durch eigene Skripte generiert [13]. Hintergrund für die Entscheidung war die Tatsache, dass komplexe Schalengeometrien bis dato eher mit konstanten Dicken oder mit aussteifenden Rippen geplant bzw. ausgeführt wurden, wie auch im Mercedes-Benz-Museum [4]. Die damaligen FE-Berechnungssoftwares waren aber nicht dafür geeignet, solche hochkomplexen Betontragwerke zu bemessen. FE-Programme aus anderen Branchen wie dem Maschinenbau waren zwar dafür ausgelegt, Bauteile mit variierenden Wandstärken zu bemessen. Allerdings wurden diese Programme für Metallbauteile konzipiert und konnten deshalb keine Informationen zu Bewehrungsmenge und Verlegerichtung liefern.

Da die Innen- und Außenflächen aufgrund der modellbasierten Formfindung nicht analytisch oder parametrisch definiert waren, wurde als erstes die Mittelfläche durch Skripte im Programm Rhinoceros generiert. In einem zweiten Schritt wurden die Netzlogik definiert und die zugehörige Bauteildicke an jedem Knoten automatisch ermittelt. Zur Kontrolle wurden regelmäßige Schnitte gelegt, um Modellierungsfehler zu vermeiden. Die aus diesem Prozess resultierenden Modellinformationen wurden als textbasierter Code exportiert und in das FE-Programm SOFiStiK eingelesen. Auch weitere relevante Informationen wie Lasten oder Bewehrungsrichtungen wurden vorab programmiert und in den textbasierten Code integriert. Verschiedene FE-Modelle wurden auf dieser Weise erstellt und im Projektverlauf immer weiter angepasst und verfeinert (Bild 5).

Zur Berechnung der Erdbebenlastfälle, welche auch komplexe Bauwerk-Boden-Interaktionen beinhalten, mussten speziell gelagerte Szenarien am Modell berechnet werden. Die Schnittgrößen dieser Sonderberechnungen wurden direkt in die Datenbank des Hauptmodells eingelesen und konnten auf diesem Weg mit überlagert werden. Die Auswertung des Modells bestätigte die Annahme, dass die Druckbeanspruchung aufgrund der definierten Geometrie in vielen Bereichen maßgebend war. Die gewählte Geometrie ermöglicht also im Vergleich zu konventionellen Tragwerken mit ähnlichen Spannweiten eine Ressourceneinsparung.

Um die schrittweise Herstellung richtig zu erfassen, wurde aus dem Gesamtmodell durch weitere Unterteilung ein separates Bauphasenmodell erstellt, so dass die jeweiligen Herstellungsschritte gesteuert werden konnten. Im Modell werden die tragwerksrelevanten Bauphasen mit den jeweils vorhandenen Baubehelfsstützen abgebildet (Bild 6). Dabei wirken im Wesentlichen Eigenlasten, bauzeitliche Verkehrslasten und Temperaturlasten. Es zeigte sich, dass ein freistehender Kelch ein vom Endzustand abweichendes Tragverhalten hat. Aufgrund der Masseverteilung wechselt das Anschlussmoment im Bauzustand im Vergleich zum Endzustand das Vorzeichen.

Aufgrund der fugenlosen Bauweise bei gleichzeitiger „Vernagelung“ von Bauwerk und Baugrund durch die

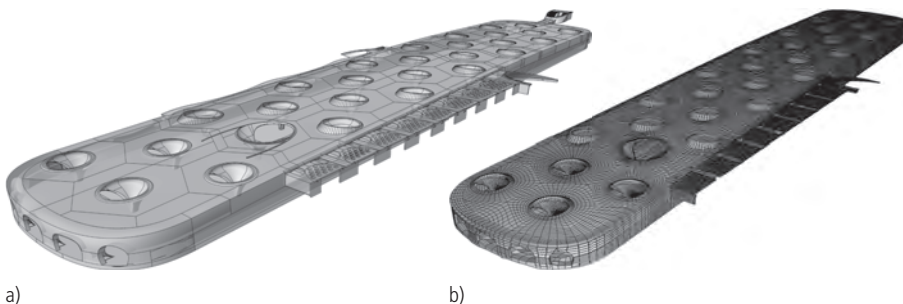


Bild 5. a) Geometriemodell und b) FE-Modell des Tiefbahnhofs (© Werner Sobek AG, Stuttgart)

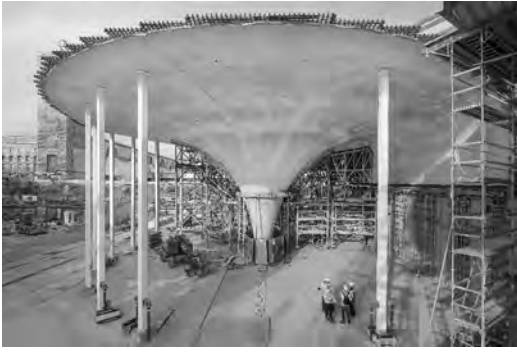


Bild 6. Temporäre Stützelemente an der ausgeschalteten Kelchstütze (© Achim Birnbaum, Stuttgart)

Pfähle wurde die erforderliche Bewehrung zur Minimierung der Rissweiten im Beton maßgeblich durch Zwangseinwirkungen bestimmt. Die Risse waren dabei auf eine Breite von 0,15 mm für die Trogkonstruktion (WU-Konstruktion) bzw. 0,2 mm für das Schalendach (Festlegung für Sichtbeton) zu begrenzen. Die Zwänge werden in erster Linie durch Temperatur- und Schwindwirkungen hervorgerufen. Weitere Biegebeanspruchungen resultierten aus den seitlichen Erdrücken auf die Trogwände – eine Randbedingung, die in der experimentellen Geometriefindung während der Entwurfsphase nicht berücksichtigt wurde.

Die Festlegung der Temperaturen im Endzustand erfolgte auf Basis eines thermodynamischen Gutachtens. Für den Innenraum der Bahnhofshalle wurden hieraus die maximalen Lufttemperaturen im Endzustand von +23 °C für die Sommersituation und 0 °C für die Wintersituation festgelegt. Abhängig von den Bauteildicken und dem mittleren Grundwasserstand sowie unter dem Ansatz einer mittleren Aufstelltemperatur wurden dann die konstanten sowie die linear veränderlichen Temperaturanteile in den Bauteilen (getrennt in Bodenplatte, Trogwände, Schalendach und Kelche) der Bahnhofshalle abgeleitet.

Bei den Berechnungen der FE-Modelle wurde das Schwinden des Betons in Form von Dehnungen angesetzt. Die Schwindwerte basierten auf dem Ansatz einer relativen Luftfeuchte von 75 % für das Schalendach und 80 % für die Trogkonstruktion. Die abschnittsweise Herstellung des Bauwerks und die zeitliche Abfolge der einzelnen Bauabschnitte wurden durch den Ansatz von Differenzschwindmaßen berücksichtigt, wodurch sich in Bahnhofslängs- und -querrichtung unterschiedliche Werte ergaben. Zur Berücksichtigung des Relaxationsverhaltens des Betons wurde bei der Ermittlung der Schwindlasten ein Abminderungsfaktor von 0,65 angesetzt.

Zur Nachweisführung der Bahnhofshalle wurde die erforderliche Bewehrung in mehreren Berechnungsläufen bestimmt. Die Mindestbewehrung wurde für „späten Zwang“ in Bahnhofslängsrichtung sowie für

„frühen Zwang“ in Bahnhofsquerrichtung ermittelt und als Grundbewehrung festgelegt. Im Grenzzustand der Tragfähigkeit wurde das FE-Modell für Last- und Zwangsbeanspruchungen bemessen. Für die Gebrauchstauglichkeit erfolgte die Bemessung für die Last- und Zwangsbeanspruchungen jeweils getrennt unter Einhaltung der festgelegten Rissbreiten.

Neben den Modellen der Bahnhofshalle wurde ein zusätzliches FE-Modell für die Berechnung der im Bereich der vorhandenen S-Bahn-Tunnel erforderlichen Überbrückung erstellt. Hier spannt die Trogplatte des Bahnhofs, die in diesem Bereich zusätzlich durch zwei Kelchstützen belastet ist, wie ein Brückenbauwerk 30 m frei über die quer darunter verlaufende S-Bahn. Die Lastenleitung in den Boden erfolgt über seitlich des Tunnels positionierte Bohrfahlwände. Da die monolithisch integrierte Brücke in der Bauhöhe geometrisch begrenzt sein musste, konnten die großen Lasten nur durch eine Vorspannung abgetragen werden, in diesem Fall erstmals für ein DB-Bauwerk eine „Interne Vorspannung ohne Verbund“. Die Wahl dieses Vorspannvorgangs erlaubt einen frühzeitigen Einbau der Spannglieder und eine, dem Baufortschritt und der Belastung angepasste, spätere Vorspannung. Darüber hinaus können auch die bis zum Ende der Rohbauarbeiten eintretenden Spannkraftverluste aus Schwinden und Kriechen durch erneutes Vorspannen kompensiert werden [14].

Neben der Geometrie stellten die Brandschutzanforderungen und die gewünschte Weißfärbung des Betons besondere Herausforderungen an Planer und ausführende Unternehmen. Für den Nachweis des konstruktiven Brandschutzes erfolgte ein Großbrandversuch in Anlehnung an die RIL 853. Ein Probekörper mit typischer Krümmung und einer mittleren Belastung wurde mit der TSI-Brandkurve beaufschlagt. Durch diesen Brandversuch wurde nachgewiesen, dass durch den Zusatz von ca. 2 kg PP-Fasern pro Kubikmeter Weißbeton im Brandfall nur relativ geringe Abplatzungen zu befürchten sind.

Die Weißfärbung des Betons wurde durch einen Weißzement ermöglicht (eine Mischung aus CEM I und CEM III). Die Zugabe eines Hochofenzements mit geringer Wärmeentwicklung wegen hohen Anteilen an Hüttensandmehlen führte zu einer Begrenzung der Kerntemperatur auf das gewünschte Maß. Zugleich wurde die CO₂-Bilanz des Betons verbessert.

3.2.2 Ausführungsplanung

Auch die Ausführungsplanung wurde maßgebend durch digitale Werkzeuge unterstützt. Für die Erstellung der Rohbauplanung wurde das Programm Rhinoceros eingesetzt, mit dem sich alle komplexen Freiformflächen in 3D abbilden ließen. Dieses 3D-Modell wurde von den Architekten und den Tragwerksplanern gemeinsam entwickelt; die Tragwerksplaner erstellten und koordinierten dann auf dieser Basis die Rohbaupläne. Auf einzelnen Ebenen sind die Schalhautfugen

und Koordinaten von diversen Einbauteilen auch für die eisenbahntechnischen Gewerke integriert. Die Rohbaupläne sind achsweise sowie in einzelne Bauteile wie „Kelchstütze“ oder „Schwindgasse“ unterteilt; sie beinhalten ein Abbild des 3D-Modells sowie Koordinaten im Gauß-Krüger-System. Das Abbild wird mittels mehrerer Schnitte durch die Bauteile erzeugt. Die Koordinaten beschreiben die komplexe Geometrie eindeutig und sind maßgebend für die Herstellung des Schalendachs. Es wird nicht, wie sonst im Hochbau üblich, mit Maßketten gearbeitet. Das 3D-Modell wird ebenso zur Entwicklung der Schalungskonstruktion durch die ausführende Firma verwendet. Die Schalungskörper werden aus der 3D-Geometrie hergeleitet und dann in 3D gefräst.

Das 3D-Modell dient darüber hinaus als Grundlage der Bewehrungsplanung. Die hohe Komplexität der Bewehrungsplanung des Schalendachs äußert sich im Wesentlichen in folgenden Randbedingungen:

- Komplexe Geometrie mit ständig variierender Bauteildicke, synklastisch und antiklastisch gekrümmten Bereichen sowie Kombination von kreisförmigen (im Bereich der Kelche) mit orthogonalen (im Bereich der Decken und Wände) Bewehrungssystemen; dies führt zu komplexen Übergangs- und Übergreifungsbereichen mit mehrfachen Kröpfungen und Krümmungen.
- Hohe Anforderungen an die sichtbare Oberfläche und damit Erfordernis geringer Abweichungen in der Betondeckung und hoher Anspruch an die Genauigkeit der Biegeformen.
- Fertigungstechnisch bedingt eine begrenzte Genauigkeit bei der Herstellung komplexer Biegeformen der Bewehrungsseisen.

Anhand des 3D-Modells wurden aufgrund der oben genannten Randbedingungen parallel zur Oberfläche sogenannte „Spuren“ (d. h. Bewehrungsachsen) erzeugt und modifiziert (Bild 7). Hierfür wurde das Programm Rhinoceros in Kombination mit Grasshopper und C# verwendet. Die Ausgangsspuren bestehen aus Splines und wären in dieser Form nicht wirtschaftlich herstellbar. Insofern musste im ersten Schritt eine Vereinfachung der Geometrie erfolgen. Die mit der ausführenden Firma abgestimmten Biegeformen sind Bogenzüge bis zu 3 Bögen und Polygone. Mithilfe eigens entwickelter Skripte erfolgte eine parametrisierte Vereinfachung und Gruppierung von Stabformen.

Bei der Generierung der einzelnen Stäbe mussten hinsichtlich der Herstellbarkeit sowohl das elastisch-plastische Verhalten des Bewehrungsstahls als auch die Eigenschaften der Biegemaschine beim Biegeprozess berücksichtigt werden. Es galt, nicht herstellbare Biegeformen in der Planung auszuschließen und komplexe Biegeformen (z. B. Stäbe, die in zwei verschiedene Richtungen gebogen sind) generell auf ein Minimum zu beschränken. Hierfür wurden zwischen Tragwerksplaner und ausführender Firma die Machbarkeit der Herstellung solcher Formen bzw. mögliche Vereinfachungen anhand von umfangreichen Versuchen ab-

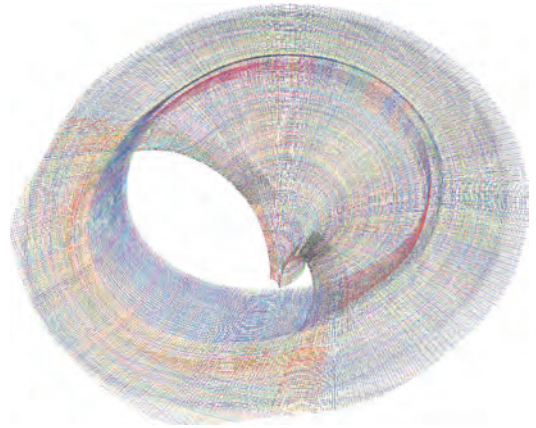


Bild 7. Darstellung der Bewehrungsspuren im Rhinoceros-Modell (© Werner Sobek AG, Stuttgart)

gestimmt. Hierzu zählten z. B. Versuche, ab welchem Krümmungsradius ein Stab bestimmter Dicke überhaupt vorab gebogen werden muss bzw. bis wann er bei Bedarf vor Ort händisch in seine Sollgeometrie gebracht werden kann. Es wurden Toleranzen abgestimmt, innerhalb derer die Bewehrungsseisen variieren dürfen. Hierfür wurden mit dem Biegebetrieb Folgen an Radien und Knicken der Betonstahlbewehrung abgestimmt, die mit hinreichend geringen Toleranzen herstellbar sind.

Solche Informationen und Erfahrungen waren wichtig, um die ausgewählten Parameter bei der Definition der Bewehrungsspuren in der geometrischen Modellierung zu validieren. Digitale Werkzeuge erweitern das Feld des Möglichen, ersetzen aber nicht vollständig die Validierungsprozesse, die (zum Beispiel in Form von Mock-ups) eine lange Tradition im Rahmen der Ausführungsplanung haben. Dieses Vorgehen erlaubt auch das graduelle Optimieren von Entwurfskonzepten, weiterhin ein wesentlicher Bestandteil der Tätigkeit von Tragwerksplanern. Dies kann und sollte aus Sicht der Autoren nicht von Computern übernommen werden.

Eine Besonderheit innerhalb der Bewehrungsplanung stellt die sogenannte Hutze dar (Bild 8). Dieser Begriff bezeichnet die Aufkantung entlang der Kelchoberseite, die das Lichtauge einfasst und trägt. Hier werden zum einen große Kräfte aus der Stahl-Glas-Konstruktion des Lichtauges in den Massivbau eingeleitet. Weiterhin kommt es oberhalb der sogenannten Kelchschulter zu einer Konzentration von Kräften in Form eines Stützmoments. Dieser Bereich muss trägerartig bewehrt werden, wobei es lokal zu großen Bewehrungsmengen kommt. Es müssen geschlossene Bügel mit Durchmesser 32 mm ringförmig angeordnet werden. Um die ebenfalls nicht geringe Menge tangential verlaufender Bewehrung von oben einbauen zu können bzw. nicht aufwendig einfädeln zu müssen, sollten

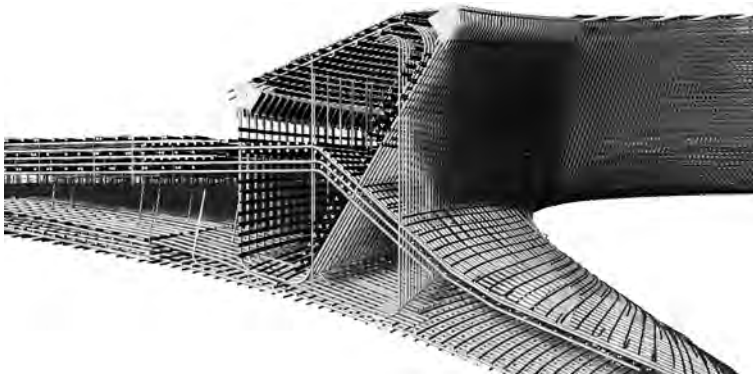


Bild 8. Bewehrungsmodell im Bereich der „Hutze“ (© Werner Sobek AG, Stuttgart)

die Bügel im Bauzustand oben offengehalten und erst kurz vor der Betonage verschlossen werden. Hierfür wurden Sonderbügel entwickelt, deren U-Form an den Enden je ein Stahleinbauteil zum einfachen Schließen mittels Querstab aufweist. Diese Stahleinbauteile werden an den U-förmigen Bügel angeschweißt und stellen über vorhandene Gewinde und Kalottenscheiben sicher, dass die querverlaufenden Gewindestäbe mit ausreichend Toleranz hinsichtlich Länge und Winkel eingebaut werden können.

Eine weitere Besonderheit dieser Sonderbügel ist eine daran angeschlossene und nach oben aus der Hutze herausstehende Blechfahne, die mittels Bohrungen dem Anschluss der Stahlkonstruktion des Lichtauges dient. Um auch hier die notwendige Einbaugenauigkeit zu erreichen, wurde erneut mit Gauß-Krüger-Koordinaten gearbeitet.

Die bei S21 verwendeten digitalen Werkzeuge ermöglichten auch eine Visualisierung in 3D bzw. eine Kollisionskontrolle. Komplexe Biegeformen wurden bei Bedarf händisch nachbearbeitet. Die finalen Spuren wurden deshalb in das 3D-Bewehrungsprogramm Allplan/Nemetschek eingelesen und dort zu einem Gesamt-3D-Bewehrungsmodell inklusive aller Stabeigenschaften, bewehrungsrelevanter Einlegeteile sowie Betonier- und Rüttelwendeln verarbeitet.

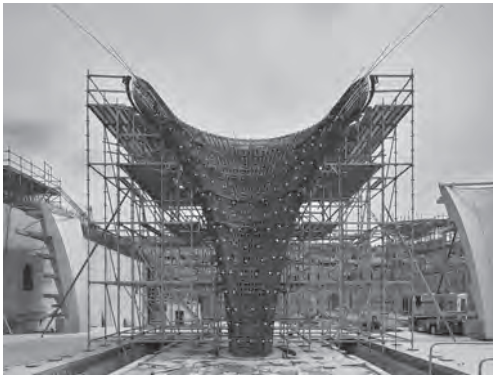
3.3 Fertigung

Das 3D-Modell wurde auch zur Entwicklung der Schalungskonstruktion durch die ausführende Firma (Ed. Züblin AG) verwendet [15]. Auf seiner Basis werden Schalungselemente aus verleimten Holzplatten computergesteuert gefräst und anschließend geschliffen und mit GFK-verstärkten Kunstharzschichten mehrlagig verstärkt (Bild 9). Aufgrund dieses aufwendigen Herstellungsverfahrens war die Möglichkeit der Wiederverwendung der Schalungselemente ein wichtiger Beitrag zur ökonomischen und ökologischen Nachhaltigkeit des Projekts.

Um die exakte Positionierung der Bewehrungsseisen auf der Baustelle zu gewährleisten, wurden Gauß-Krüger-Koordinaten verwendet. Jedes Bauteil des Schalendachs erhält ergänzend zu den Bewehrungsplänen eine Koordinatenliste. Diese ermöglicht es dem Unternehmen, mithilfe eines Vermessers die Leitstäbe exakt einzumessen und weitere Eisen entsprechend dazwischen zu platzieren. Weiterhin wurden in den Bewehrungsplänen Stabanfang und -ende definiert. Dies übernimmt der Biegebetrieb mittels einer farblichen Markierung am Stab zusätzlich zur Positionsnummer, die an jedem einzelnen Stab festgebunden war. Ohne diese eindeutige Markierung ist ein Bewehrungsstab auf der Baustelle nutzlos, da nicht korrekt zuordenbar. Das entwickelte 3D-Bewehrungsmodell ist nicht nur Grundlage der Bewehrungspläne, sondern bedeutet für die Baustelle eine Hilfestellung in Form von 3D-Daten, die direkt vor Ort eingesehen werden können. Die ausführenden Unternehmen haben in einem Container direkt neben dem Einbauort die Möglichkeit, sich jederzeit am Computer die Lage einzelner Stabpositionen in 3D vor Augen zu führen und so den korrekten Einbau zu überprüfen (Bild 10).



Bild 9. Schalungselemente (© Achim Birnbaum, Stuttgart)



a)



b)

Bild 10. a) Bewehrung eines Kelchfußes, b) Aufsicht auf Bewehrungsarbeiten an einem Regelkelch (© Achim Birnbaum, Stuttgart)

Weiterhin wurde zur Gewinnung vertiefter Erkenntnisse ein sogenannter Musterkelch erstellt. Dieser stellt ein Segment (genauer gesagt: ein Sechstel) eines typischen Innenkelchs im Maßstab 1:1 dar. Dieser wurde hinsichtlich Bewehrungsverlegung, Betonmischung, Einbring- und Rüttelöffnungen etc. originalgetreu geplant und umgesetzt (Bild 11), um die Herstellbarkeit zu testen und um die Qualität der daraus resultierenden Betonoberfläche beurteilen zu können. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich Betonmischung und Bewehrung flossen dann in die weitere Planung ein.

Dank dieses innovativen Prozesses und der entwickelten maßgeschneiderten Lösungen konnte in Stuttgart eine der bis dato anspruchsvollsten Massivbaukonstruktionen realisiert werden. Die hohe statische Belastung infolge Auflasten, die schwierige Gründungssituation und vor allem die komplexe, doppelt gekrümmte Geometrie erforderten einen neuen digitalen Planungsansatz. Mit dem Projekt Stuttgart 21

werden die vorab beschriebenen Planungsmethoden aus dem Nischenbereich von Pavillons und Sonderprojekten herausgehoben und bei einem der größten europäischen Infrastrukturprojekte erfolgreich angewandt. Während insbesondere zu Planungsbeginn viele der Ansätze erst bürointern sukzessive entwickelt werden mussten, haben mittlerweile mehrere Softwarehersteller nachgezogen und implementieren diese Herangehensweise und den daraus resultierende digitalen Workflow schrittweise in ihre Programme.

Das Projekt S21 zeigt besonders anschaulich, wie mit digitalen Werkzeugen und mit der nötigen Kreativität selbst extrem komplexe Geometrien geplant und gebaut werden können. Neben der Komplexität können dabei auch verschiedene Zielparameter wie die eingeschränkte Bauhöhe, eine optimale Tageslichtausnutzung und minimierter Ressourcenverbrauch berücksichtigt und optimiert werden. Es ist mit Sicherheit noch mehr hinsichtlich einer Verbesserung der Ressourceneffizienz möglich und nötig; dies wird aber in Zukunft viel leichter, wenn Planungs-, Fertigungs- und Montageprozesse durchgängig digitalisiert und miteinander verknüpft sind. Zudem sollten die bereits erprobten Ansätze nicht nur bei besonders komplexen Gebäuden angewendet werden, sondern auch in alltägliche Planungsaufgaben integriert werden.



Bild 11. Erste fertiggestellte Kelchstütze (© Achim Birnbaum, Stuttgart)

4 Kuwait International Airport, Terminal 2

4.1 Das Projekt – Struktur und Kontext

Das neue Terminalgebäude des internationalen Flughafens von Kuwait (KIA) zeigt einen weiteren Schritt in Richtung der konsequenten Integration von digitalen Werkzeugen in den Gesamtprozess von der Planung bis zur Fertigung. Der Flughafen wird auf Wunsch des *Ministry of Public Works* durch ein zweites Ter-



Bild 12. Aufsicht auf das neue Terminalgebäude am Kuwait International Airport (© Foster + Partners, London)

minal erweitert, um das Emirat zu einem neuen Luftdrehkreuz in der Golfregion zu machen. Seit 2017 wird hierfür ein architektonisch anspruchsvolles Terminalgebäude (T2) realisiert, das von Foster + Partners entworfen wurde [16]. Schon die Größe des Flughafens macht es zu einem eindrucksvollen Projekt, mit einer Kantenlänge von fast 1,2 km, einer lichten Höhe von bis zu 25 m und einer Dachfläche von rund 320000 m² (Bild 12). Die besondere Herausforderung für die Ingenieure lag in der Planung und in der Fertigung des komplexen Tragwerks aus Stahl und Stahlbeton, mit all seinen Besonderheiten [17]. Das einzigartige Dachtragwerk spannt im Innenbereich bis zu 145 m weit und kragt im Außenbereich bis zu 50 m aus. Es bietet so von außen einen beeindruckenden Blick auf die architektonischen Merkmale und die großzügigen, flexiblen Bereiche innerhalb des Flughafens.

Die Werner Sobek AG übernahm die Ausführungsplanung in Zusammenarbeit mit dem türkischen Generalunternehmer Limak Insaat. Arup London erbrachte die Tragwerks- und Fassadenplanung für das neue Terminal bis zur Ausschreibung [18]. Die Ausführungsplanung umfasste sowohl die Berechnung, Bemessung und Weiterentwicklung des Tragwerks auf Grundlage der Ausschreibungsunterlagen als auch die Erzeugung des BIM-Modells (am Anfang mit einem Detaillierungsgrad von LOD 200, dann weiter entwickelt bis zum LOD 400) sowie seine Koordination mit den anderen Fachplanern. Wie im internationalen Kontext für solche Projekte üblich, enthielten die Ausschreibungsunterlagen nur eine Tragwerksbeschreibung, keine Tragwerksberechnung. Deswegen lag – ähnlich wie bei Stuttgart 21 – der Fokus der Planung zunächst auf der Analyse des Entwurfs; mögliche Alternativkonzepte wurden entwickelt und zum Teil auch in die Ausführung übernommen. Die Integration der Werner Sobek AG in den Fertigungsprozess und in die praktische Umsetzung war hier aber viel stärker als beim Stuttgarter Hauptbahnhof, was sich als wichtiger Pluspunkt erwiesen hat. Wegen der Komplexität einiger Bauteile wurden zum Beispiel parametrische Modelle erzeugt,

die direkt als Grundlage für die Fertigung dienten: ein Beispiel hierfür ist die Modellierung des Schalentragwerks [19].

4.2 Tragwerksbeschreibung

Das Tragwerk des Terminals kann in fünf Hauptsysteme unterteilt werden (Bild 13):

1. das Haupttragwerk aus Stahlbeton,
2. das Schalentragwerk aus Stahl und Stahlbeton,
3. die Stahlfachwerkträger,
4. das Sekundärdachtragwerk,
5. die Fassade und die Dachhülle.

Das Haupttragwerk aus Stahlbeton ist durch Elemente gekennzeichnet, die typisch für den Brückenbau sind. Es besteht aus 90 Haupthohlstützen mit einer max. Seitenlänge von 3 bis 9 m und einer Höhe von 25 bis 45 m. Die Ausmaße und die Lasten dieser Stützen sind vergleichbar mit Brückenpfeilern und Gebäudekernen. Zwischen den Stützen spannen rippenartige Bogenträger (*Ribs*). Die Querschnittshöhe dieser Träger liegt zwischen 2,2 m für die kleinen Achsen und 5,4 m für die größte Spannweite. Die Auskragungen im Außenbereich werden ebenso von solche „Querrippen“ unterstützt. Die *Ribs* bestehen aus vorgespannten Stahlbetonfertigteilen und kennzeichnen das Tragverhalten des Stahlbetontragwerks; die sich bei jeder Achse wiederholen (Bild 14). Die grundsätzliche Idee war ein Haupttragssystem zu haben, bei dem alle Elemente aus Stahlbeton im Endzustand unter Druck stehen. Die Bogenträger werden durch die interne Vorspannung überdrückt, damit auch das Zusammenwirken der Fertigteile gewährleistet wird. Zusätzlich wirkt die Vorspannung der Schrägkabel auf die Bogenträger und unterstützt die Auskragung im Außenbereich. Die Vorspannkraft der Kabel schließt sich durch die horizontalen Decken (*Diaphragm Slabs*) am Stützenkopf kurz. Nur der Schlussstein der Hauptbögen steht grundsätzlich unter Zug; dieses Bauteil besteht aus Ortbeton und wird nicht durchgespannt, da der Bogen in der Draufsicht durch einen Knick am Schlussstein gekennzeichnet ist. Die entstehende Zugkraft ist der Kurzschließung der Schrägkabel, der Geometrie des Knickes und den thermischen Effekten geschuldet und wird durch schlaffe Bewehrung in die anschließenden Fertigteile eingeleitet.

Senkrecht zu den Querrippen spannen entlang der Außenkante des Gebäudes Längsrippen (*Spines*). Auch diese bestehen aus vorgespannten Stahlbetonfertigteilen und dienen u. a. dazu, die Lasten aus der Fassade zu übernehmen. An den Haupthohlstützen werden vier zusammengesetzte Fertigteile, zwei *Ribs* und zwei *Spines* angeschlossen: diese sind mit Ortbeton zusammenbetoniert. In den Hohlstützen wurde das aktive Ende der Spannglieder eingebaut, um von dort die Vorspannung auf die Hauptträger zu applizieren. Die Kreuzung von Längs- und Querrippen unterteilt das Terminalgebäude in insgesamt 136 Felder.

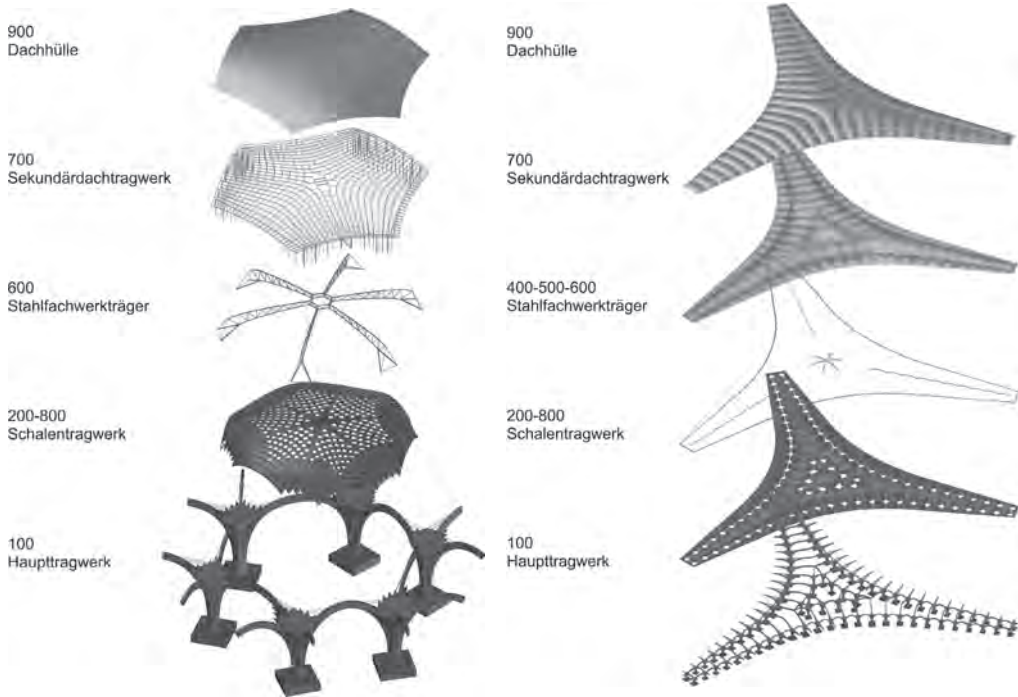


Bild 13. Explosion der einzelnen Komponenten des Tragwerks (© Werner Sobek AG, Stuttgart)

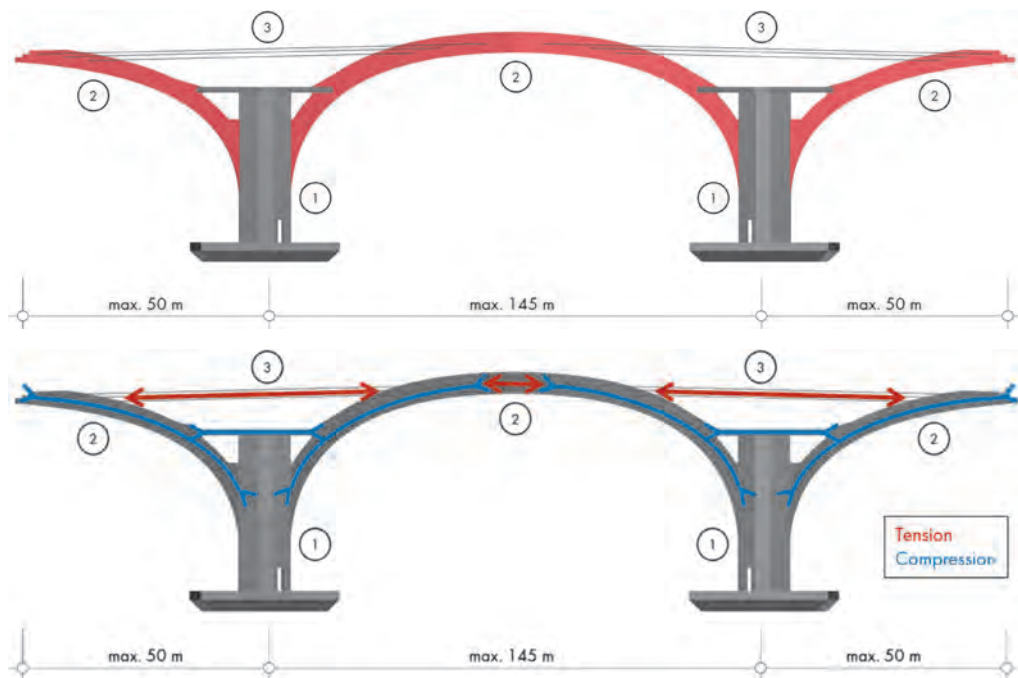


Bild 14. Querschnitt durch das Tragwerkssystem des neuen Terminals; 1) Hohlstützen, 2) Querrippen (Ribs), 3) Schrägkabel: Geometrie und statisches System (© Werner Sobek AG, Stuttgart)

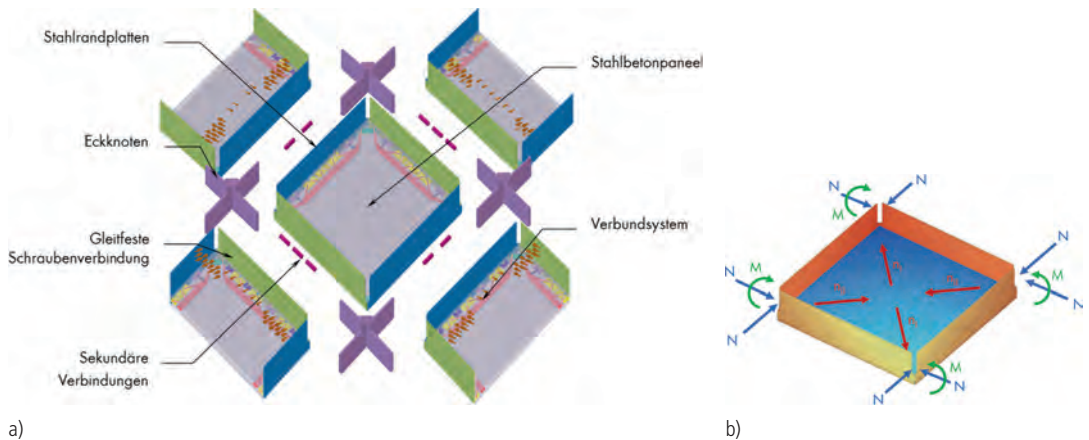


Bild 15. Explosionsdarstellung der *Shell Cassettes* und der dazugehörigen Verbindungsknoten;
a) Geometrie und b) statisches System (© Werner Sobek AG, Stuttgart)

Eine doppelt gekrümmte Schale bildet den oberen Raumabschluss und die Aussteifung dieser Felder. Diese Schale besteht aus vorgefertigten Kassetten (*Shell Cassettes*) [17], die das Erscheinungsbild des Terminals prägen. Die Kassetten bestehen aus seitlichen ebenen Stahlblechen, die mit Stahlbetonpaneelen in Sichtbetonqualität ausgesteift sind. Die Höhe der Stahlbleche variiert in Abhängigkeit von der Schalenkrümmung; dadurch sind die Bleche am Rand (wo die Krümmung üblicherweise stärker ist) höher. Dies wirkt sich vorteilhaft auf das Tragverhalten aus. Die Stahlbleche übertragen die Lasten in axialer Richtung und auf Biegung, wohingegen die 160 mm dicken Stahlbetonpaneele die Übertragung der Membrankräfte quer zu den Stahlblechen übernehmen (Bild 15). Die Verbundwirkung zwischen Stahlblechen und Stahlbetonpaneelen wird durch Bewehrungsstäbe gewährleistet, die an den Stahlblechen angeschweißt sind.

Eine weitere Besonderheit des Schalentragwerks sind die Fugen zwischen den Kassetten: die Auswirkungen thermischer Effekte auf das Tragwerk können so durch kleine Bewegungen deutlich reduziert werden. Da es durch diese Fugen keinen direkten Kontakt zwischen den Paneelen gibt, erfolgt der Kraftfluss zwischen angrenzenden Kassetten über exzentrische geschraubte Verbindungskreuze (Eckknoten im Bild 15).

Entlang der Kante am Rand des auskragenden Bereichs und entlang der Symmetrieachsen wird das Schalentragwerk des Dachs durch räumliche Fachwerkträger ausgesteift. Im Zentralbereich, wo das Schalentragwerk eine Spannweite von bis zu 105 m hat, wird das Schalentragwerk auch durch einen Stahlfachwerkträger ausgesteift. Die Fachwerkträger ermöglichen hier eine deutliche Reduktion der Verformungen und gewährleisten gleichzeitig auch das leichte Erscheinungsbild, das den architektonischen Entwurf prägt. Ein gedämmtes Aluminiumdach bildet den oberen Abschluss des Terminals.

Trotz seiner großen Abmessungen wurde das Dach auf Wunsch der Architekten ohne Dehnfugen geplant, um Risiken hinsichtlich Funktionalität und Wartung auszuschließen. Diese Wahl hatte umfangreiche Auswirkungen auf das hochgradig unbestimmte statische System. Hinzu kamen komplexe Langzeiteffekte aus der Interaktion zwischen Stahl und Stahlbeton sowie die komplexe Geometrie. All dies machte die Planung des neuen Terminals zu einer besonders anspruchsvollen Herausforderung.

4.3 Prozesse

4.3.1 Allgemeines

Ziel des Planungsprozesses war es, mithilfe von verschiedenen digitalen Werkzeugen einen durchgängigen und parameterbasierten *Workflow* zu definieren, um eine bessere Integration und Kontrolle der verschiedenen Aspekte (Geometriebeschreibung, Engineering, Koordination mit den anderen Disziplinen, Fertigung) zu erreichen. Dieser Prozess baut auf den Erfahrungen auf, die bei Stuttgart 21 gesammelt wurden – ist aber weiterentwickelt und noch klarer und konsequenter von Beginn an strukturiert worden; die BIM-Methodik wurde flächendeckend angesetzt. Dies ermöglicht eine bessere Koordination und sichert die Durchgängigkeit der Informationen zwischen Planung und Fertigung, was auch durch die Beauftragung der Werner Sobek AG mit mehreren Leistungen vereinfacht wurde.

Durch die Verwendung von Parametern und Skripten wurde das Ganze von Anfang an fast vollständig automatisiert, sodass Änderungen der Geometrie, der Profile oder der Fertigungsinformationen leichter iterativ angepasst werden konnten. Ein solcher Aufbau erleichterte in den verschiedenen Planungsphasen die Integration von Änderungswünschen vonseiten der involvierten Akteure (Bauherr, Architekten, Fachplaner, ausführende Firma).

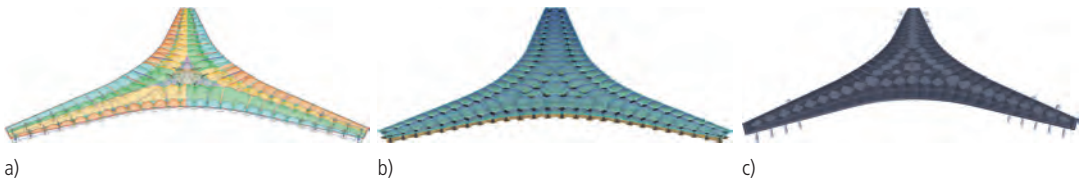


Bild 16. a) Zentrales geometrisches Digitalmodell, b) FE-Modell, c) BIM-Modell (© Werner Sobek AG, Stuttgart)

Der Kern ist ein zentrales Datenmodell, das alle Infos sowohl für die statische Berechnung als auch für das BIM-Modell zusammenfasst. Durch diese Vorgehensweise konnte man die Schnittstelle zwischen den Programmen für die verschiedenen Bereiche besser lösen: FEM (Engineering), BIM (Koordination und Kollisionsprüfungen) und CAD/CAM (Geometrie und Fertigung). Das zentrale Modell umfasst durch eine klar geregelte Namenskonvention alle wichtigen Informationen (Querschnitte, Materialien etc.) für jedes Bauteil und wurde im Programm Rhinoceros durch spezifische Scriptings aufgebaut (C++, C# und Grasshopper). Der Prozess wurde sorgfältig definiert, um das jeweils am besten geeignete Werkzeug verwenden zu können. Auch bei diesem Projekt – 6 Jahre nach einer ähnlichen Erfahrung bei Stuttgart 21 – wurde festgestellt, dass die standardmäßig verfügbaren Programme nicht immer in der Lage waren, allen Anforderungen gerecht zu werden. Noch einmal mussten Werkzeuge ad hoc hausintern programmiert werden, um die Schnittstellen zwischen den unterschiedlichen Programmen zu gewährleisten und einen *Open BIM*-Prozess zu ermöglichen. Viele proprietäre Plattformen, die auf *Closed BIM*-Prozessen aufbauen, unterstützen zwar die Schnittstelle zwischen BIM und statischer Berechnung; im Fall von großen und geometrisch komplexen Projekten sind die Möglichkeiten dieser Programme aber leider noch zu stark limitiert. Dadurch waren die Planer immer in der Lage, frei von verschiedenen Zwängen immer nach den bestmöglichen Lösungen für das Projekt suchen zu können.

Für die FE-Berechnung aller Tragwerkskomponenten wurde SOFiStiK verwendet: ähnlich wie bei Stuttgart 21 wurden aber die verschiedenen Bauteile zuerst per Scripting definiert (*Pre-Processing*) und dann aus dem zentralen Datenmodell direkt in SOFiStiK importiert. Auf ähnliche Art und Weise wurden auch die BIM-Modelle (über Revit und teilweise über Tekla) generiert. Hierdurch war sichergestellt, dass alle Anpassungen und Aktualisierungen eines Bauteils im Planungsprozess zeitgleich in das FE-Modell und in das BIM-Modell übernommen wurden. Das war sehr wichtig, da die Planung einiger Bauteile durch mehrere Iterationen optimiert wurde. Die bedingten Iterationen waren zweiseitig und haben sich durch statische Optimierungen oder durch Kollisionsprüfungen ergeben.

Um eine globale Struktur im Planungsprozess zu definieren, wurden die unterschiedlichen Bauteile des Flughafens gruppiert und nummeriert (Bild 16):

- Gruppe 100, Haupttragwerk,
- Gruppe 200, Schalentragwerk,
- Gruppe 300, Fassade,
- Gruppen 400, 500, 600, Stahlfachwerkträger,
- Gruppe 700, Sekundärdachtragwerk,
- Gruppe 800, Stahlbetonpaneele (Raumabschluss),
- Gruppe 900, Dachhülle.

4.3.2 BIM-Modell

Das BIM-Modell war das Kernelement für die Abstimmung mit allen externen Projektbeteiligten (Bild 17). Es wurde von allen Fachplanern als *Single Source of Truth* (SSOT) genutzt, d. h., alle Beteiligten basier-

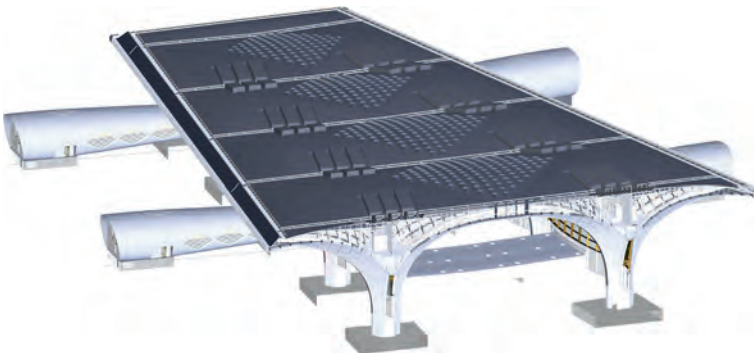


Bild 17. Darstellung aus BIM-Modell (© Werner Sobek AG, Stuttgart)

ten ihre Planungen auf diesem Modell und ließen die Ergebnisse ihrer Planung dann auch wiederum ihrerseits in das Modell einfließen. Wichtige Voraussetzung für ein Gelingen dieses integralen Planungsablaufs waren klare Regeln und Randbedingungen. Hierzu zählten u. a. alle zwei Wochen stattfindende *Uploads*, eine regelmäßige Kollisionsprüfung sowie eine permanente Cloud-basierte Abstimmung zwischen den Fachplannern.

Ein von der ausführenden Baufirma beauftragter BIM-Gesamtkoordinator (das Unternehmen Aecom) stellte zahlreiche Dokumente in einen von allen Projektbeteiligten gemeinsam genutzten Datenraum ein. Diese Dokumente beschrieben den Ablauf sämtlicher BIM-Prozesse und dienten als Leitfaden für die digitale Zusammenarbeit im Verlauf des Projekts.

Der BEP (*BIM Execution Plan*) stellt hierbei das wichtigste Dokument dar. Hier sind auch die verschiedenen Zonen und Bauabschnitte definiert, in die das Projekt unterteilt wurde, um die Steuerung und Koordination zu erleichtern. Die Leistungen der Werner Sobek AG umfassten die gesamte Ausführungsplanung der Fassade, des Dachs und des Haupttragwerks vom Terminal 2. Hierfür erforderlich waren 3D-Revit-Modelle (LOD 200 bis LOD 400), die gemäß den Festlegungen im BEP entwickelt wurden, sowie Tekla-Modelle für die Fertigung des Schalentrags. Neben der Entwicklung dieser komplexen 3D-Modelle mussten alle Gebäudeelemente mit Attributen bis zu einem LOI (*Level of Information*) von 400 versehen werden. Mengenermittlungen wurden auf dieser Grundlage durchgeführt und bei Änderungen automatisch aktualisiert. Die interdisziplinäre Kollisionsprüfung zwischen den einzelnen Fachplaner-Modellen wurde durch Aecom in der Software Navisworks vorgenommen. Grundlage für diese Kollisionsprüfungen waren Navisworks-Modelle, die abschnittsweise aus den Revit-Gesamtmodellen exportiert wurden. Die Ergebnisse der interdisziplinären Kollisionsprüfung wurden in wöchentlichen Koordinationsmeetings mit den jeweiligen BIM-Koordinatoren der einzelnen Firmen besprochen; hierbei wurden die Prioritäten der Bearbeitung gemäß dem geplanten Baufortschritt festgesetzt. Kollisionsfreie Teilmodelle wurden dann für die Ausführung freigegeben.

Als proprietäre Modellierungsprogramme war im BIM Execution Plan die Software Revit vorgesehen. Angesichts der Komplexität der zu behandelnden Fragestellungen setzte das Projektteam jedoch rund um das Revit-basierte Modell eine große Fülle weiterer Softwarelösungen ein. Zum Beispiel konnten die Achsen und Flächen des zentralen Rhino-Modells sowohl als Grundlage für die Revit-Elemente als auch für hochdetaillierte Tekla-Modelle genutzt werden, die dann bei der Fertigung zum Einsatz kamen. Für Bewehrungspläne kam Nemetschek Allplan zum Einsatz. Die Pflege der Schnittstellen zwischen den verschiedenen Programmen war dabei ein wichtiger Bestandteil des Planungsprozesses selbst.

Neben den softwareübergreifenden Schnittstellen wurde das Gesamtmodell in sechs Zonen sowie in neun Hauptbauteilgruppen (mit weiteren Untergruppen) unterteilt. Zeitweise musste das BIM-Team mit bis zu 98 unterschiedlichen Revit-Dateien arbeiten, Schnittstellen pflegen und kontinuierlich Geometrien aktualisieren. Dies war ein bedeutender Aufwand, auch wenn die meisten Prozesse automatisiert werden konnten.

4.3.3 Berechnungsmodell

Angesichts der schon geschilderten Randbedingungen stellte die Entwicklung eines statischen Gesamtmodells die Planer vor besondere Herausforderungen. Die komplexe Interaktion aller tragenden Elemente und die Empfindlichkeit des Systems für Steifigkeitsänderungen erforderte eine sorgfältig überlegte Strategie, um den Rechenaufwand unter Kontrolle zu halten. Die getroffenen Annahmen wurden mit Sensitivitätsanalysen und durch die Prüfung von Grenzzuständen validiert. Das Schalentragswerk besteht zum Beispiel aus 37000 Kassetten, für die Stahlbleche mit variablen Dicken (zwischen 10 und 20 mm) und Höhen (zwischen 560 und 1300 mm) verwendet wurden. Für die Verbundwirkung der variablen Stahlbleche mit den aussteifenden Betonpaneelen wurden verschiedene Modellierungsansätze untersucht und miteinander verglichen; zwei davon wurden schließlich weiterverwendet (Bild 18).

Im FE-Gesamtmodell wurde das Schalentragswerk mit einigen Vereinfachungen modelliert: Jedes Paneel aus Stahlbeton wurde in SOFiSTiK als einzelnes Schalenelement mit abgeminderter Steifigkeit abgebildet; die Randplatten zwischen zwei Eckknoten wurden als einzelne exzentrische Stahl-Ersatzprofile definiert. Ziel dieses Ansatzes war eine genaue Modellierung der Steifigkeit des Schalentragswerks mit einer realistischen Verteilung der Lasten auf alle Bauteile. Hierdurch konnten das gesamte Gebäude modelliert und wichtige Aspekte wie die dynamischen Eigenfrequenzen untersucht werden. Dieses Modell wurde vor allem für die Bemessung des Primärtragwerks des Dachs (d. h. der Längs- und Querrippen aus Stahlbeton) und der Fachwerkträger verwendet. Beim Detailmodell, das für die Bemessung des Schalentragswerks selbst verwendet wurde, wurde die Maschenweite der Stahlbeton-Paneele und der Stahl-Ersatzprofile verfeinert; außerdem wurden spezifische Randbedingungen definiert, um die Lücke zwischen den Paneelen zu simulieren und um damit das spezifische mechanische Verhalten der Schale besser definieren zu können.

Die Steifigkeiten beider Modelle wurden durch physikalische Versuche kalibriert; zusätzlich wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Parameter besser berücksichtigen zu können. Diese Abläufe wurden meistens durch Scripting automatisiert, um die nötigen Iterationen zu ermöglichen bzw. um mehrere Varianten mit unterschiedlichen

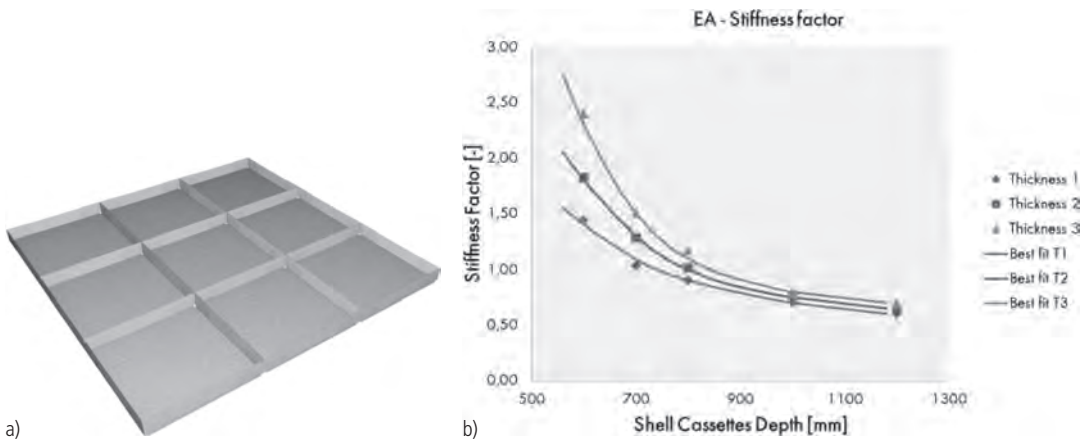


Bild 18. FE-Stiffigkeitsuntersuchungen des Dachschalentragwerks in Abhängigkeit von Blechstärke und Blechhöhe
(© Werner Sobek AG, Stuttgart)

Maßstäben zu testen; dadurch wurde eine höhere Zuverlässigkeit des Prozesses gewährleistet.

Zusätzlich zur Grundparametrisierung der Geometrie und zu den komplexen Kassetten-Elementen erhöhten das nichtlineare Verhalten, die Bedeutung der Bauzustände und die Langzeiteffekte die Komplexität des Gesamtmodells deutlich. Das FE-Modell wurde durch eine intern programmierte Schnittstelle zwischen Grasshopper und SOFiStiK erstellt. Alle Parameter wurden aus Rhinoceros mithilfe von Grasshopper und C# zugewiesen; die Geometrie wurde als Text-File für SOFiStiK exportiert. Der *Workflow* zwischen Grasshopper und SOFiStiK wurde von der Werner Sobek AG schon im Jahr 2017 hausintern definiert. Dieser Ansatz hat in letzter Zeit immer mehr Anwendung in der Fachwelt gefunden, sodass inzwischen auch die Entwickler verschiedener Programme (Rhino, Revit, Tekla und SOFiStiK) die große Bedeutung von Schnittstellen für den Austausch von Informationen erkannt haben.

Die definierte Vorgehensweise ermöglichte eine parametrische Modellierung des Gesamtmodells; dies war der einzige gangbare Weg, um das Gesamtbild mit vertretbarem Aufwand im Auge behalten bzw. um unterschiedliche Optionen in einem angemessenen Zeitraum prüfen zu können. Die unterschiedlichen Bauteile wurden mit getrennten Scripts generiert, sodass bei jeder Änderung gezielt nur bestimmte Komponenten geändert werden konnten. Durch die Input-Parameter bei Grasshopper und die programmierten Komponenten konnten in kurzer Zeit 20 unterschiedliche Teilmodelle erzeugt werden. Die Auswirkungen unterschiedlicher Lösungsansätze konnten in diesen Teilmodellen sehr schnell und mit überschaubarem Aufwand untersucht werden, bevor sie dann zum Gesamtmodell hinzugefügt wurden. Diese Maßnahme ermöglichte eine enorme Zeitersparnis für den Planungsprozess. Insgesamt wurden über hundert Revisionen des Gesamtmodells

und der 20 Teilmodelle gerechnet, was einer Gesamtrechnenzeit von ca. 20 Millionen Sekunden bzw. 230 Tagen entspricht. Jede Revision des Gesamtmodells hatte eine Gesamtanzahl von ca. 360000 Punkten und eine Datenmenge von ca. 130 GB.

4.4 Engineering

4.4.1 Allgemeines

Angesichts der schieren Menge an zu verarbeitenden Daten waren die Auswertung und die Interpretation der Ergebnisse eine weitere Herausforderung. Nachdem detaillierte Modelle entwickelt worden waren, mussten die hierbei erzielten Ergebnisse wieder auf überschaubare Informationen heruntergebrochen werden. Auch bei diesem *Post-Processing* kamen digitale Werkzeuge, unter anderem selbst entwickelte Scripts, zum Einsatz, um den Informationsaustausch zwischen unterschiedlichen Programmen zu ermöglichen. So wurden zum Beispiel die Daten zwischen Rhino oder Excel und SOFiStiK gegenseitig ausgetauscht. Zusätzlich zu der schon beschriebenen Erstellung der Geometrie aus Grasshopper wurden umgekehrt auch Informationen aus SOFiStiK in Grasshopper exportiert, z. B. um die verformte Geometrie des Tragwerks zu erstellen oder um komplexe Nachweise direkt in einer geeigneten Programmierungsumgebung zu führen und zu visualisieren. Fast alle Standardbemessungsmodule kamen bei diesem Projekt an die Grenze, sodass diese Module nur selten verwendet werden konnten. Die Führung der Nachweise in Grasshopper hatte auch den Vorteil, die einzelnen Schritte nachvollziehen zu können. Dies machte die Nachweisführung transparenter, als dies bei herkömmlichen Bemessungsmodulen der Fall ist.

Das ist ein weiteres Beispiel eines erweiterten BIM-Prozesses, durch den die geometrischen Informationen