

Bauingenieur

Organ des VDI-Fachbereichs Bautechnik

Sonderteil
Digitalisierung



sta  ware
BUSINESS NAVIGATION

GEOTHERMIE

Erfahrungen zur thermischen Grundwassernutzung an der WU Wien

GRAUE EMISSIONEN

Wissenschaftlich-ökologische Bewertung von Konstruktionsweisen

ENERGIEWENDE

Thermisch aktivierte Stahllösungen für die Energiewende



RELAST® BAUWERKS- VERSTÄRKUNG

Ressourcenschonend. Sicher. Schnell.

Mit dem zugelassenen Verstärkungssystem RELAST® von Würth lassen sich Bauwerke kosteneffizient sanieren und verstärken.

MEHR ERFAHREN!

wuerth.de/bauwerksverstaerkung
relast@wuerth.com



Verstärkungssystem mit bauaufsichtlicher Zulassung

- Erhebliche Steigerung der Querkraft- und Durchstanztragfähigkeit
- Geringer Eingriff in die bestehende Struktur
- Schnelle und einfache Installation unter Aufrechterhaltung des Betriebs
- Sofortige Belastbarkeit
- Enorme Kosteneinsparungen im Vergleich zu Neubauten
- Ressourcenschonend

Wie steht es um das nachhaltige Bauen?

Nachhaltiges oder zukunftsfähiges Bauen? Mittlerweile stark abgerutscht auf der Prioritätenliste vieler Entscheidungsträger.

Angesichts all der Krisen unserer Zeit ist das zwar nachvollziehbar. Aber es ist doch paradox, dass dies ausgerechnet dann passiert, wenn wir endlich die Instrumente und das Know-how haben, um so zu bauen, dass ökonomische, ökologische und soziale Anforderungen gleichermaßen berücksichtigt werden können. Umso begrüßenswerter ist es, dass sich der Bauingenieur in seiner Doppelausgabe Juli/August 2026 gegen den Trend für das Schwerpunktthema Nachhaltigkeit entschieden hat.

Eine gute Gelegenheit sich zu fragen: Wo stehen wir in Sachen Nachhaltigkeit im Bauwesen eigentlich?

Die Anzahl der zertifizierten Quartiere und Gebäude in Deutschland steigt. Allein die DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen) hat inzwischen fast 13 000 solcher Auszeichnungen verliehen – auch wenn die Eigenmotivation auf Bauherrenseite spürbar zurückgegangen ist. Sicher ist es kein Zufall, dass dieser Rückgang parallel zu reduzierten CSRD-Anforderungen, dem nationalen Aufschub von Klima-Zielen und einer Vielzahl an geopolitischen Krisen stattfand.

Zumindest im Bereich der Kreislaufgerechtigkeit sieht die Entwicklung etwas rosiger aus. Insbesondere auf EU-Ebene gab es in den letzten Jahren erfolgversprechende Entwicklungen. Dies zeigt sich zum Beispiel in der EU-Bauprodukteverordnung und der Digitalen Produktpasspflicht ab 2027. Dies ist insbesondere für ressourcenarme Länder wie Deutschland

wichtig, denn nur möglichst gut geschlossene Kreisläufe können unsere kritische Abhängigkeit von Importen reduzieren. In Deutschland gibt es seit 2021 eine Ersatzbaustoffverordnung, die Anforderungen an Rezyklate regelt und somit deren Einsatz vereinfachen soll. Auch die DIN Spec 91484 führt hoffentlich dazu, dass sich der Blick der Planenden und der Investierenden künftig noch stärker auf den Erhalt beziehungsweise die Weiternutzung von Bestand richtet.

Der Kreislauf ist noch nicht ganz rund.

Aber: Für die Wiederverwendung ganzer Bauteile oder -elemente fehlt es bislang an einheitlichen, bundesweit geltenden Vorgaben. Eine solche Wiederverwendung wird dadurch oft zu zeitaufwendig, zu kostenintensiv und zu risikoreich, als dass sie sich wirklich am Markt etablieren könnte (wenn man von Klein(st)bauteilen absieht, bei denen eine etwas bessere Entwicklung zu verzeichnen ist). Hierzu könnte eine Ersatzbauteilverordnung für wiederzuverwendende Bauteile eine sinnvolle Lösung darstellen.

Die Ermittlung von Treibhausgasemissionen gehört inzwischen bei vielen Projekten zum Standard. Davon CO₂ als wirtschaftliches Kriterium zu sehen, sozusagen als neue Währung sind wir jedoch noch weit entfernt. Eine konkrete Definition von verbindlichen Grenzwerten, wie zum Beispiel in Dänemark seit 2023 praktiziert, fehlt uns noch immer. Auf ei-

ne Umsetzung der Europäischen Gebäuderichtlinie (EPBD) in nationales Recht warten wir seit Jahren. Dabei ist ein wesentlicher Teil der Branche längst bereit zu zeigen, wie emissionsreduziert wir auch in Deutschland bauen können! Nur fehlt es Bauherren und Bestandhaltern an Anreizen, das tatsächlich umzusetzen. Vereinzelt versuchen Länder wie Baden-Württemberg Emissionen in wirtschaftliche Kalkulationen einzubeziehen (zum Beispiel durch einen CO₂-Schattenpreis). Ein anderer Ansatz ist der Gebäudetyp E, mit dem ein Verzicht auf nicht notwendige Standards und DIN-Normen ermöglicht werden soll. Dennoch: Hier muss dringend bundesweit nachgeschärft werden. Ansonsten wird der Gebäudesektor seine Emissionsziele auch in den kommenden Jahren immer wieder massiv verfehlen.

Nachhaltigkeit kann und muss aber auch durch andere Maßnahmen gefördert werden, wie zum Beispiel Entsiegelung, Biodiversität – und Baukultur. Auch diese zählt zur Zukunftsfähigkeit. Denn: Eine qualitativ und hochwertig gebaute Umwelt schafft langfristig Heimat für Generationen. Davon profitieren wir alle.



Dr. Stefanie Weidner

Vorständin der Werner Sobek AG, Stuttgart

Foto: Janine Kyofsky



6

Der KöTower an der Düsseldorfer Königsallee markiert eine neue städtebauliche Landmarke. Foto: AVP Becker GmbH



13

Im Interview gibt Lukas Böhmer Einblicke wie der Vorfertigungsgrad Qualität, Sicherheit und Effizienz im Modulbau beeinflusst. Foto: Lukas Böhmer

Standpunkt

- A 3** KREISLAUF Wie steht es um das nachhaltige Bauen?, S. Weidner (Sobek AG)

Nachhaltig Bauen

- A 6** PLANUNG Treiber der urbanen Qualität, N. Richartz (Schlüßler-Plan)
- A 10** MODULBAU Neue Lösungen für Nachhaltiges Bauen, Daiwa House Modular Europe
- A 13** UMSETZUNG Wie Modulbau in der Höhe funktioniert, Interview mit L. Böhmer, Daiwa House Modular Europe

Digitalisierung

- A 15** BESTANDSERFASSUNG BIM als Schlüssel zur Reaktivierung, Allplan
- A 18** GRUNDLAGE Gut geplant ist halb gebaut, R. Renner (Wolff & Müller)
- A 21** SOFTWARE Nicht nur die Funktionen zählen, Sta*Ware
- A 23** BAUPLANUNG Ein Brückenschlag von 2D zu 3D, Tekla

Aktuelles

- 218** Vorschau 9.2026
- 226** PERSÖNLICHES Nachruf Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer (1956–2026)
- 228** Tagungshinweis
- 228** Impressum

Diese Ausgabe enthält eine Beilage der Technischen Akademie Esslingen

Folgen Sie Bauingenieur auf LinkedIn





Das BIM-Modell des Schöneberger Ecks ist ein Teil der Grundlage für Planungs-, Termin- und Kostensicherheit. Foto: DGI Bauwerk

Hauptaufsätze

- 187** GEOTHERMIE Thermische Grundwassernutzung beim Campus Wirtschaftsuniversität Wien – Modellierung und Erfahrungen nach zehn Betriebsjahren, R. Markiewicz, D. Adam
- 197** GRAUE EMISSIONEN Wissenschaftlich-ökologische Bewertung dreier Konstruktionsweisen für Bürobauten anhand Grauer Emissionen am Projektbeispiel, R. Müller, A. Dernbach, D. Jochum, E. Wagner, C. Glock
- 209** BAUSTROM Der dynamische Stromtarif – ein innovatives Strombeschaffungsmodell für Baustellen?, J. Otto, E. L. Fabek, F. Härtel
- 219** ENERGIEWENDE Thermisch aktivierte Stahllösungen für die Energiewende, M. Kuhnhenne, V. Reger, B. Döring, H. Hachul



Software mit Weitblick

Beim Umstieg auf eine neue BMSP-Software achteten Mayer Ingenieure bewusst auf mehr als nur Funktionen. Warum Prozesse, Hersteller-Support und Praxisnähe entscheidend sind, erläutert Geschäftsführer Michael Mayer im Beitrag auf Seite A21/A22.

Foto: Sta*Ware EDV Beratung

ingenieur.de

Weil Verstehen wichtiger ist denn je.



Die Welt verändert sich rasant. Technologien, Märkte und Arbeitswelten gleich mit. Wer den Überblick behalten will, braucht Orientierung. Mit den neuen Newslettern von ingenieur.de liefern wir fundierte Informationen, praxisnahe Einordnungen und Hintergründe zu aktuellen Entwicklungen für, Ingenieurinnen und Ingenieure.

Kompakt. Relevant. Kostenfrei.

ingenieur.de/newsletter-uebersicht





Der KöTower am südlichen Ende der Düsseldorfer Königsallee markiert mit 18 Geschossen und rund 71 Metern Höhe eine neue städtebauliche Landmarke.
Foto: AVP Becker GmbH

Digitale Planung und Nachhaltigkeit

Treiber der urbanen Qualität

N. Richartz

Mit 18 Etagen, rund 71 Metern Höhe, etwa 23 000 Quadratmetern Mietfläche markiert der KöTower eine neue architektonische Landmarke am südlichen Ende der Düsseldorfer Königsallee. Ergänzt durch rund 1 800 Quadratmeter intensiv und extensiv begrünter Dach- und Terrassenflächen steht das Projekt exemplarisch für die Frage, wie in hochverdichteten innerstädtischen Lagen neue Aufenthaltsqualitäten entstehen können.

Digitale Planungsmethoden und ein ganzheitliches Verständnis von Nachhaltigkeit bilden dabei zentrale Treiber.

Wenn **Visionen** **Wirklichkeit** werden.

Wir begleiten und steuern anspruchsvolle Bauprojekte mit Leidenschaft – und schaffen dabei Perspektiven für alle, die Zukunft aktiv mitgestalten wollen.



Begrünte Dach- und Terrassenflächen leisten einen Beitrag zur ökologischen und sozialen Nachhaltigkeit. Foto: AVP Becker GmbH

Der Standort im Düsseldorfer Stadtbezirk Unterbilk gehört zu den am stärksten verdichteten innerstädtischen Bereichen Deutschlands. Während der nördliche Abschnitt der Königsallee von Handel und Repräsentation geprägt ist, erfordert der südliche Bereich neue Ansätze zur Balance von Arbeiten, Aufenthalt und urbaner Qualität. Begrünte Dachlandschaften, Terrassen und gemeinschaftlich nutzbare Außenräume leisten hierzu einen wesentlichen Beitrag. Nachhaltigkeit wird dabei nicht allein über energetische Kennwerte definiert, sondern als integratives Zusammenspiel aus ökologischer, sozialer und ökonomischer Verantwortung verstanden.

Digitale Planung als strategisches Instrument

Die Komplexität eines innerstädtischen Hochbauprojekts wie des KöTower erfordert eine präzise Koordination aller Beteiligten. Neben architektonischen, konstruktiven und logistischen Anforderungen steht insbesondere die digitale Projektabwicklung im Fokus. Building Information Modeling (BIM) bildet dabei das organisatorische und digitale Rückgrat der Projektabwicklung. Im Projekt KöTower wird BIM nicht isoliert eingesetzt, sondern als durchgängige Methode von der Planung über die Ausführung bis hin zur Dokumentation im Bestand verstanden. Ziel ist es, durch den konsequenten Einsatz von BIM eine transparente, belastba-

re und fortschreibbare Datengrundlage über den gesamten Planungs- und Realisierungsprozess hinweg zu schaffen.

Ein qualitätsgesichertes BIM-Koordinationsmodell fungiert somit als zentrale, verbindliche Datenbasis und wird von allen Fachdisziplinen als referenzierendes Gesamtmodell genutzt. Als „Single Source of Truth“ reduziert es Informationsverluste, erhöht die Planungsqualität, schafft Transparenz in Entscheidungsprozessen und bildet die Grundlage für die gewerkeübergreifende Abstimmung sowie für die Zusammenführung geometrischer und alphanumerischer Informationen.

Klare Verantwortlichkeiten

Die erfolgreiche Anwendung der BIM-Methodik erfordert eine klar strukturierte Projektorganisation. Entsprechend wurden frühzeitig Rollen, Verantwortlichkeiten und Kommunikationswege definiert, um transparente Entscheidungsprozesse, eine zielgerichtete Informationsverteilung und verlässliche Abstimmungen der Planungsstände sicherzustellen.

Das BIM-Management übernimmt die strategische Steuerung der BIM-Methode im Projekt und vertritt die Interessen des Auftraggebers gegenüber den digitalen Projektbeteiligten. Zu seinen Aufgaben zählen die Festlegung projektspezifischer Standards, die Weiterentwicklung der BIM-Prozesse, die Sicherstellung der Einhaltung vereinbarter Anforderungen sowie die Steuerung übergeordneter Informationsflüsse.

Die BIM-Gesamtkoordination fungiert als operative Schnittstelle innerhalb des Planungsteams. Sie verantwortet die Zusammenführung der Fachmodelle, erstellt das Koordinationsmodell und organisiert modellbasierte Abstimmungen. Unterstützt wird sie durch die BIM-Fachkoordinationen der einzelnen Disziplinen, die für die Qualität, interne Abstimmung und termingerechte Bereitstellung ihrer Fachmodelle zuständig sind.

BIM-Initialisierung und Prozessstruktur

Die Umsetzung der BIM-Methodik im Projekt basiert somit auf klar definierten Management- und Abstimmungsprozessen, die von Schüller-Plan Digital in enger Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber entwickelt wurden. Bereits in einer frühen Projektphase wurden Workshops mit allen Planungsbeteiligten durchgeführt, um ein gemeinsames Verständnis für Rollen, Prozesse und Informationsanforderungen zu etablieren.

Auf dieser Grundlage wurden einheitliche Standards für Modellierung, Datenstruktur, Benennungssysteme und Attribuierung festgelegt. Zentrales Steuerungsinstrument bilden die Auftraggeber-Informationsanforderungen (AIA) einschließlich der Modellierungsrichtlinien und fachspezifischen Informationsanforderungen (LOIN). Darauf aufbauend konkretisierten die Auftragnehmer den projektspezifischen BIM-Abwicklungsplan (BAP), der die Umsetzung der AIA verbindlich regelt und als fortzuschreibendes Dokument während des Projektverlaufs dient.

Testdatenaustausch zur Risikominimierung

Zur frühzeitigen Überprüfung der definierten BIM-Festlegungen wurde ein strukturierter Testdatenaustausch durchgeführt. Dabei wurden insbesondere die Nutzung der Gemeinsamen Datenumgebung (CDE), die Einhaltung der Modellierungsrichtlinien sowie die Interoperabilität der Fachmodelle geprüft. Ergänzt wurde der Testlauf durch beispielhafte Attribuierungen und erste modellbasierte Koordinationsprozesse, etwa in der Schlitz- und Durchbruchplanung.

Der frühe Praxistest erwies sich als wirkungsvolles Instrument zur Identifikation potenzieller Schnittstellenprobleme,

unklarer Zuständigkeiten oder technischer Hemmnisse, die noch vor dem regulären BIM-Planungsbetrieb behoben werden konnten.

Iterativer modellbasierter Planungsprozess

Der laufende BIM-Prozess folgt einem iterativen Zyklus aus Modellbearbeitung, Datenbereitstellung, Prüfung und Koordination. Erkannte Konflikte und Abstimmungsbedarfe werden nach jeder Koordinationsrunde strukturiert dokumentiert und den zuständigen Fachdisziplinen zugewiesen. Nach der Bearbeitung aktualisieren die Planungsteams ihre Fachmodelle und stellen diese fristgerecht bereit.

Die Zusammenführung zum Koordinationsmodell erfolgt zentral über die CDE und bildet die Basis für die BIM-Koordinationsrunde. Dieser zyklische Prozess ermöglicht einen kontinuierlichen Planungsfortschritt bei gleichzeitig hoher Transparenz hinsichtlich offener Themen, Zuständigkeiten und Bearbeitungsständen.

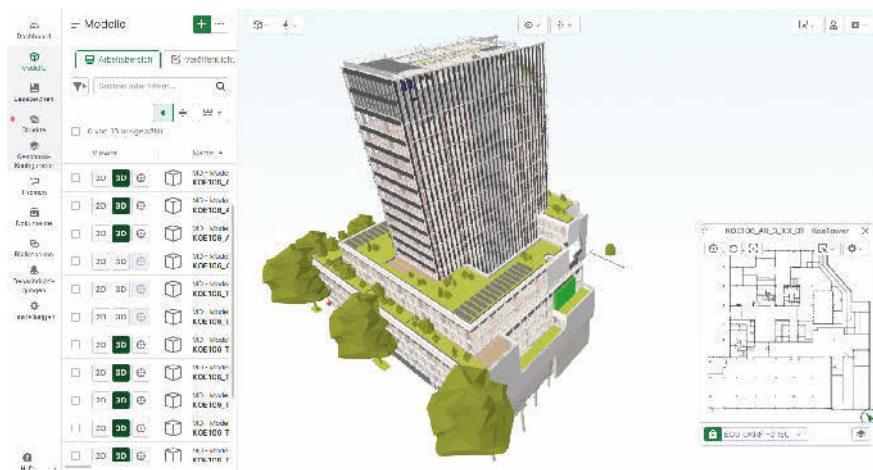
Gemeinsame Datenumgebung und vernetzte Softwarelandschaft

Als zentrale Austauschplattform wird die cloudbasierte CDE eingesetzt. Sie dient der revisionssicheren Verwaltung sämtlicher Modelle, Dokumente und projektbezogener Informationen. Die modellbezogene Kommunikation erfolgt über die offenen Standards Industry Foundation Classes (IFC) und BIM Collaboration Format (BCF).

Ein wesentlicher Mehrwert der ausgewählten CDE liegt in der direkten Schnittstellenanbindung an gängige Autor und Prüfsoftware wie Autodesk Revit und Solibri. BCF-basierte Aufgaben und Prüfanmerkungen lassen sich unmittelbar von der CDE in die jeweilige Arbeitsumgebung der Modellautor*innen synchronisieren. Offene Punkte können dadurch im räumlichen Kontext des Modells effizient bearbeitet und Bearbeitungsstände fortlaufend zurückgespiegelt werden.

BIM trifft Kreislaufwirtschaft

Über die klassische Koordination hinaus wird BIM gezielt für Nachhaltigkeitsanforderungen genutzt. Im Projekt wird durch die Auftragnehmer ein di-



Das BIM-Koordinationsmodell bildet die zentrale digitale Grundlage für Planung, Koordination und nachhaltiges Datenmanagement. Foto: Schüssler-Plan Digital

gitaler Materialpass erstellt, der die im Gebäude eingesetzten Materialien systematisch dokumentiert und bewertet. Grundlage hierfür bildet das BIM-Modell, aus dem die relevanten Material, Bauteil- und Mengendaten extrahiert und über die Plattform madaster im Account des Auftraggebers gepflegt werden.

Durch die enge Verknüpfung von aktualisierten Modellständen und der Plattform steht dem Projekt eine konsistente und belastbare Datengrundlage zur Verfügung, die sowohl für interne Entscheidungsprozesse als auch für externe Anforderungen, etwa im Rahmen von Nachhaltigkeitsbewertungen, genutzt werden kann. „Auch wirtschaftlich bietet der digitale Materialpass Vorteile: Die Bewertung von Materialrestwerten schafft eine zusätzliche Datengrundlage für Investitions- und Portfoliostrategien. Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit werden damit nicht als Gegensätze verstanden, sondern als sich ergänzende Faktoren einer zukunftsfähigen Immobilienentwicklung“, so Julia Bauer, Senior Project Managerin, Catella Project Management.

Vom Planungsmodell zur zukunftsfähigen Datenbasis

Für die Nutzung der digitalen Informationen über die Planungs- und Bauphase hinaus wird das BIM-Modell im Projekt konsequent bis zum qualitätsgesicherten As-built-Stand fortgeschrieben. Erst durch diesen modellbasierten Abgleich zwischen Planung und Ausführung wird aus dem Planungsmodell eine verlässliche Grundlage für den Betrieb. Das fortgeschriebene Modell stellt sicher, dass auch

der digitale Materialpass die realisierte Gebäudesubstanz korrekt widerspiegelt und damit über den gesamten Lebenszyklus hinweg einen konkreten Mehrwert bietet.

Der Kötower zeigt, wie durch den Einsatz von BIM, klar definierte Projektorganisationen, strukturierte Prüfprozesse und eine professionell betreute Gemeinsame Datenumgebung eine nachhaltige digitale Projektbasis geschaffen werden kann. Die Verbindung aus methodischer Steuerung, qualitätsgesichertem Datenmanagement und modellbasierter Zusammenarbeit ermöglicht nicht nur eine effiziente Koordination komplexer Planungsprozesse, sondern schafft zugleich digitale Transparenz und Zukunftssicherheit. Damit leistet das Projekt einen praxisnahen Beitrag zur Weiterentwicklung digitaler Methoden und nachhaltiger Strategien im Bauwesen – ganzheitlich geplant, konsequent umgesetzt und langfristig nutzbar dokumentiert. Die Tragwerksplanung (LP 1–6) lag bei Schüssler-Plan, während Reducta GmbH den DGNB-Rückbau, die Schadstofferkundung sowie die Bauoberleitung und Bauüberwachung für Abbruch und Spezialtiefbau verantwortete; der Spezialtiefbau wurde von ICG Ingenieure GmbH geplant. ■

Nick Richartz

Schüssler-Plan Digital GmbH

www.schuessler-plan.digital



Großmaßstäbliche Wohnquartiere in modularer Bauweise zeigen, wie sich Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit und sozialer Wohnungsbau im innerstädtischen Kontext verbinden lassen. Foto: Thomas Hillig Architekten GmbH

Modulares Bauen als Antwort

Neue Lösungen für Nachhaltiges Bauen

Der Bausektor steht unter massivem Druck: steigende Wohnraumbedarfe, knappe Ressourcen und hohe Nachhaltigkeitsanforderungen treffen auf lange Bauzeiten und geringe Planbarkeit. Modulares Bauen bietet hier einen systemischen Lösungsansatz. Durch industrielle Vorfertigung, integrierte Prozesse und kreislauffähige Konstruktionen lassen sich Effizienz, Qualität und Nachhaltigkeit gleichermaßen steigern – auch im großvolumigen urbanen Maßstab.

Die Bauwirtschaft zählt zu den ressourcenintensivsten Branchen weltweit: Rund 38 Prozent der globalen CO₂-Emissionen sowie etwa 50 Prozent des Rohstoffverbrauchs in Europa sind ihr zuzurechnen. Gleichzeitig steigt der Bedarf an Wohnraum – allein in

Deutschland fehlen mehrere hunderttausend Wohnungen. Steigende Baukosten und ein zunehmender Fachkräftemangel verschärfen diese Situation zusätzlich und erhöhen den Druck auf alle Akteure der Branche.

Traditionelle Bauweisen stoßen dabei zunehmend an ihre Grenzen. Lange Bauzeiten von häufig 18 bis 36 Monaten im

Geschosswohnungsbau, eine hohe Fehleranfälligkeit durch witterungsabhängige Prozesse sowie begrenzte Planbarkeit erschweren eine effiziente und nachhaltige Umsetzung von Bauvorhaben.

Vor diesem Hintergrund gewinnen neue, skalierbare Ansätze an Bedeutung. Konzepte wie Effizienz, Suffizienz und Konsistenz liefern dabei wichtige theoreti-



sche Leitlinien für eine nachhaltige Transformation der Bauwirtschaft. Das modulare Bauen übersetzt diese Prinzipien in die Praxis: Durch industrielle Vorfertigung lassen sich Bauzeiten um bis zu 30 bis 50 Prozent verkürzen, Materialeinsatz und Prozesse optimieren sowie Qualität und Planbarkeit signifikant steigern.

Modulbau als systemischer Ansatz

Modulares Bauen integriert Planung, Produktion und Ausführung in einem durchgängigen Prozess. Die industrielle Vorfertigung von Raummodulen unter kontrollierten Bedingungen ermöglicht standardisierte Abläufe, reduziert Schnittstellen und erhöht Qualität sowie Planbarkeit. Gleichzeitig werden Bauzeiten verkürzt und Prozesse effizienter gestaltet.

Warum Modulbau nachhaltig ist

Die Nachhaltigkeit modularer Bauweisen zeigt sich in vier zentralen Aspekten:



Industriell vorgefertigte Raummodule ermöglichen eine Verkürzung der Bauzeit und erhöhen Qualität sowie Planbarkeit im urbanen Wohnungsbau. Foto: Daiwa House Modular Europe GmbH_Dirk Enters

Ressourceneffizienz: Durch präzise Fertigung im Werk wird der Materialeinsatz optimiert und Verschnitt deutlich reduziert – im Vergleich zu konventionellen Baustellen mit bis zu zehn bis 15 Prozent auf unter fünf Prozent.

CO₂-Bilanz: Verkürzte Bauzeiten, geringere Baustellenemissionen und gebün-

delte Logistik führen zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen in der Bauphase um bis zu 30 bis 50 Prozent.

Kreislaufwirtschaft: Modulare Gebäude sind auf Rückbau und Wiederverwendung ausgelegt. Bauteile können sortenrein getrennt und erneut genutzt werden, wodurch Materialkreisläufe ge-

22. – 25. September 2026

SECURE YOUR BUSINESS



Die Leitmesse für Sicherheit



JETZT TICKET SICHERN!

Zum 1. Mal parallel:
die EURO DEFENCE EXPO –
die neue internationale
Fachmesse der
Verteidigungsindustrie



**security
essen 26**

the number one

www.security-essen.de

**MESSE
ESSEN**



geschlossen und Ressourcen geschont werden.

Lebenszykluskosten: Die schnellere Fertigstellung ermöglicht eine frühere Nutzung, während standardisierte Bauweisen Betrieb und Instandhaltung langfristig reduzieren.

Modulares Bauen überführt damit zentrale Nachhaltigkeitsanforderungen in einen skalierbaren, industriellen Bauprozess.

Modulares Bauen im urbanen Maßstab

Das Wohnquartier an der Landsberger Allee in Berlin-Lichtenberg, realisiert im Auftrag der Gewobag und umgesetzt durch Daiwa House Modular Europe, ist mit insgesamt 1 548 Wohnungen das größte modular errichtete Wohnprojekt Europas. Auf einer Wohnfläche von rund 63 500 Quadratmetern entsteht ein sieben- bis achtgeschossiges Quartier, das neben Wohnraum auch 15 Gewerbeeinheiten, eine Kindertagesstätte sowie Nahversorgungsangebote integriert. Ein Großteil der Wohnungen ist mietpreis- und belegungsgebunden (1 316 Einheiten) und rund 1 100 Wohnungen sind barrierefrei geplant. Damit leistet das Projekt nicht nur einen wesentlichen Beitrag zur Entlastung des angespannten Berliner Wohnungsmarktes, sondern zeigt zugleich, wie sich serielles und modulares Bauen im großvolumigen innerstädtischen Kontext wirtschaftlich, sozial und nachhaltig umsetzen lässt.

Ein wesentlicher Vorteil der modularen Bauweise liegt in der deutlichen Verkürzung der Bauzeit. Durch die indus-

trielle Vorfertigung der Raummodule im Werk und die parallele Ausführung von Fundamentarbeiten auf der Baustelle können Bauzeiten um mehrere Monate reduziert werden. Dies ist insbesondere in der innerstädtischen Lage von großer Bedeutung, da Bauverkehr, Lärmemissionen und Beeinträchtigungen für Anwohner spürbar minimiert werden.

Auch aus technischer und ökologischer Perspektive setzt das Projekt Maßstäbe. Für zwei Bauteile wird eine DGNB-Gold-Zertifizierung angestrebt, während gleichzeitig der Effizienzhausstandard EH55 beziehungsweise EH55 NH umgesetzt wird. Ergänzt wird dies durch ein umfassendes Nachhaltigkeitskonzept auf Quartiersebene: Begrünte Dächer in Kombination mit Photovoltaikanlagen tragen zur Energieerzeugung und Klimaanpassung bei, während Regenrückhaltesysteme die städtische Infrastruktur entlasten. Zusätzlich werden Ausgleichsflächen und Maßnahmen zur Förderung der Biodiversität integriert.

Ein weiterer zentraler Aspekt ist die konsequente Ausrichtung auf Kreislaufwirtschaft. Die verwendeten Module basieren auf einer Stahlkonstruktion, die auf eine langfristige Nutzung sowie Wiederverwendbarkeit ausgelegt ist. Die eingesetzten Materialien – darunter Stahl, Beton sowie industriell vorgefertigte Gipsfaser- und Dämmstoffe – sind auf Langlebigkeit, Recyclingfähigkeit und sortenreine Trennbarkeit ausgelegt. Ein hoher Anteil der Module kann rückgebaut und wiederverwendet werden, wodurch sich die Nutzungsdauer der eingesetzten Ressourcen erheblich verlängert und die CO₂-Bilanz über den gesamten Lebenszyklus verbessert.

Neben ökologischen und wirtschaftlichen Vorteilen werden auch soziale Aspekte berücksichtigt. Das Quartier schafft bezahlbaren Wohnraum im urbanen Kontext und erfüllt Anforderungen an Barrierefreiheit sowie Wohnkomfort. Aspekte wie Raumluftqualität, thermisches Verhalten und akustischer Komfort werden bereits in der Planungs- und Fertigungsphase systematisch berücksichtigt.

Modulares Bauen als Schlüssel

Das Projekt an der Landsberger Allee zeigt beispielhaft, wie modulares Bauen nachhaltige Anforderungen mit den Herausforderungen des urbanen Wohnungsbaus verbinden kann. Industrielle Vorfertigung, optimierte Prozesse und verkürzte Bauzeiten ermöglichen eine ressourcenschonende und zugleich wirtschaftliche Umsetzung großer Wohnungsbauprojekte.

Nachhaltigkeit entsteht dabei nicht durch einzelne Maßnahmen, sondern durch das Zusammenspiel aus effizientem Materialeinsatz, reduzierten Emissionen, kreislauffähigen Konstruktionen und langfristig optimierten Lebenszykluskosten. Modulare Bauweisen integrieren diese Aspekte systemisch und schaffen gleichzeitig ein hohes Maß an Qualität, Planbarkeit und Skalierbarkeit.

Vor dem Hintergrund steigender Wohnraumbedarfe, wachsender regulatorischer Anforderungen und begrenzter Ressourcen kann der Modulbau damit einen wichtigen Beitrag zur Bauwende leisten – insbesondere dort, wo schnell, wirtschaftlich und nachhaltig neuer Wohnraum geschaffen werden muss. ■

www.daiwahousemodular.eu



Technik und Umsetzung im großmaßstäblichen Modulbau

Wie Modulbau in der Höhe funktioniert

Großvolumige Modulbauprojekte stellen hohe Anforderungen an Statik, Konstruktion und Ausführung. Tragwerksplanung, industrielle Vorfertigung und Montage müssen dabei nahtlos ineinandergreifen. Im Interview gibt Lukas Böhmer, Project Engineer bei Daiwa House Modular Europe, Einblicke in die zentralen technischen Fragestellungen des Projekts in Berlin und erläutert, wie der hohe Vorfertigungsgrad Qualität, Sicherheit und Effizienz im Modulbau beeinflusst.

Mit sechs- bis sieben-geschossigen Gebäuden bewegt sich der Modulbau zunehmend in Höhenbereiche, die bislang klassischen Bauweisen vorbehalten waren. Windlasten, Eigengewichte, Modulfugen sowie Anforderungen an Schall- und Brandschutz rücken dabei in den Fokus der Planung. Anhand des Projekts in der Landsberger Allee, Berlin, erläutert Lukas Böhmer, Project Engineer bei Daiwa Hou-

se Modular Europe, wie präzise Vorfertigung, standardisierte Systeme und eingespielte Montageprozesse nicht nur konstruktive Sicherheit gewährleisten, sondern auch Bauzeit, Ressourceneinsatz und Abläufe messbar optimieren können.

Welche zentralen statischen und konstruktiven Herausforderungen ergeben sich bei einem Modulbauprojekt dieser Größenordnung – insbesondere in Bezug auf Tragwerk, Lastabtragung und Modulfugen?

Lukas Böhmer: Bei Gebäuden mit sechs beziehungsweise sieben Geschossen sind insbesondere die auftretenden Windkräfte sowie das Eigengewicht der einzelnen Module entscheidende Faktoren für die statische Planung. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurden geeignete Querschnitte für die Stahlträger und Stahlstützen ausgewählt. An bestimmten Stellen war es zudem erforderlich, zusätzliche Profile zu planen und einzusetzen, um eine ausreichende Stabilität und Tragfähigkeit zu gewährleisten.

**WIR BAUEN
MIT BEGEISTERUNG.
AUCH DIGITAL.**



WOLFF & MÜLLER setzt auf BIM – Building Information Management.

Mit BIM gehen wir einen gemeinsamen Weg, um den Planungs- und Bauprozess für alle Beteiligten transparenter, schneller und effizienter zu gestalten. Durch das übergreifende Management digitaler Informationen können wir die realen Abläufe auf der Baustelle deutlich optimieren und besser aufeinander abstimmen. So bauen wir partnerschaftlich immer effektiver und innovativer.

Mehr erfahren unter wolff-mueller.de/unternehmen/epi-prinzip/digitalisierung



Die Module werden untereinander durch Kopplungsplatten und Kopplungsdorne verbunden, wodurch ein statischer Verbund entsteht. Dieser Verbund sorgt dafür, dass die einzelnen Module als zusammenhängende Einheit wirken und die Lasten gemeinsam aufnehmen. Sämtliche senkrechten Kräfte werden über die Stützen der Module auf Ankerplatten übertragen und schließlich in eine massive Boden- beziehungsweise Deckenplatte eingeleitet. Dadurch wird eine sichere und effiziente Lastabtragung gewährleistet, die den spezifischen Anforderungen eines Modulbaus in dieser Größenordnung entspricht.

Wie beeinflusst der hohe Vorfertigungsgrad die Planungs- und Ausführungsqualität, etwa bei Toleranzen, Anschlüssen sowie beim Schall- und Brandschutz?

Böhmer: Die Produktion der Module erfolgt in Hallen und ist somit unabhängig von äußeren Witterungseinflüssen. Dadurch erreicht die Ausführungsqualität ein besonders hohes Niveau. Statisch relevante Bauteile aus Stahl werden präzise, millimetergenau gefertigt und mit Brandschutzplatten eingehaust. Dies gewährleistet einen umfassenden Brandschutz und eine hohe Sicherheit im Modulbau.

Der notwendige Schallschutz wird durch entsprechende Wandaufbauten der einzelnen Module sichergestellt. Die modulare Bauweise sorgt zudem für eine systematische Entkopplung der Wohneinheiten, wodurch Geräuschübertragungen zwischen den Wohnungen minimiert werden.



Lukas Böhmers Tätigkeit bei Daiwa House liegt in der technischen Planung und Koordination modularer Wohnungsbauprojekte.

Foto: Lukas Böhmer

An besonders sensiblen Stellen, wie beispielsweise den Fluren, wird der Trittschall auf dem Stahlbeton durch entsprechende Dämmungen reduziert. Zusätzlich werden Gummilager am Stahlbau eingesetzt, um auch hier eine effektive Entkopplung zu erzielen und den Schallschutz weiter zu verbessern.

Welche messbaren Vorteile zeigt das Projekt bereits heute im Hinblick auf Bauzeit, Ressourceneffizienz und CO₂-Reduktion gegenüber konventionellen Bauweisen?

Böhmer: Ein besonderes Merkmal des Modulbaus ist der hohe Wiederholungsfaktor, der sich unmittelbar auf die Planung und Umsetzung des Projekts auswirkt. Durch die standardisierte Bauweise können Mas-

sen und Mengen präzise pro Modul erfasst werden. Dies ermöglicht eine exakte Kalkulation für den Einkauf der benötigten Materialien, die sich an der jeweiligen Modulanzahl orientiert. Diese Vorgehensweise führt nicht nur zu einer effizienten Ressourcennutzung, sondern trägt auch zur Optimierung der Bauabläufe bei, da Planung und Logistik auf Grundlage wiederkehrender Einheiten erfolgen.

Im Modulbau entsteht Qualität nicht auf der Baustelle, sondern im Werk.

Welche Schnittstellen zwischen Tragwerksplanung, industrieller Fertigung und Montage waren besonders kritisch – und welche Lessons Learned ergeben sich daraus für zukünftige Projekte?

Böhmer: Ein besonders kritischer Aspekt bei der Realisierung eines Modulbauprojekts dieser Größenordnung ist die Montage der einzelnen Module auf der Baustelle. Nach unseren Beobachtungen erfordert dieser Prozess ein eingespieltes und erfahrenes Team, um das reibungslose Setzen der Module sicherzustellen. Hierbei kommt es auf eine präzise Abstimmung und eine sorgfältige Ausführung an, da Fehler oder Verzögerungen direkt Auswirkungen auf die gesamte Bauabwicklung haben können.

Während dieser Bauphase ist insbesondere auf die temporäre Abdichtung der Fugen und Kopplungselemente zu achten. Diese Maßnahmen sind notwendig, um die Module während der Montage vor witterungsbedingten Einflüssen und möglichen Schäden zu schützen. Ein sorgfältiges Vorgehen in diesem Bereich trägt entscheidend zur Qualität und Langlebigkeit des Bauwerks bei und stellt sicher, dass die Module später als stabile und geschützte Einheit funktionieren. ■

Das Gespräch führte Heike van Ooyen,
Redaktion **Bauingenieur**

PERSÖNLICHES

Lukas Böhmer ist 34 Jahre alt und absolvierte sein Architekturstudium an der Fachhochschule Dortmund, das er im Februar 2022 abschloss. Seit Juli 2022 ist Böhmer bei der Daiwa House Modular Europe GmbH in Bochum tätig. Nach dem Einstieg als Bauzeichner im Bereich der Planung modularer Bauprojekte entwickelte er sich innerhalb eines Jahres zum Projektingenieur weiter und ist seit August 2023 in dieser Funktion beschäftigt.

Der Schwerpunkt Böhmers Tätigkeit liegt in der technischen Planung und Koordination modularer Wohnungsbauprojekte. Dazu zählen die Bearbeitung konstruktiver Detailfragen, bauphysikalischer Anforderungen sowie des vorbeugenden Brandschutzes. Zudem fungiert er als Schnittstelle zwischen interner Planung, Ausführung und externen Fachplanern und verfolgt dabei einen lösungsorientierten, effizienten Planungsansatz.



Die stillgelegte Siemensbahn soll bis 2029 reaktiviert werden. Foto: KREBS+KIEFER Ingenieure GmbH

Digitale Bestandserfassung

BIM als Schlüssel zur Reaktivierung

Die Reaktivierung der Siemensbahn zeigt exemplarisch, wie sich komplexe Infrastrukturprojekte im denkmalgeschützten Bestand mithilfe von BIM, hochdetaillierten Bestandsmodellen und projektspezifischer Automatisierung effizient planen lassen.

Berlin gehört zu den am schnellsten wachsenden Städten Deutschlands. Um die Schieneninfrastruktur in der Hauptstadtregion an diese Entwicklung anzupassen, verfolgen die Länder Berlin und Brandenburg zusammen mit der Deutschen Bahn und dem Verkehrsverbund Berlin-Brandenburg (VBB) das Gemeinschaftsprojekt i2030. Zu den insgesamt neun großen Teilprojekten des Vorhabens gehört auch die Reaktivierung der Siemensbahn. Die zweigleisige Strecke wurde zwischen 1927 und 1929 von der Firma Siemens & Halske erbaut, um die Berliner Siemensstadt im Osten Spandaus zu erschließen. Im Zuge des Eisenbahnerstreiks 1980 wurde sie stillgelegt.

2029 – rund 100 Jahre nach ihrer Einweihung – soll die Siemensbahn wieder den Betrieb aufnehmen. Für die Planung des Großprojekts im Auftrag der DB InfraGO AG ist die Ingenieurgemeinschaft Siemensbahn verantwortlich, die aus der Sweco GmbH und Krebs+Kiefer Ingenieure GmbH besteht. Krebs+Kiefer ist im Gesamtprojekt technisch federführend und übernimmt zugleich die Teilprojektleitung Konstruktiver Ingenieurbau (KIB).

Mammutaufgabe in drei Akten

Das Projekt ist in drei Planungsabschnitte unterteilt. Abschnitt 1.1 umfasst die Strecke von Jungfernheide bis zum Spandauer Spreeufer. Vorgesehen sind

mehrere Neubauten, darunter eine dritte Bahnsteigkante mit Überdachung und ein zusätzliches S-Bahn-Gleis am Bahnhof Jungfernheide sowie neue Eisenbahnüberführungen am Tegeler Weg und über die Spree. Zudem entstehen Ersatzneubauten für bestehende Brückenbauwerke, Stützbauwerke und eine Kehranlage zwischen Jungfernheide und der Lise-Meitner-Straße. Außerdem werden bestehende Eisenbahninfrastrukturanlagen zurückgebaut oder instandgesetzt.

Abschnitt 1.2, das Herzstück der Siemensbahn, betrifft das rund 800 Meter lange denkmalgeschützte genietete Stahlviadukt. Geplant sind die Instandsetzung beziehungsweise Ertüchtigung der historischen Stahlkonstruktion sowie die Modernisierung des Haltepunkts Wernerwerk



Das Mammutprojekt ist in drei Bauabschnitte unterteilt. Foto: KREBS+KIEFER Ingenieure GmbH

mit Bahnsteigüberdachung, Zugängen, einem Empfangsgebäude und einer barrierefreien Erschließung.

Der dritte Abschnitt (1.3) verläuft von Popitzweg bis zum Endbahnhof Gartenfeld überwiegend auf einem Bahndamm. Die Baumaßnahmen umfassen eine viergleisige Abstellanlage mit Einhausung am Endbahnhof sowie die umfassende Instandsetzung der EÜ Rohrdamm mit dem Haltepunkt Siemensstadt und des Bahnhofs Gartenfeld einschließlich Bahnsteigüberdachungen, Zugängen und Bahnhofsgebäuden.

800 Meter langes Baudenkmal

Da weite Teile der Siemensbahn unter Denkmalschutz stehen, zeichnet sich ein Großteil des Projekts durch Bauen im Bestand aus. Ein Beispiel für diese anspruchsvolle Planungsaufgabe ist das rund 800 Meter lange Viadukt in Planungsabschnitt 1.2. Die 1928 erbaute Eisenbahnüberführung besteht aus einzelnen Bauwerksketten, die sich aus insgesamt 71 Einzelbauwerken – einschließlich des Haltepunkts Wernerwerk – zusammensetzen.

Angesichts des Umfangs und der Komplexität des Projekts ist es wenig überraschend, dass die Reaktivierung der Siemensbahn weit mehr spezielles Know-how als klassische Neubauplanungen erfordert. Besonders Planungsabschnitt 1.2 stellt die Ingenieure vor außergewöhnliche Herausforderungen: Hier treffen historische Bausubstanz, jahrzehntelanger Instandhaltungsstau und höchste denkmalpflegerische Anforderungen auf moderne Ingenieurskunst. Was das im Detail bedeutet – und wie Krebs+Kiefer diese Aufgabe meistert – zeigt ein genauerer Blick

auf die umfangreichen und detaillierten Planungen des Stahlviadukts.

Bei den Überbauten handelt es sich um Stahl-Nietkonstruktionen mit einem Trogquerschnitt (außen liegende Hauptträger als Vollwandträger mit dazwischen befindlicher Fahrbahnplatte in orthotroper Bauweise). Die Hauptträger sind aus genieteten Einzelblechen und Winkelprofilen zusammengesetzt. In Brückenquerrichtung spannen Querträger zwischen den Hauptträgern, die entweder ebenfalls aus genieteten Einzelblechen und Winkelprofilen oder aus gewalzten Profilen bestehen. Parallel zu den außen liegenden Hauptträgern verlaufen zusätzliche Längsträger, bestehend aus I- oder U-Profilen. Auf den Längsträgern sind wiederum Buckelbleche angeordnet, die die Grundlage für den Oberbau bilden.

Rund 50 Jahre ohne Wartung und Instandsetzung haben ihre Spuren hinterlassen. So förderten Zustandsuntersuchungen im Jahr 2023 zahlreiche Schäden zutage. Dazu zählen unter anderem Korrosionserscheinungen – insbesondere Spalt- und Flächenkorrosion –, Deformationen an Bauteilen, Kriegsschäden und Kerben. Darüber hinaus wurden fehlende oder schadhafte Verbindungsmittel und -bleche an Ober- und Untergurt der Hauptträger im Bereich der Bauwerksübergänge festgestellt. Weitere Mängel betreffen beschädigte Übergangskonstruktionen, deformierte und schadhafte Geländer sowie eine mangelhafte und teilweise unvollständige Entwässerung. Auch massive Bauteile weisen Schäden wie Risse, Hohlstellen und Betonabplatzungen mit freiliegender Bewehrung auf. Zudem zeigen die Lager Korrosionserscheinungen und unplanmäßige Lagerstellungen. Es sind somit umfangreiche Maßnahmen zur Instandsetzung des historischen Stahlviadukts gefor-

dert, um einen uneingeschränkten und sicheren Eisenbahnbetrieb zukünftig wieder zu gewährleisten.

Maßnahmen zur Instandsetzung

Die bestehenden Unterbauten des Bahnviadukts bleiben weitestgehend erhalten und werden instandgesetzt. Im Rahmen der Instandsetzung der Pfeiler werden die Auflagerbänke erneuert und neue Lagersockel errichtet. Die Verklammerung der Pfeiler am Siemensdamm wird substanzschonend vollständig zurückgebaut, anschließend erfolgt eine Betoninstandsetzung der tragenden Betonpfeiler und eine Wiederherstellung der historischen Verklammerung. Beschädigte oder fehlende Teile werden durch neue ersetzt, die sich am Bestand orientieren.

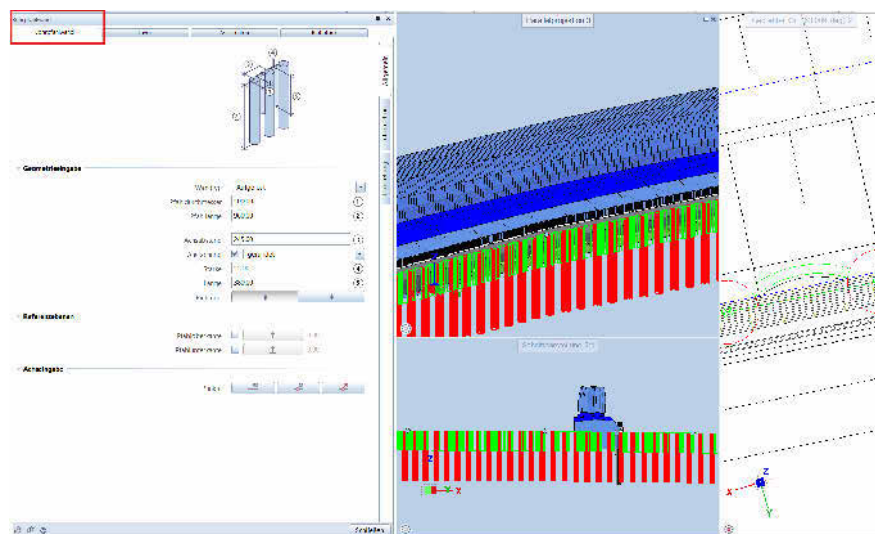
Wie schon im ursprünglichen Bestand vorgesehen, sind für die Reaktivierung der Strecke zwei Gleise geplant. Die Querschnittsgestaltung erfolgt unter Berücksichtigung der Bestandssituation und der vorliegenden Zwangspunkte im Bestand. Das Tragwerk der Überbauten bleibt im Wesentlichen erhalten und wird nach statisch-konstruktiven Erfordernissen verstärkt. Deformierte oder stark beschädigte Bauteile sind auszutauschen. Die Buckelbleche werden instandgesetzt und in Ausnahmefällen erneuert. Ebenso erfolgt eine Instandsetzung der Verbindungsmittel, wobei schadhafte Nietverbindungen aufgrund des Denkmalschutzes in optisch relevanten Bereichen durch neue Niete sowie in untergeordneten Bereichen durch Passschrauben ersetzt werden. Gleiches gilt für überlastete Nietanschlüsse. Um den Spalt zwischen Schotterrandblechen und Hauptträgern zu minimieren, werden die Schotterrandbleche durch Schotterbe-

grenzungsbleche ergänzt. Vier der insgesamt 71 Teil-Bauwerke des Viadukts sind so stark beschädigt, dass sie in Anlehnung an den Bestand neu errichtet werden müssen.

Die zahlreichen Brückenlager werden begutachtet und bei Bedarf instandgesetzt oder erneuert. Zwischen sämtlichen Bauwerken sind außerdem neue Fahrbahn-übergangskonstruktionen geplant. Zur oberseitigen Abdichtung der Fahrbahn wird eine Schottertrogbeschichtung aufgebracht. Die Stahlüberbauten werden vollständig stahlbaumäßig durchgearbeitet und erhalten einen neuen Korrosionsschutz. Die Farbgebung orientiert sich hierbei am ehemaligen Bestand. Das Entwässerungssystem – bestehend aus Tüllöffnungen in den Buckelblechen und einer offenen Sammelleitung – wird grundlegend beibehalten. Nur die überwiegend schadhafte Entwässerungsleitungen werden erneuert und als geschlossene Systeme ausgeführt.

Technologisch aufwendige Planung mit großen Datenmengen

Das gesamte Projekt wird unter Anwendung von Building Information Modeling (BIM) umgesetzt. Grundlage für die technologisch sehr aufwendige Planung bilden in Teilabschnitt 1.2 hoch detaillierte Bestandsmodelle des Stahlviadukts. Erstellt wurden diese durch den Nachunternehmer ARC-GREENLAB auf Basis umfassender Laserscans. Die umfangreichen Bestandsmodelle in LOD 400 für die gesamten rund 800 Meter des Viadukts entstanden in sehr engem Austausch zwischen dem Vermessungsbüro und Krebs+Kiefer. Kay Franke, Abteilungsleiter bei Krebs+Kiefer, berichtet: „Im Zuge der weiteren Planung war es immer wieder erforderlich, die Bestands-



Die Planung für das rund 800 Meter lange Stahlviadukt erfordert hochdetaillierte Bestandsmodelle (LOD 400). Foto: KREBS+KIEFER Ingenieure GmbH

modelle mit den Punktwolken abzugleichen und zu überprüfen, ob die modellierten Blechdicken oder sonstigen Abmessungen auch in der Punktwolke nachvollziehbar sind. Hierzu nutzen wir auch die Scalypso-Schnittstelle in Allplan.“

Eine besondere Herausforderung stellen die enormen Datenmengen dar, die sich aus dem hohen Detaillierungsgrad der Modelle ergaben. Zwar wurden die 71 Bauwerke entsprechend ihrer geometrischen Aufgliederung ohnehin als einzelne Teilmodelle umgesetzt. Dennoch umfasste die Modellierung unter anderem allein 150 000 Nieten, die alle korrekt nach Aufmaß in den maßgebenden Bereichen positioniert waren. Um eine ausreichende Performance während der Bearbeitung zu gewährleisten, wurden daher auch die Niete für jedes Bauwerk als gesondertes Teilmodell ausgewiesen. Darüber hinaus wurde für die Planung eine Aufteilung der Bestandsmodelle in Rückbau, verbleibender Bestand und Neubau vorgenommen.

BIM stellt die Weichen

Die präzisen Bauwerksmodelle, die Krebs+Kiefer mithilfe von Allplan und individuellen PythonParts erstellen konnte, bilden die Grundlage für eine erfolgreiche BIM-basierte Planung von Teilabschnitt 1.2. Durch die konsequente Anwendung der BIM-Methodik im gesamten Projekt „Reaktivierung der Siemensbahn“ konnten Schnittstellen und Planungsherausforderungen frühzeitig erkannt und gelöst werden. Zu den zentralen Anwendungsfällen zählen insbesondere die Bauablauf- und Terminplanung (4D), die Ableitung von Mengen- und Kostenermittlung (5D). Für ihre Planung wurde die Ingenieurgemeinschaft Siemensbahn bestehend aus Sweco und Krebs+Kiefer zusammen mit den Nachunternehmern ARC-GREENLAB und GI-CONSULT 2025 von Building Smart mit dem BIM Champions Award in der Kategorie Planung ausgezeichnet. ■ www.allplan.com

Einfach Ausschreiben!

SCHLANK • SCHNELL • LEISTUNGSSTARK • AVA-SOFTWARE • FREE DOWNLOAD: www.avaplan.de

AVAPLAN



Das Bauprojekt Schöneberger Eck wurde im Mai 2025 fertiggestellt. Foto: Patrick Kuc, ROCKSTONE Real Estate

Preconstruction, BIM und Lean Construction

Gut geplant ist halb gebaut

R. Renner

Mit dem Schöneberger Eck realisierte Wolff & Müller in Berlin ein anspruchsvolles Gebäudeensemble mit Büro-, Wohn- und Gewerbenutzung. Eine vorgelagerte siebenmonatige Preconstruction-Phase sowie der konsequente Einsatz von Building Information Management (BIM) und Lean Construction schufen die Grundlage für hohe Planungs-, Termin- und Kostensicherheit – trotz beengter innerstädtischer Lage, mehrerer Auftraggeber und komplexer technischer Anforderungen.

Nach dem EUREF-Campus, auf dem Wolff & Müller in den letzten Jahren sechs Gebäude errichtet und das Stahlskelett des Gasometers saniert sowie in dessen Innerem einen Neubau realisiert hat, setzte

das Bauunternehmen nun das nächste Großprojekt in Berlin-Schöneberg um. In zentraler Lage entstand mit dem Schöneberger Eck ein Büro-, Wohn- und Gewerbekomplex. Um das anspruchsvolle Bauprojekt zu meistern, setzte Wolff & Müller auf eine partnerschaftliche Preconstruction-Phase mit den Auftraggebern

sowie auf BIM und Lean Management. BIM war für die Planung und Abstimmung mit den Projektbeteiligten unverzichtbar und half, Fehler schon im Vorfeld zu erkennen und auszuräumen. Für eine bessere Koordinierung der Bauabläufe kamen zudem drei auf die Bauwirtschaft zugeschnittene Anwendungsfälle

aus dem Lean Management (Lean Construction) zum Einsatz.

Ein vielseitiges Bauprojekt

Das Schöneberger Eck vereint mehrere Nutzungen: Im zwölfgeschossigen, gestaffelten Hochhaus befindet sich im Erdgeschoss eine Drogerie, ab dem ersten Obergeschoss verteilen sich auf elf Etagen moderne Büroflächen. Die gesamte Bruttogeschossfläche beträgt 8 550 Quadratmeter. Zwei weitere Gebäude bieten auf 2 460 Quadratmetern 22 Mietwohnungen sowie Ladenflächen. Das Grundstück liegt zwischen Barbarossa-, Martin-Luther- und Speyerer Straße. Es gab gleich zwei Auftraggeber: Rockstone Real Estate für das Hochhaus und GbR Kotek Semel für die Wohn- und Ladenflächen. Sie beauftragten die Wolff & Müller Hoch- und Industriebau-Niederlassungen Berlin und Dresden mit dem schlüsselfertigen Bau. Die Baugrube und den Spezialtiefbau realisierten die Auftraggeber ab November 2022, Wolff & Müller startete im Mai 2023 mit dem Hochbau. Die Fertigstellung erfolgte im Mai 2025.

Hoch hinaus auf wenig Fläche

Das Projekt Schöneberger Eck vereinte Neubau und Bauen im Bestand, weil sich auf dem Grundstück in Richtung Barbarossastraße bereits ein Gebäude befand. Wolff & Müller sanierte darin Ladenflächen und erweiterte eine Ladeneinheit in den Neubau. Im Gebäude liegende Wohnungen blieben unberührt. Durch die Bauarbeiten an mehreren Gebäuden war der Platz auf dem dreieckigen Grundstück sehr beengt. Vor allem das zwölfgeschossige Hochhaus stellte besondere Anforderungen an die Bauplanung und -ausführung. Es ist fünf Etagen höher als die umliegenden Gebäude und ragt deutlich aus der Nachbarschaft heraus. Besonders markant: die gestaffelte Vorhangsfassade mit gefalteten Metallelementen. Auch im Inneren des Hochhauses gibt es Besonderheiten: Für die Gebäudesicherheit wurden ein Feuerwehraufzug und ein Sicherheitstreppehaus mit Rauchdruckanlage eingebaut, die das Treppenhaus im Brandfall durch gezielten Überdruck rauchfrei hält. Zudem darf das vom Gebäude aufgefangene Regenwasser nur begrenzt in die Kanalisation eingeleitet werden, was den Einbau eines Regenwasserbehälters unterhalb



Das Grundstück befindet sich in Berlin-Schöneberg zwischen Barbarossa-, Martin-Luther- und Speyerer Straße. Foto: Entwurf DGI Bauwerk Architektur + Management, Rendering XOIO

der Tiefgarage als Zwischenspeicher notwendig machte. Hinzu kam in der Tiefgarage ein Pkw-Aufzug, der platzsparendes Parken ermöglicht.

Dem Hochhaus lag ein umfassendes Nachhaltigkeitskonzept zu Grunde: Rockstone Real Estate strebt dafür eine LEED-Platin-Zertifizierung an. Das ist die höchste Auszeichnungsstufe für nachhaltiges Bauen nach internationalem Standard. Zudem ein Wunsch des Auftraggebers: die Verwendung von CO₂-reduziertem Beton als Baumaterial, der den CO₂-Fußabdruck um 40 Prozent verringerte. Um das komplexe Bauvorhaben termingerecht, kosteneffizient sowie in der geplanten Qualität und Nachhaltigkeit zu realisieren, waren die Preconstruction-Phase, BIM und Lean Construction entscheidende Hebel.

Mit der Preconstruction-Phase auf Kurs

Vor dem eigentlichen Baubeginn fand eine siebenmonatige Preconstruction-Phase mit beiden Auftraggebern statt. In Workshops erarbeiteten die Bauherren und Wolff & Müller gemeinsam das Bau-Soll, stimmten technische Lösungen früh-

zeitig ab und stellten die Weichen für einen reibungslosen Bauablauf. Besonders deutlich wurde der Mehrwert bei der Fassade des Bürogebäudes: Durch gezielte Optimierungen, wie den Einsatz von Holz-Aluminium-Verbundfenstern mit integriertem Sonnenschutz anstelle von Aluminium-Fenstern mit außen liegendem Sonnenschutz, konnten die Baukosten deutlich gesenkt werden. Die Arbeitsvorbereitung wurde in die Preconstruction-Phase vorgezogen, sodass der Bau direkt im Anschluss starten konnte. Ein Vorteil davon war die frühzeitige Abstimmung mit dem Tragwerksplaner. Dadurch wurden logistische Details wie Kranstandorte, Bauaufzug und Öffnungen im Rohbau bereits vorab geklärt und direkt im 3D-Modell abgebildet – ein expliziter Wunsch von Wolff & Müller, weil der Mehrwert davon in der Arbeitsvorbereitung besonders hoch war.

BIM für ganzheitliche Projektsteuerung

Mit der modellbasierten Methode BIM entsteht ein digitales Abbild des Bauwerks, das alle relevanten Informationen



Das digitale Abbild des Schöneberger Ecks als BIM-Modell. Foto: DGI Bauwerk

zum Objekt an einem Ort bündelt. Wolff & Müller arbeitet bereits seit 2008 mit BIM und ist von dessen Vorteilen überzeugt. Beim Schöneberger Eck kam BIM schon in der Preconstruction-Phase zum Einsatz. In dieser Phase diente das BIM-Modell vor allem als Arbeitsgrundlage für die Abstimmung, Kostenoptimierung und die gemeinsame Entwicklung von Lösungen. Für die Ausführungsplanung (Leistungsphase 5) erstellten Architekten der DGI Bauwerk Gesellschaft von Architekten mbH ein umfassendes BIM-Modell mit der Software Revit. Am Modell arbeiteten neben DGI Bauwerk die HDH Ingenieurgesellschaft für technische Gebäudeausrüstung mbH und die Neubauer + Ernst Ingenieure GmbH. Ihre Fachmodelle wurden regelmäßig über IFC-Dateien mit dem Architekturmodell zusammengeführt.

BIM brachte beim Schöneberger Eck einen spürbaren Mehrwert für die Bauablaufplanung im Rohbau. Zunächst wurde das 3D-Modell mit dem Bauzeitenplan verknüpft und so um die Komponente Zeit erweitert. Diese sogenannte 4D-Taktplanung verbindet die räumliche Darstellung der Gebäude mit der zeitlichen Abfolge der Bauprozesse und den Prinzipien von Lean Construction. Die Gebäude werden dafür in Taktbereiche unterteilt – also Abschnitte, in denen jeweils die gleichen Arbeitsschritte stattfinden. Anschließend wird festgelegt, in welcher Reihenfolge die Gewerke die Taktbereiche durchlaufen. So lassen sich Überschneidungen, beispielsweise zwischen der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) und

den Tragwerksplanern, frühzeitig erkennen und vermeiden. Die Prüfung des BIM-Modells erfolgte über Dalux – eine Software, in der BIM-Modelle hochgeladen und kommentiert werden können. Über Dalux lassen sich auch Fotos im Modell verorten, um den Baufortschritt zu dokumentieren oder Baumängel zu erfassen. Weitere BIM-Anwendungsfälle ergaben sich in der Ausführungsphase (Leistungsphase 8). Hier wurden Werkpläne, Datenblätter und Zulassungen, etwa für Brandschutzklappen und -türen, direkt am jeweiligen Bauteil im BIM-Modell hinterlegt. Sehr hilfreich war zudem die Türliste, die ebenfalls modellbasiert erstellt wurde. Auch nach Fertigstellung des Schöneberger Ecks dient das Modell als wichtige Informationsquelle für Betrieb, Wartung und Mängelverfolgung, insbesondere in der Gewährleistungsphase.

Gezielte Auswahl von Lean-Anwendungsfällen

Damit Bauprojekte effizient und wirtschaftlich ablaufen, setzt Wolff & Müller zunehmend auf Lean Construction. Beim Schöneberger Eck kamen gleich drei Lean-Anwendungsfälle zum Einsatz: das Last Planner System, die Taktplanung und das Shopfloor Management. Das Bauunternehmen wählte diese Anwendungsfälle gezielt aus, um eine bessere Terminabstimmung und Kommunikation mit allen Projektbeteiligten sicherzustellen. Zu Beginn des Bauprojekts fanden Kick-off-Workshops zu den Lean-Anwendungsfäl-

len statt, teilweise auch mit den Auftraggebern und Baupartnern. Das Last Planner System dient dazu, die nächsten Bauaufgaben realistisch und verbindlich zu planen. Dafür trafen sich Bauleiter, Projektleiter und Polier von Wolff & Müller sowie die ausführenden Gewerke TGA, Trockenbau, Fliesenleger und Maler wöchentlich, um gemeinsam die anstehenden Arbeitsschritte abzustimmen. Gerade bei Schlüsselfertigbau-Projekten mit vielen unterschiedlichen Ausbaugewerken ist das Last Planner System besonders geeignet. Shopfloor-Management-Besprechungen fanden im internen Kreis statt: Bauleiter, Projektleiter, Polier, Abrechner und Assistenz von Wolff & Müller tauschten sich direkt auf der Baustelle über Abläufe, Probleme und Verbesserungsmöglichkeiten aus. Die Taktplanung kam beim Ausbau der Büroflächen und der Wohnungen zum Einsatz. Sie eignet sich besonders für wiederkehrende Aufgaben im Ausbau, reduziert Wartezeiten und sorgt für einen effizienten Bauablauf.

Erfolgsfaktoren für komplexe Bauprojekte

Das Bauprojekt Schöneberger Eck zeigt, dass eine frühzeitige und digitale Planung auch unter anspruchsvollen Bedingungen zum Erfolg führt. Die vorgelagerte Preconstruction-Phase dient als Vorbild für weitere Bauprojekte, weil sie den weiteren Projektverlauf erheblich optimierte und eine partnerschaftliche Zusammenarbeit auf Augenhöhe zwischen den Auftraggebern und dem Bauunternehmen ermöglichte. Mithilfe von BIM wurden die Projektdaten zentral und umfassend dokumentiert, wodurch die Projektbeteiligten jederzeit auf dem aktuellen Stand waren. Lean Construction half, die Gewerke strukturiert zu koordinieren und die Bauabläufe effizient umzusetzen. All das zahlte auf die erfolgreiche Realisierung eines Gebäudeensembles ein, das in Berlin neuen Raum für Wohnen, Arbeiten und Einkaufen schafft. ■

www.wolff-mueller.de

Roberto Renner

Oberbauleiter bei Wolff & Müller Hoch- und Industriebau, Niederlassung Dresden

The screenshot displays the BMSP software interface with multiple data tables. The top section shows project information like 'Projektname' and 'Projekttyp'. Below that, there are tables for 'Anforderungen' and 'Leistungen'. The main part of the screen is occupied by a large table with columns for 'Menge', 'Einheit', 'Preis', and 'Gesamt'. The bottom section shows a summary of costs and a list of 'Benutzereinstellungen'.

Das Team von Mayer Ingenieure hat sich auf den Tief- und Straßenbau und den Erhalt kommunaler Infrastruktur spezialisiert. Foto: Mayer Ingenieure GmbH

Mitdenkende Software

Nicht nur die Funktionen zählen

Mayer Ingenieure aus Böblingen haben sich auf den Tief- und Straßenbau spezialisiert. Beim Umstieg auf eine neue BMSP-Software hat das Ingenieurbüro bewusst auf mehr als nur Funktionen geachtet. Als Praxisanwender bringt es heute wertvolle Impulse in die Weiterentwicklung der Lösung ein. Geschäftsführer Michael Mayer erläutert, welche Vorteile das bietet – und warum bei der Software-Auswahl auch der Hersteller eine entscheidende Rolle spielt.

Straßen, Kanäle und Wasserleitungen sind zentrale Lebensadern, ohne die Städte und Gemeinden nicht funktionieren könnten. Als Ingenieurbüro für den kommunalen Tief- und Straßenbau haben sich Mayer Ingenieure auf die langfristige Werterhaltung dieser Infrastruktur spezialisiert. „Wir sehen es als wichtige Aufgabe, diese wertvollen Anlagen zu erhalten und gemeinsam mit den Kommunen für die Anforderungen der Zukunft vorzubereiten“, erläutert Geschäftsführer Michael Mayer das Selbst-

verständnis des Unternehmens. Diese Haltung ist fest in der Geschichte des 1926 von Gottlob Mayer gegründeten Ingenieurbüros verankert. Mit der Übernahme durch die dritte Generation – Mark und Michael Mayer – richtet sich der Fokus heute auf die Planung und den Erhalt kommunaler Infrastruktur sowie auf die technisch-wirtschaftliche Beratung.

Ein Programm ersetzt mehrere

Für Konstruktion, Ausschreibung, Berechnung oder Simulation setzt das Inge-

nieurenbüro ebenso spezialisierte Software ein wie für das Management von Büro- und Projektablaufen. An zehn PC-Arbeitsplätzen wird inzwischen eine Büro- und Management-Software für Planungsbüros (BMSP) Sta*Ware Business Navigator E&P eingesetzt, die nach ihrer Einführung mehrere zuvor genutzte Programme abgelöst hat. Neben einem Dokumenten-Management-System sowie einer E-Mail- und Terminlösung wurde auch eine bestehende BMSP-Software ersetzt.

„Leider konnte die Software unsere Prozesse nicht in der nötigen Detailtiefe abbilden. Deshalb haben wir uns notge-



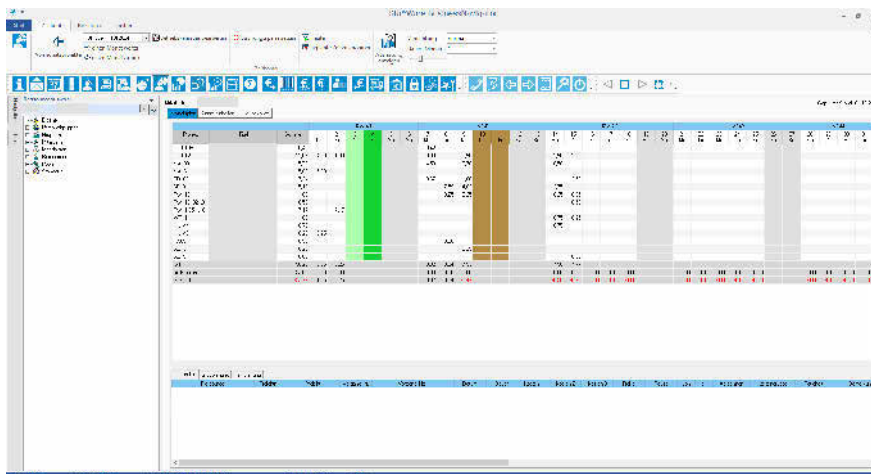
drungen für einen Wechsel entschieden“, kommentiert Mayer den Umstieg. Es folgte ein strukturierter Auswahlprozess, der parallel zum laufenden Geschäftsbetrieb stattfand. „Unsere für die Büro-Organisation zuständige Mitarbeiterin hat zunächst unsere Prozessabläufe dokumentiert. Auf dieser Basis wurde eine Anforderungsliste für die neue BMSP-Software zusammengestellt. Dieses Pflichtenheft haben wir dann als Grundlage für unsere Marktrecherche genutzt“.

Unterstützt durch einen Online-Produktvergleich des IWW Institut wurde eine erste Vorauswahl getroffen. Zwei Lösungen kamen schließlich in die engere Wahl. „Für den Sta*Ware Business Navigator E&P haben wir uns aus mehreren Gründen entschieden: Vor allem ist jetzt alles unter einem Hut – das Büro- und Projektmanagement, das Dokumenten-E-Mail- und Terminmanagement. Außerdem können wir unsere Honorarangebote und Rechnungen durchgehend erstellen und verwalten. Auf Anhieb überzeugt hat uns auch die durchgängige Vorgangssystematik sowie das Erstellen von individuell anpassbaren Prozessen und Aufgaben, inklusive Zeitbuchungen“.

Die Software folgt einem vorgangsorientierten Konzept: Die Projektstruktur wird direkt aus dem Auftrag erzeugt, Aufgaben der einzelnen Leistungsphasen lassen sich automatisiert gemäß HOAI oder nach bürospezifischen Ablaufschemata anlegen. Dadurch werden Leistungen systematisch dokumentiert und verbucht, was eine vollständige und transparente Abrechnung unterstützt.

Support durch den Hersteller

BMSP-Software ist keine Standardware. Auch die eingesetzte Lösung musste an die individuellen Büro- und Projektabläufe angepasst werden – etwa hinsichtlich spezieller Aufgaben, Prozesslogiken, Angebotsvorlagen, Auswertungen oder Ausdrucke. Dabei spielte der Hersteller-Support eine wichtige Rolle. „Bei der Software-Anpassung hat uns der Entwickler tatkräftig unterstützt. So konnten wir schnell, effizient und produktiv mit der Software arbeiten. Auch mit dem Service des Unternehmens sind wir sehr zufrieden. Während der Ge-



Gemanagt werden Büro und Projekte bei Mayer Ingenieure aus Böblingen mit der BMSP-Software Sta*Ware Business Navigator E&P. Foto: Mayer Ingenieure GmbH

schaftszeiten ist stets ein persönlicher Ansprechpartner erreichbar und per Fernzugriff lassen sich Probleme schnell lösen. Kurze Reaktionszeiten sind sehr wichtig, wenn es eilig ist.“

Auch die Übernahme von Bestandsdaten wurde pragmatisch gelöst. „Wir haben uns für einen klaren Schnitt und damit für weniger Aufwand entschieden. Neue Projekte wurden mit dem neuen Programm bearbeitet und nur ausgewählte Dokumente alter Projekte wurden im Explorer-Format exportiert und eingelesen, was relativ reibungslos funktioniert hat.“

Aus Sicht des Herstellers bringt die Zusammenarbeit ebenfalls Mehrwert: Mit seinem spezialisierten Praxis-Know-how ist das Ingenieurbüro heute nicht nur erfahrener Beta-Tester, sondern auch wichtiger Impulsgeber für die Weiterentwicklung der Software. So wurden unter anderem die Prozess-Engine zur individuellen Gestaltung von Workflows sowie das Reporting Center für Echtzeit-Auswertungen weiter ausgebaut. „Da wir immer an einer auf unsere Bedürfnisse zugeschnittenen Weiterentwicklung der Software interessiert sind, uns aber auch freuen, wenn andere Anwender davon profitieren, ist die Zusammenarbeit für alle Beteiligten ein Gewinn.“

So wichtig wie CAD, AVA & Co.

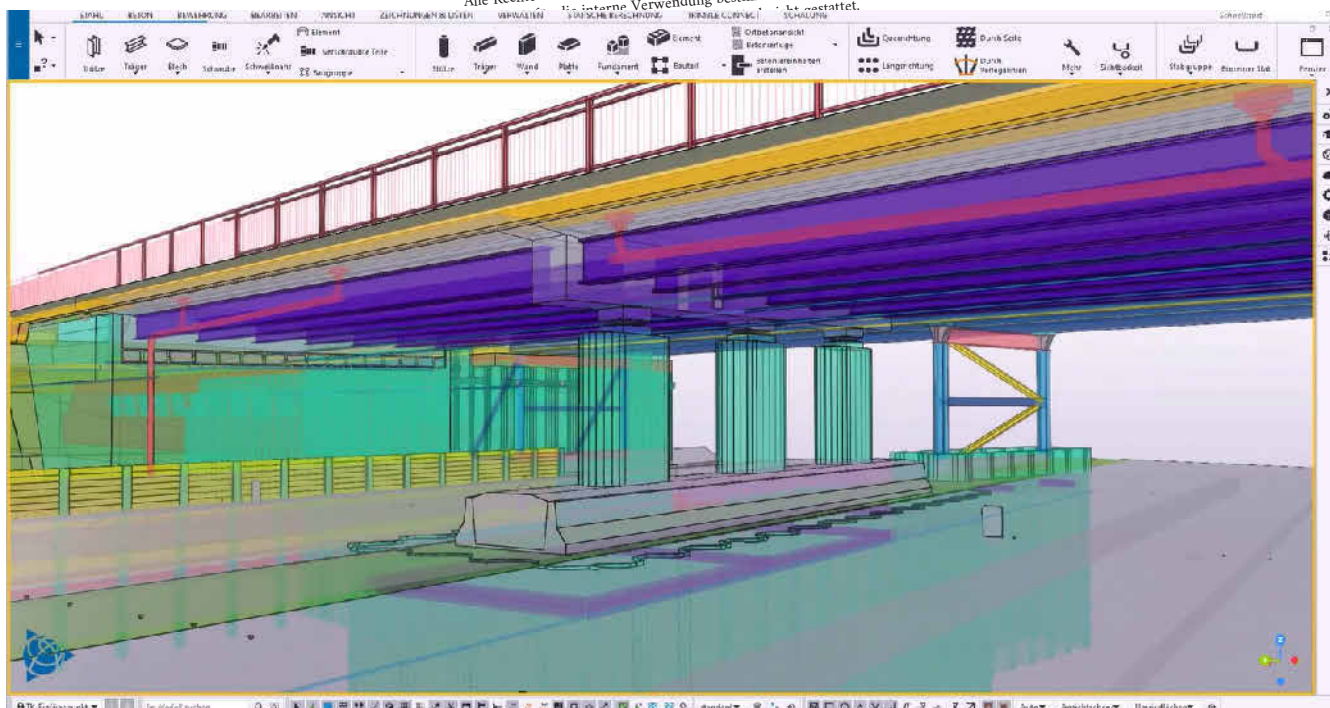
Inzwischen ist die BMSP-Software ein ebenso unverzichtbares Werkzeug im Büroalltag wie CAD- oder AVA-Systeme. Die

Akzeptanz bei den Mitarbeitenden ist hoch – nicht zuletzt, weil sie in den Auswahlprozess eingebunden waren. „Beliebt ist das Programm insbesondere wegen der einfachen Zeiterfassung, der zentralen Verwaltung und automatischen Projektzuordnung von E-Mails oder der Möglichkeit, mobil per App auf wichtige Funktionen zugreifen oder Daten auf der Baustelle erfassen oder abgleichen zu können. Auch ein Homeoffice-Arbeitsplatz ist über eine VPN-Verbindung schnell eingerichtet.“

Besonders hebt Mayer das Honorarmodul hervor: „Für präzise Angebote können wir direkt auf die HOAI-Daten zurückgreifen, die anrechenbaren Kosten schnell ermitteln und das Angebot entsprechend der HOAI-Leistungsbilder, Leistungsphasen, Grundleistungen, besonderen Leistungen, Nebenkosten oder Zuschläge berechnen und anschließend als PDF per E-Mail versenden. Auch die projektübergreifende Echtzeit-Auswertung mit Vorausschau ist eine große Hilfe. So habe ich jederzeit den Überblick über einzelne Vorgänge, den Projektstatus in den einzelnen Leistungsphasen, über den Rechnungsstand, das Budget oder die Liquidität.“

Ein weiterer Pluspunkt ist aus Sicht des Geschäftsführers die Flexibilität der Lösung: „Jedes Büro kann sich seine individuelle Lösung schaffen, die sich stetig weiterentwickelt und Unternehmen dabei unterstützt, Ihre jeweilige Fachkompetenz dem Kunden stets optimal anzubieten.“ ■

www.staware.com



Durch die 3D-Planung lassen sich potenzielle Kollisionen und konstruktive Konflikte frühzeitig erkennen und beheben. Foto: Ingenieurteam Trebes

Moderne Bauplanung

Ein Brückenschlag von 2D zu 3D

Der teilweise Einsturz der Dresdner Carolabrücke hat die Debatte über den Zustand der Brücken in Deutschland neu entfacht. Rund 130 000 Brücken gibt es bundesweit, etwa zwölf Prozent davon gelten als sanierungsbedürftig. Die daraus resultierende steigende Auftragslage rückt den Brückenbau zunehmend in den Fokus von Planungs- und Ingenieurbüros. Das Kieler Ingenieurteam Trebes setzt dabei bereits seit 2017 auf die Planung in 3D. Mit der BIM-Software Tekla Structures und einer konsequenten Weiterentwicklung der BIM-basierten Planung ist das Büro im Brückenbau erfolgreich aufgestellt.

Seit seiner Gründung im Jahr 1971 hat das Ingenieurteam Trebes stets den Anspruch gehabt, an der Spitze der technologischen Innovationen zu stehen. Mit Erfolg: 93 Mitarbeiter an fünf Standorten in Deutschland decken heute ein breites Spektrum an Leistungen ab und unterstützen Kunden bei der gesam-

ten Tragwerksplanung im Hochbau und im konstruktiven Ingenieurbau, einschließlich Ausführungsplanung für Ortbeton, Fertigteilbau und Stahlbau. Die Projekte reichen von Industrie- und Gewerbebauten über größere Wohnungsbauprojekte bis zu Brücken und anderen Ingenieurbauten. 2017 entschied sich Trebes für die Einführung der 3D-BIM-Software Tekla Structures von Trimble und

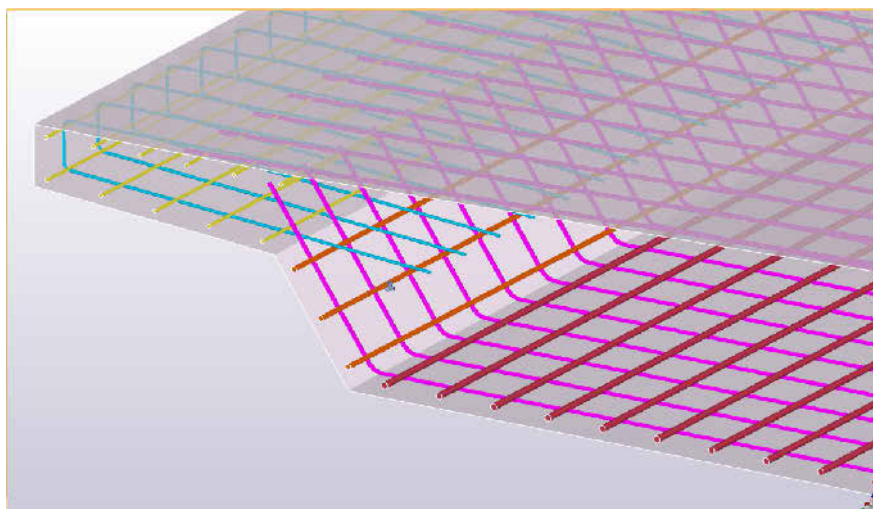
gilt damit in der Baubranche als einer der Vorreiter in Sachen BIM-basierter Planung.

3D-Planung im Brückenbau

Neben kleineren Stahlbrücken sowie Wellstahlbauwerk für Fußgänger und Radfahrer, plant das Team Straßenbrücken im Stahlbeton-Verbund sowie Ersatzneu-



Visualisierung der neuen Brücke im Tekla Visualizer. Foto: Ingenieurteam Trebes



Das BIM-Modell dient als zentrale Informationsquelle über den gesamten Lebenszyklus der Brücke – von Entwurf bis Bauausführung. Foto: Ingenieurteam Trebes

bauten (inklusive Rückbau). Seit einiger Zeit verzeichnet Trebes eine steigende Auftragslage im Brückenbau – anders als zum Beispiel im Hochbau. Die ersten Auftraggeber fordern bereits BIM-fähige Software, aber eine 3D-basierte Planung ist im Brückenbau meist keine Pflicht und 2D ist häufig noch Standard. Trotzdem setzt das Ingenieurbüro bereits auf das Tekla-3D-Modell und sieht viele Vorteile.

Denn eine Planung in 3D ermöglicht es, Brückenstrukturen detaillierter und besser zu visualisieren, was eine präzisere Planung und eine effizientere Umsetzung ermöglicht. Zudem können potenzielle Probleme und Kollisionen früher erkannt und behoben werden, bevor die Ausführung beginnt. Darüber hinaus fördert BIM die Zusammenarbeit und Kommunikation zwischen den verschiedenen Projektbeteiligten und ermöglicht eine bessere Koordination und Kontrolle des Projekts.

Nina Precht, die als Konstrukteurin seit vielen Jahren für die Brückenprojekte bei Trebes verantwortlich ist, sieht die

Vorteile für ihre Arbeit über den gesamten Projektverlauf: „Die Integration von 3D-Modellen in die Brückenprüfung vereinfacht den Prozess und ermöglicht eine kontinuierliche Überwachung der Brücke über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg. Und bereits in der Entwurfsphase werden Probleme ersichtlich, um die man sich sonst erst bei der Ausführung Gedanken gemacht hat. Zudem können wir diese am Modell einfacher visualisieren und erklären, ohne die technischen Zeichnungen lesen zu müssen.“

„Bei einer Planung in 2D habe ich oft mit komplexen, kniffligen Stellen gekämpft. In 3D kann ich sie lösen und präzise im Modell und auf den Plänen darstellen.“ Sie ergänzt: „Wie alle Bereiche der Baubranche steht auch der Brückenbau unter Zeit- und Kostendruck. Die Deadlines sind sehr eng und zusätzlich dazu kann es im Projekt jederzeit zu Änderungen kommen. Diese in 2D umzusetzen, ist eine große Herausforderung, weil ich jeden Strich neu zeichnen muss. In Tekla

Structures werden hingegen bei Änderungen alle Komponenten, Zeichnungen und Reports automatisch angepasst.“

Solide Planung – die jederzeit beweglich ist

Vorteile, die sich bei Trebes schon in vielen Projekten bewährt haben, unter anderem bei dem Projekt Ersatzneubau BW 506, bei dem Nina Precht Tekla Structures und den Bridge Creator für den kompletten Brückenentwurf einsetzte. Der Bridge Creator ist ein Werkzeug, das in Tekla Structures integriert ist. Damit lassen sich komplexe Brückenstrukturen – unabhängig von Material und Größe – in 3D entwerfen und visualisieren. So kann die Straßengeometrie importiert, etwa als LandXML-Datei, sowie der Querschnitt entlang der Straßengeometrie automatisch erstellt werden.

Bei Projekt Ersatzneubau BW 506 ging es um eine 2-feldrige Spannbetonbrücke aus den 1960er-Jahren, die über die A7 führte. Die Brücke war im Laufe der Jahre stark in Mitleidenschaft gezogen worden und zuletzt wegen erheblicher Schäden nur noch eingeschränkt befahrbar. „Angesichts der Spannungsrissschäden der Carolabrücke, bin ich sehr froh, dass diese alte Brücke nun ersetzt wurde“, erklärt Nina Precht.

Der Bridge Creator wurde für den Überbau und die Trassierung eingesetzt. Zunächst modellierte Nina Precht die alte Brücke in Tekla Structures auf Grundlage von alten Bauplänen nach, um die benötigten Betonmengen für den Abbruch zu ermitteln. Anschließend erfolgte die Modellierung des neuen Überbaus aus Stahlbeton-Verbund (Stahlträger, Fertigteilplatten, Ortbeton).

„Die Arbeit mit Tekla Structures ermöglicht es uns, alle Aspekte des Projekts präzise zu planen und zu koordinieren“, erklärt Precht. „Von der Modellierung der alten und neuen Brücke bis hin zur Planung der Behelfsumfahrung konnten wir alle Details genau festlegen und so einen effizienten und erfolgreichen Ersatzneubau sicherstellen.“

Für das Ingenieurteam Trebes steht fest, dass an BIM kein Weg vorbeiführt, um erfolgreich zu sein. „Wir freuen uns darauf, Teil des Wandels zu sein und aktiv dazu beizutragen, den Brückenbau effizienter und sicherer zu gestalten“, sagt Nina Precht. ■

www.tekla.com/de

Thermische Grundwassernutzung beim Campus Wirtschaftsuniversität Wien – Modellierung und Erfahrungen nach zehn Betriebsjahren

R. Markiewicz, D. Adam

ZUSAMMENFASSUNG Zur Gewinnung von geothermischer Energie können offene Systeme wie die direkte thermische Grundwassernutzung eingesetzt werden. Das Grundwasser wird über Entnahmeburgen gefördert und – in Abhängigkeit von der jeweiligen Heiz- oder Kühlanwendung – erwärmt oder abgekühlt und anschließend über Schluckbrunnen beziehungsweise eine Versickerungsanlage wieder in den Grundwasserleiter zurückgeführt. Der 2013 fertiggestellte neue Campus der Wirtschaftsuniversität Wien (WU Wien) verfügt über ein System zur direkten Nutzung des Grundwassers für Heizung und Kühlung mit einer Pumpkapazität von bis zu 150 l/s. Das Wasser wird über einen Horizontalfilterbrunnen, bestehend aus zehn horizontalen Filtersträngen, entnommen; die Rückführung erfolgt über Versickerungsgräben und drei Schluckbrunnen, die das Grundwasser bis zu einer Entfernung von 700 m thermisch beeinflussen. Es handelt sich dabei um eines der größten in Wien realisierten Projekte und die dafür durchgeführten thermischen und hydraulischen Berechnungen werden im gegenständlichen Beitrag veranschaulicht. Zudem werden – nach einer 10-jährigen Betriebsphase – die Planungsannahmen mit den tatsächlichen Energiedaten verglichen.

Thermal groundwater utilization at the campus of the Vienna University of Economics and Business – modelling and experience after ten years of operation

ABSTRACT Open systems such as direct thermal groundwater utilization can be used to generate geothermal energy. The groundwater is extracted via extraction wells, heated in a chiller or cooled in a heat pump, and then returned to the aquifer via recharge wells or seepage trenches. The new campus of the Vienna University of Economics and Business, which was completed in 2013, has a system for the direct use of groundwater for heating and cooling with a pumping capacity of up to 150 l/s. Water is extracted via a horizontal filter well consisting of ten horizontal filter strings; the water is returned via seepage trenches and three recharge wells, which influence the groundwater up to a distance of 700 m. This is one of the largest projects realized in Vienna, and the thermal and hydraulic calculations carried out for it are shown in this paper. In addition, after a 10-year operating phase, the planning assumptions are compared with the actual energy data.

STICHWÖRTER

Thermische Grundwassernutzung, Geothermie, Green Building, Horizontalfilterbrunnen

1 Einleitung

Grundwasser hat das ganze Jahr über eine relativ konstante Temperatur. Es eignet sich daher sehr gut für eine thermische Nutzung. Dazu sind im Wesentlichen Grundwasser-Entnahmestellen (z. B. Brunnen) und Grundwasser-Rückgabestellen (z. B. Versickerungsanlagen, Schluckbrunnen) erforderlich. Im Heizbetrieb wird bei der Entnahmestelle Grundwasser entnommen und diesem die Wärme entzogen. Das abgekühlte Wasser wird anschließend an der Rückgabestelle wieder dem Grundwasser zugeführt (Bild 1). Im Kühlbetrieb wird dem entnommenen Grundwasser Wärme zugeführt und das erwärmte Wasser an der Rückgabestelle wieder versickert.

Der neue Campus der Wirtschaftsuniversität Wien (WU Campus) wurde mit einer Anlage zur direkten Nutzung des Grundwassers zum Heizen und Kühlen sämtlicher Gebäude ausgestattet. Dieses „Green Building“-Projekt (Gebäude, das im Sin-

ne der Nachhaltigkeit konzipiert wurde) stellt die größte derartige Nutzung im innerstädtischen Raum innerhalb von Österreich dar. [2]

2 Thermische Grundwassernutzung beim Campus WU Wien

2.1 Projektdaten

Beim neuen WU Campus handelt es sich um ein circa 90 000 m² großes Grundstück mit sechs Gebäudekomplexen (Bild 4) auf einer verbauten Fläche von circa 35 000 m² und einer Nettonutzfläche von etwa 100 000 m². Mit dem Bau wurde im Jahr 2009 begonnen und seit dem Wintersemester 2013 bietet der WU Campus Platz für 25 000 Studierende sowie 3 000 Arbeitsplätze. Bauherr war die Projektgesellschaft Wirtschaftsuniversität Wien Neu GmbH (Bundesimmobiliengesellschaft + Wirtschaftsuniversität).

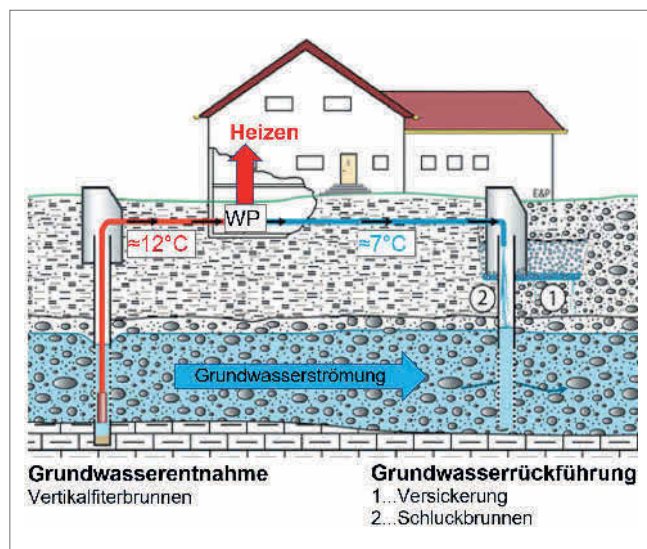


Bild 1. Prinzipschema der direkten thermischen Grundwassernutzung im Heizfall Grafik: Markiewicz, auf Basis von [1]
Fig. 1. Schematic sketch of direct thermal groundwater utilization for heating purposes Source: Markiewicz, based on [1]

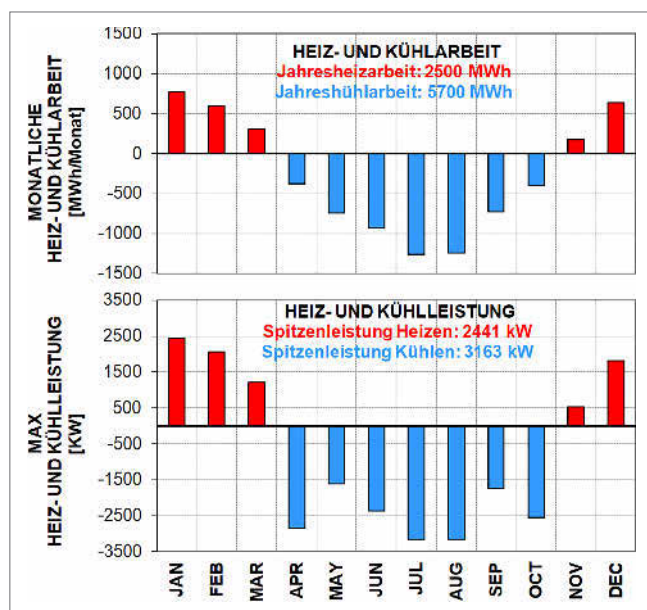


Bild 2. Geplante Heiz- und Kühlarbeit (oben) sowie Heiz- und Kühlleistung (unten), die aus der thermischen Grundwassernutzung bereitgestellt werden soll Grafik: Markiewicz
Fig. 2. Planned heating and cooling work as well as heating and cooling load to be provided by thermal groundwater utilization Source: Markiewicz

2.2 Ökologisches, gesamtheitliches Energiekonzept

Der WU Campus wurde als Green Building konzipiert und erichtet und mit dem ÖGNI-Zertifikat ausgezeichnet. Rund zwei Drittel des für Heizung und Kühlung benötigten Energiebedarfs werden über thermische Grundwassernutzung erzeugt. Drei Heiz- und Kältemaschinen dienen im Winter zur Beheizung über das Grundwasser und im Sommer zur Spitzenlastabdeckung des Kühlenergiebedarfs. Dadurch, dass die Gebäude primär über Bauteilaktivierung gekühlt und beheizt werden, kann das Grundwasser im Sommer direkt zur Kühlung verwendet werden. [3]

Die Gebäude werden primär durch thermische Nutzung des Grundwassers mit einer Kälte-/Wärmeleistung von rund 2,5 bis 3 MW versorgt. Für die Kühlung wird das Grundwasser direkt – nur durch einen Trennwärmetauscher vom hydraulischen System getrennt – verwendet, da sowohl die Bauteilaktivierung als auch die Kühldecken mit einem entsprechend hohen Temperaturniveau (ca. 14°C) betrieben werden können. Zur Kühlung über die Bauteilaktivierung beziehungsweise die Kühldecken ist somit nur der Strom zum Betreiben der Pumpen erforderlich, und die Kälte wird aus diesem Grund extrem effizient bereitgestellt. Auch im Heizfall bietet die Bauteilaktivierung Vorteile, da die niedrigen Vorlauftemperaturen von etwa 30°C durch die Wärmepumpen mit einem hohen Wirkungsgrad erzeugt werden können. [3]

Zur Spitzenlastabdeckung dienen Kompressionskältemaschinen mit Rückkühler, die im Heizungsfall als Wärmepumpen eingesetzt werden und somit doppelt genutzt werden. Als Energiequelle für die Wärmepumpen dient neben dem Grundwasser auch die Abwärme der Rechenzentren. Um nicht im ganzen Gelände mit „sehr kaltem“ Kaltwasser arbeiten zu müssen, kommen bei den Lüftungsanlagen gebäudeweise dezentrale Kompressionskältemaschinen zur Entfeuchtung zum Einsatz. Damit wird die Gefahr von Kondenswasserbildung bei der Bauteilaktivierung gebannt. Durch die dezentrale Raumluftentfeuchtung erspart man sich im ganzen Gelände die Kaltwasserschleife auf 6°C zu fahren, wie es sonst meist üblich ist. Diese Methode hat besonders in einem großen Gelände wie dem WU Campus Vorteile, da die Verluste bei „sehr kaltem“ Wasser entsprechend höher sind. [3]

2.3 Heiz-/Kühlenergie und Pumprate zur thermischen Grundwassernutzung

Aufbauend auf dem abgeschätzten Gesamtenergiebedarf für den Campus WU wurde vom Planer zunächst jener Leistungs- und Energieanteil ermittelt, der über die Grundwassernutzung gedeckt werden sollte. Der COP der Wärmepumpen/Kältemaschinen ist in den Daten im **Bild 2** bereits berücksichtigt.

Anhand des (stündlichen) Energiebedarfs wurde die dafür erforderliche (stündliche) Grundwasser-Pumprate berechnet. Dabei wurde eine mittlere Grundwasser-Entnahmetemperatur von 12°C (auf Basis von Grundwasser-Temperaturmessungen) und eine Grundwasser-Rückgabetemperatur von 7°C (Heizfall) beziehungsweise 17°C (Kühlfall) angesetzt, womit eine planmäßige Temperaturänderung von $\Delta T = 5\text{ K}$ vorlag. Exemplarisch ergibt sich zur Abdeckung der Spitzenkühlleistung von $\dot{Q} = 3163\text{ kW}$ eine erforderliche Pumprate von $\dot{V} = 150\text{ l/s}$ (mit c : spez. Wärmespeicherkapazität Grundwasser; $\dot{m}$: Massenstrom; ρ : Dichte Grundwasser):

$$\dot{Q} = c \cdot \dot{m} \cdot \Delta T = c \cdot \rho \cdot \dot{V} \cdot \Delta T \quad (1)$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{Q}}{c \cdot \rho \cdot \Delta T} \quad (2)$$

$$\dot{V} = \frac{3163 \cdot 1000}{4200 \cdot 1000 \cdot 5} = 0,15\text{ m}^3/\text{s} = 150\text{ l/s} \quad (3)$$

Bild 3 veranschaulicht die erforderliche Pumprate für die thermische Grundwassernutzung im Jahresverlauf.

Die maximale Entnahmemenge beträgt 150 l/s und wird in den Sommermonaten durchgehend 11 Stunden lang (Spitzenlast-

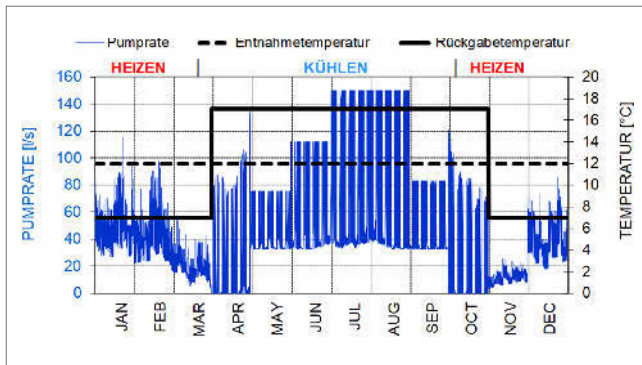


Bild 3. Geplante Pumprate, Grundwasser-Entnahmetemperatur und -rückgabetemperatur im Jahresverlauf Grafik: Markiewicz
 Fig. 3. Planned pumping rate, groundwater extraction and return temperatures over the course of one year Source: Markiewicz

abdeckung) benötigt. Anschließend wird die Pumpmenge reduziert (Grundlastabdeckung), sodass das maximale Tagesmittel der Pumprate 104 l/s beträgt. Die mittlere Pumpmenge pro Monat variiert zwischen 11 und 80 l/s und die mittlere Jahrespumpmenge beträgt 44 l/s.

2.4 Thermische Grundwassernutzungsanlage

Zur Grundwasserentnahme wurde ein Horizontalfilterbrunnen geplant und letztlich auch ausgeführt (siehe dazu auch Abschnitt 4.1). Über diesen Brunnen wird das Grundwasser entnommen und im Technikraum entweder abgekühlt (zu Heizzwecken) oder erwärmt (zu Kühlzwecken). Anschließend wird das Grundwasser abstromseitig an der gegenüberliegenden Grundstücksgrenze über oberflächennahe Sickerleitungen und drei Schluckbrunnen wieder dem Aquifer zugeführt.

2.5 Untergrund- und Grundwasserverhältnisse

Die Untergrundschichtung wurde am Areal mit insgesamt 18 Bohrungen aufgeschlossen und stellt sich wie folgt dar:

- Deckschicht aus heterogenen Anschüttungen: Schichtmächtigkeit circa 1,0 bis 3,8 m

- Ausande und Aulehme: Schichtmächtigkeit circa 0,0 bis 4,9 m
- Donau-Kiese (quartäre Kiese): Schichtmächtigkeit circa 2,2 bis 10,4 m (i. M. ca. 7,5 m)
- Bereichsweise tertiäre Feinsande: Schichtmächtigkeit circa 0,4 bis 1,35 m
- Wiener Tegel (tertiäre Schluffe und Feinsande): Grundwasserstauer in einer Tiefe von ca. 5,4 bis 10,9 m.

Das freie Grundwasser befindet sich innerhalb der Donau-Kiese; auf Basis einer nahegelegenen langjährigen Grundwassermessstelle ergab sich, dass der mittlere Grundwasserspiegel in einer Tiefe von 4,26 m unter GOK liegt. Die für die thermische Grundwassernutzung relevante Grundwassermächtigkeit betrug damit rund $H = 7$ m. **Bild 5** veranschaulicht den Schichtaufbau für die spätere Modellbildung.

In **Bild 5** ist zusätzlich das Gebäude beziehungsweise das Kellergergeschoß modellhaft dargestellt. Die Tiefe der jeweiligen Kellergergeschoße der sechs Gebäudekomplexe variiert etwas; die mittlere Bauwerksunterkante ist in einer Tiefe von 7 m. Die Grundwassermächtigkeit reduziert sich deshalb unterhalb der Gebäude auf $H_{BWK} = 4,26$ m.

2.6 Besondere Projekttrandbedingungen

2.6.1 Schmalwandumschließung

Für die Abdichtung der Baugruben (Gebäudeobjekt W1E sowie Gebäudeobjekte W1-D, W2, LLC, O1 und O2) wurden Schmalwände errichtet, die in den Grundwasserstauer einbinden. Um nach Herstellung der Gebäudeobjekte die Grundwasserkommunikation wieder zu ermöglichen, wurden rund 10 % der Schmalwand wieder geöffnet. Diese Öffnungen wurden mittels des Düsenstrahlverfahrens (Simplex-Verfahren mit Hochdruckwasserstrahl) hergestellt.

2.6.2 Künstliche Grundwasserbewirtschaftung im Projektgebiet

Der WU Campus befindet sich zwischen Donau und Donaukanal, das ist der 2. und 20. Wiener Gemeindebezirk. Innerhalb dieses Gebietes wird das Grundwasser künstlich mit Donauwasser dotiert bzw. bewirtschaftet. Hintergrund dazu ist, dass durch

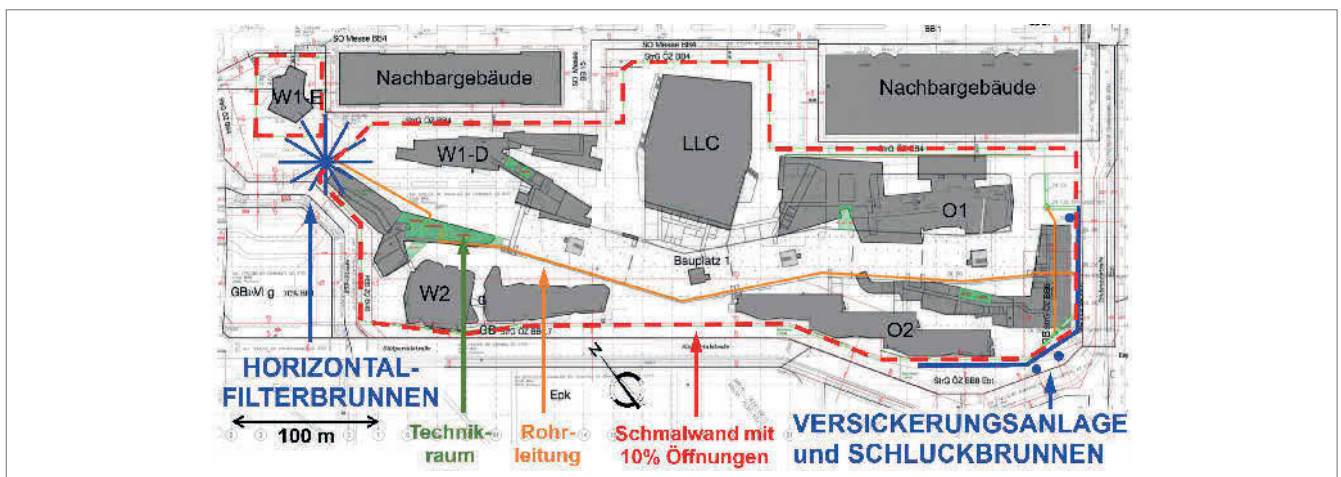


Bild 4. Grundwasserentnahme (Horizontalfilterbrunnen) und Grundwasser-Rückgabe (Versickerungsanlage und Schluckbrunnen) am WU Campus Grafik: Markiewicz, auf Basis von [4]

Fig. 4. Groundwater extraction (horizontal filter well) and groundwater recharge system (seepage trenches and three recharge wells) at the WU campus Source: Markiewicz, based on [4]

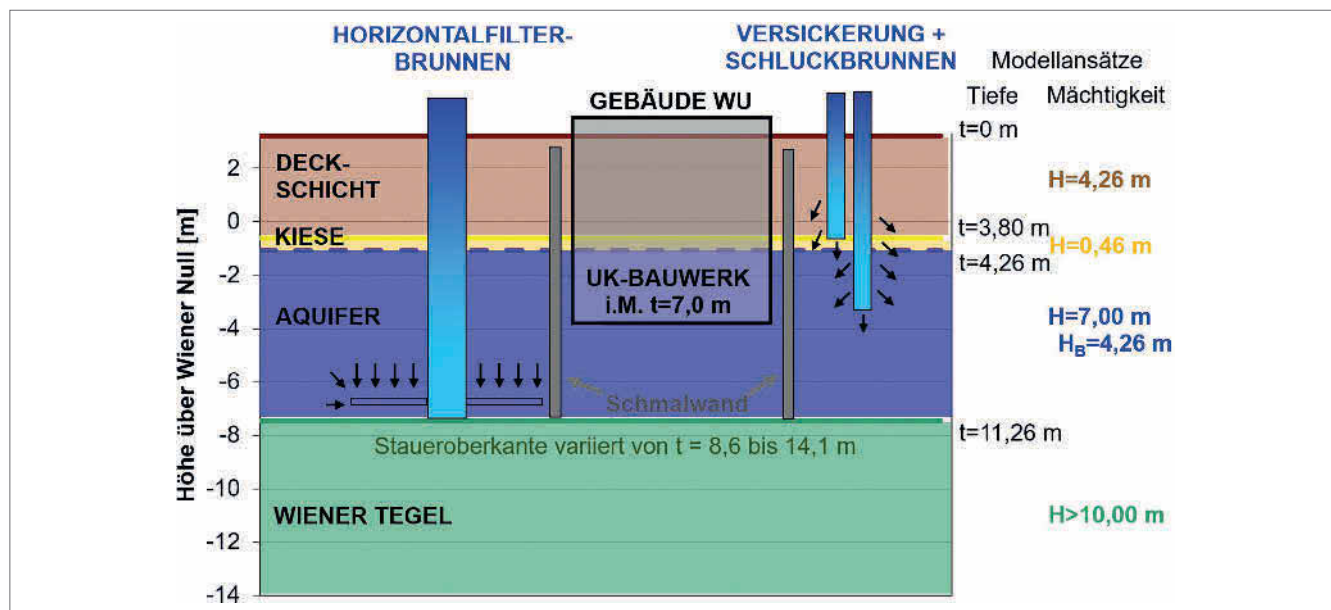


Bild 5. Untergrundprofil für die Modellierung *Grafik: Markiewicz*
Fig. 5. Subsurface profile for modeling *Source: Markiewicz*

die Errichtung des Kraftwerkes Freudenaus (Fertigstellung im Jahr 1998) die Donau auf ein Niveau aufgestaut wird, das über dem Geländeniveau des 2. und 20. Wiener Gemeindebezirks liegt. Es wurden deshalb Dämme mit Dichtwänden errichtet. Um in weiterer Folge die Grundwasserverhältnisse im 2. und 20. Bezirk so zu regulieren, dass es zu keiner nennenswerten quantitativen Veränderung der Grundwasserverhältnisse und zu keiner Verschlechterung der Grundwasserqualität infolge der Stauhaltung kommt, wird ein künstliches Grundwasserbewirtschaftungssystem betrieben. Dazu wird das Grundwasser künstlich mit Donauwasser do-

tiert, indem die entlang des rechten Donauufers hergestellten Dichtwände überpumpt werden (**Bild 6**).

Diese Dotation des Grundwassers erfolgt mithilfe von 21 Brunnenpaaren (jeweils ein Entnahmebrunnen donauseitig und ein Schluckbrunnen landseitig der Dichtwand), die im Abstand von 100 bis 600 m über eine Länge von 13 km angeordnet sind und über rund 160 Pegelmessstellen gesteuert werden.

3 Hydraulische und thermische Modellierung & Simulation

3.1 Modellierungskonzept

Zur Berechnung der hydraulischen und thermischen Auswirkungen der thermischen Grundwassernutzung wurden grundsätzlich zwei Simulationsmodelle mit der FE-Software Comsol Multiphysics erstellt:

- 2D-Modell „Hydraulische Simulation“: Der Schwerpunkt dieses Modells lag in der Berechnung der hydraulischen Höhen (Grundwasserspiegelhöhen) aufgrund der Entnahme bzw. Versickerung und den damit verbundenen Strömungsverhältnissen. Durch eine Modellentwicklung der Stanford University [7, 8] ist es möglich, mit einem zweidimensionalen Berechnungsmodell (Grundrissmodell) dreidimensionale Verhältnisse (Verteilung der hydraulischen Höhen im Grundriss) zu simulieren. Dabei wird anstelle der Durchlässigkeit k_f [m/s] mit der so genannten Transmissivität T [m²/s] gerechnet. Diese stellt das Integral des k_f -Wertes über die wassergefüllte Mächtigkeit H [m] des Grundwasserleiters dar. Bei der Simulation bildet die wassergefüllte Mächtigkeit die in jedem Punkt variierende hydraulische Höhe ab, womit die Transmissivität ebenfalls eine Modellvariable darstellt nach der die Gleichungsmatrix gelöst wird. Damit lassen sich letztendlich die hydraulische Höhe für jeden Punkt im Modell und damit auch Absenk- bzw. Aufspiegelungstrichter im Bereich der Entnahme und Versickerung berechnen.
- 3D-Modell „Thermische Simulation“: Zur Untersuchung des thermischen Einflussbereiches der geplanten Grundwassernut-

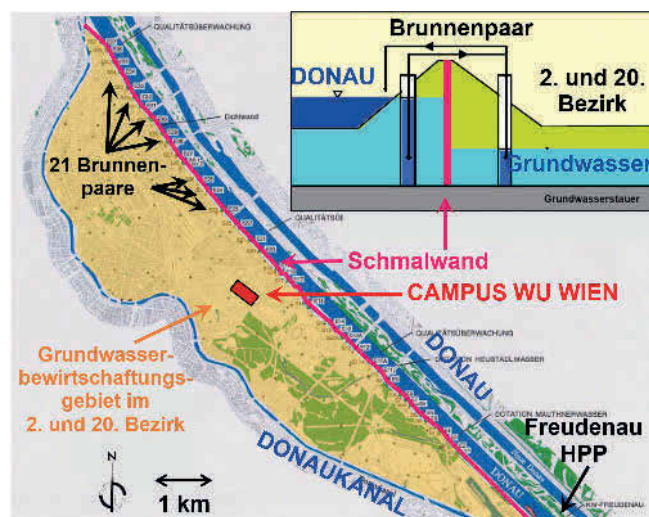


Bild 6. Lage der 21 Brunnenpaare entlang der Schmalwand am rechten Donauufer für die Grundwasserbewirtschaftung. Zusätzlich ist die Lage des WU Campus eingetragen. Rechts oben: Schnittdarstellung der aufgestauten Donau und dem Brunnenpaar zur Überbrückung der Schmalwand und zur Dotierung des Grundwassers *Grafik: Markiewicz, auf Basis von [5, 6]*

Fig. 6. Location of the 21 pairs of wells along the impermeable wall (thin diaphragm wall) on the right bank of the Danube for groundwater management. The location of the WU campus is also shown. Top right: Cross-section of the dammed Danube and the pair of wells for bridging the impermeable wall and supplying groundwater
Source: Markiewicz, based on [5, 6]

Tabelle 1. Thermische Bodenparameter für die Modellberechnungen
 Table 1. Thermal soil parameters for the model calculations

Schicht	Anteil [%]	Spez. Wärmekapazität [J/(kg · K)]	Dichte [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m · K)]
Deckschicht	100	1 136	1 760	1,8
Kiese – Feststoff	81	987	2 000	2,1
Kiese – Wasser	19	4 217	1 000	0,6
Wiener Tegel	100	1 100	2 000	1,8
Beton	100	1 000	2 400	1,8

zung wurde ein dreidimensionales FE-Modell entwickelt, bei dem die Wärmeausbreitung unter Berücksichtigung der hydraulischen Randbedingungen über einen Zeitraum von 20 Jahren berechnet wird. Da der Schwerpunkt dieses dreidimensionalen Modells in der Berechnung der thermischen Reichweite lag, wurde im Modellgebiet eine konstante Grundwassermächtigkeit angesetzt und davon ausgegangen, dass dieses Schichtpaket (Donau-Kiese) zu jedem Zeitpunkt vollständig wassergesättigt ist. Aus diesem Grund wurde dem Modell die LaPlace Gleichung (mit dem Gesetz von Darcy) zugrunde gelegt.

3.2 Hydraulische und thermische Bodenparameter

Für die hydraulischen Simulationsberechnungen wurden die folgenden Bodenkennwerte auf Basis der vorhandenen Untergrunddaten sowie auf Basis von Erfahrungswerten abgeleitet:

- Deckschicht sowie Ausande und Aulehme: Durchlässigkeit $k_f = 1 \cdot 10^{-9}$ m/s; Porenanteil $n = 0,44$; Bodendichte $\rho_B = 1\,760$ kg/m³
- Donau-Kiese: $k_f = 2,5 \cdot 10^{-3}$ m/s; $n = 0,25$; $\rho_B = 2\,000$ kg/m³
- Wiener Tegel: $k_f = 1 \cdot 10^{-10}$ m/s; $n = 0,43$; $\rho_B = 2\,000$ kg/m³

Zur Berücksichtigung der natürlichen Grundwasserströmung ist es erforderlich die Filtergeschwindigkeit v_f zu berechnen. Mit einem Grundwasser-Spiegelgefälle von $i = 40$ cm pro 1 km (entspricht 0,4 ‰) ergibt sich:

$$v_f = k_f \cdot i = 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0004 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s} \quad (4)$$

Die Grundwasser-Strömungsrichtung wurde von der Donau in Richtung Donaukanal (Strömungsrichtung bei mittleren Grundwasserständen) angesetzt.

Die thermischen Bodenparameter wurden teilweise aus [9] und teilweise aus Erfahrungswerten abgeleitet. Zu beachten ist, dass in der Literatur primär Angaben zu Böden im Gesamten zu finden sind, für die gegenständlichen Berechnungen allerdings die Bodengesamtmatrix in einen Feststoffanteil und einen Wasseranteil aufgespalten werden musste. Dies war erforderlich, da innerhalb des Kieshorizontes die Wasserbewegung (Grundwasserströmung) zu berücksichtigen war und für die Berechnung der einzelnen Wärmetransportvorgänge zwischen dem Feststoffanteil und dem Wasseranteil unterschieden werden musste. Den Zusammenhang zwischen Gesamtmatrix und den Feststoff- beziehungsweise Wasseranteil (mit Index F bzw. w in den Gleichungen) geben die nachfolgenden Gleichungen für die spezifische Wärmekapazität c [J/(kg · K)] und Wärmeleitung λ [W/(m · K)] in Abhängigkeit vom jeweiligen Anteil n [-] wieder:

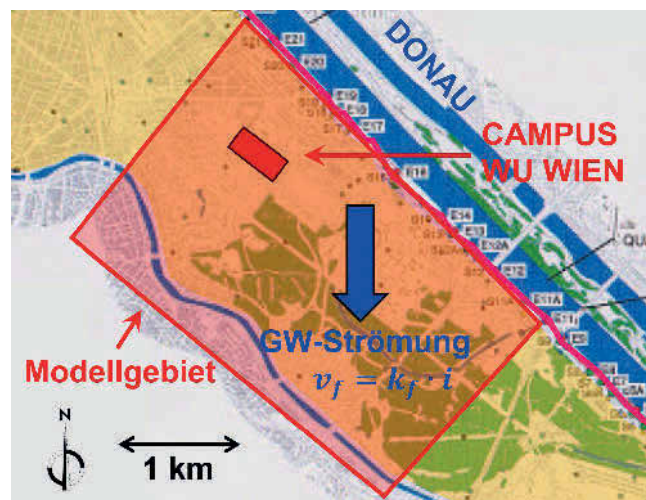


Bild 7. Modellgebiet für die Simulationen (vgl. Bild 6) mit Lage des WU Campus und der angesetzten Grundwasser-Strömungsrichtung (entspricht der Grundwasserströmungsrichtung bei mittleren Grundwasserständen)
 Grafik: Markiewicz; Hintergrund aus [5, 6]

Fig. 7. Model area for the simulations (see Fig. 6) with the location of the WU campus and the assumed groundwater flow direction (corresponds to the direction of groundwater flow at average groundwater levels)

Source: Markiewicz; background from [5, 6]

$$c_{\text{Matrix}} = \frac{n_w \cdot \rho_w \cdot c_w + n_f \cdot \rho_f \cdot c_f}{n_w + n_f} \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}} \right] \quad (5)$$

$$\lambda_{\text{Matrix}} = \frac{n_w \cdot \lambda_w + n_f \cdot \lambda_f}{n_w + n_f} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right] \quad (6)$$

Tabelle 1 gibt die angesetzten Werte wieder.

3.3 2D-Modell „Hydraulische Simulation“

Aufbauend auf den in Abschnitt 3.1 beschriebenen theoretischen Modellansätzen wurde eine hydraulische Simulation des Horizontalfilterbrunnens und der zugehörigen Versickerungsanlage inklusive der Schluckbrunnen durchgeführt (vgl. Bild 7, Bild 8).

In einer ersten Modellierungsphase (Projekt-Einreichphase) wurden vereinfachte Modellansätze gewählt, indem unter anderem eine gemittelte Gebäudeunterkante und eine konstante Durchlässigkeit im gesamten Modellgebiet angenommen wurden. In einer zweiten Modellierungsphase wurden die einzelnen Gebäudeunterkanten (variiert von $t = -4,3$ m bis $-7,0$ m) jeweils exakt modelliert und auch berücksichtigt, dass infolge der ausgeführten Gründungsmaßnahmen die Durchlässigkeit unterhalb des Gebäudes verändert wurde: bei Gebäudeteilen ohne Gründungs-

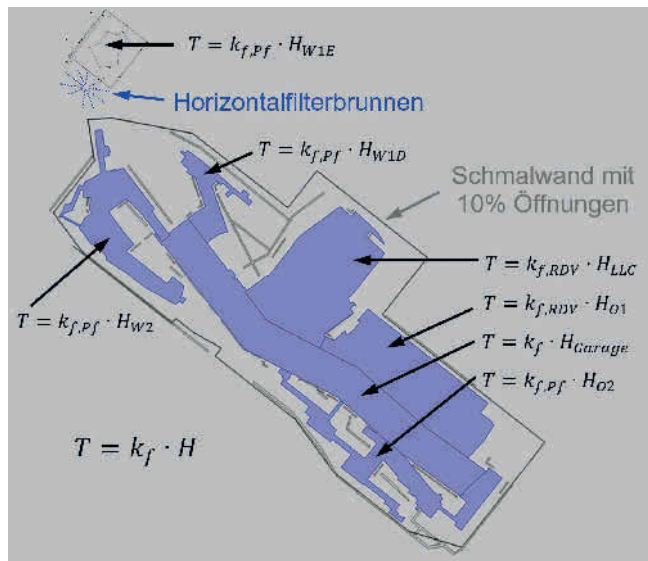


Bild 8. Ausschnitt aus dem Modellgebiet mit der Modellierung des WU Campus. Die Kellergeschoße sind blau markiert; zusätzlich sind die im Modell angesetzten Transmissivitäten zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Gründungsmaßnahmen und der Bauwerksunterkanten angegeben. Grafik: Markiewicz

Fig. 8. Cutout of the model with WU campus. The basement of the buildings are marked in blue; in addition, the transmissivities T used in the hydraulic model to take into account the different foundation measures and individual water-filled thickness H_b beneath each building are indicated. Source: Markiewicz

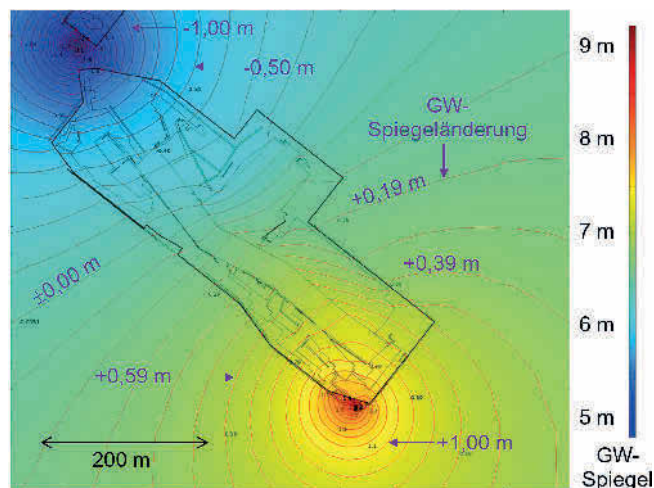


Bild 9. Ergebnis der hydraulischen Simulationsberechnung: Grundwasserspiegelhöhe (im Ausgangszustand $H=7$ m) und Grundwasserspiegeländerung infolge der Entnahme und Rückführung von Grundwasser zur thermischen Grundwassernutzung bei einer Pumprate von 80 l/s (stationäre Lösung). Grafik: Markiewicz

Fig. 9. Result of the hydraulic simulation: groundwater level (initial state $H=7$ m) and change in groundwater level as a result of the extraction and return of groundwater due to thermal groundwater use with a pumping rate of 80 l/s (stationary solution). Source: Markiewicz

maßnahmen wurde ein Durchlässigkeitswert von $k_f = 5 \cdot 10^{-3}$ m/s, bei Gebäudeteilen mit Rütteldruckverdichtung $k_f = 5 \cdot 10^{-4}$ m/s und bei einer Pfahlfundierung $k_f = 2,5 \cdot 10^{-3}$ m/s angesetzt. Außerdem wurde auch die Baugrubenumschließung (Schmalwand) inklusive der nachträglich hergestellten Öffnungen zur Grundwasserkommunikation exakt modelliert. Zur Berücksichtigung kumu-

lativer Effekte wurden zudem auch die Versickerungsanlagen für die Dachflächenentwässerung (Regenereignisse) modelliert und berücksichtigt.

Die wesentlichen Aspekte des hydraulischen Modells lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Stationäre Berechnungen mit der mittleren Jahrespumpmenge (44 l/s) und der maximalen mittleren Monatspumpmenge (80 l/s)
- Unterschiedliche Grundwassereigenschaften (Grundwassermächtigkeit und Durchlässigkeit) je nach Gebäudetiefe und Gründungsmaßnahme
- Die künstliche Grundwasserbewirtschaftung (vgl. Abschnitt 2.6.2) wurde indirekt über die natürliche Filtergeschwindigkeit berücksichtigt (Strömungsrichtung, Durchlässigkeit, Gefälle)
- Horizontalfilterbrunnen, Versickerungsstränge und Schluckbrunnen exakt modelliert
- Geometrie des Bauwerks inklusive der Schmalwand und deren Öffnungen berücksichtigt
- Kumulative Effekte berücksichtigt (Regenereignisse, benachbarte Wasserrechte)

Bild 9 zeigt exemplarisch das Berechnungsergebnis bei einer Pumprate von 80 l/s ohne kumulative Effekte.

3.4 3D-Modell „Thermische Simulation“

Für die Berechnung der Temperaturanomalien (Temperaturfahnen), die durch die Einleitung von erwärmtem oder abgekühltem Grundwasser entstehen, existieren keine geschlossenen analytischen Rechenverfahren, die alle thermischen und hydraulischen Prozesse beschreiben. Zur Abschätzung der Ausbreitung der Thermalfront (Temperaturfahne mit einer Temperaturdifferenz zum unbeeinflussten Grundwasser von > 1 K) kann bei kleineren Anlagen aber beispielsweise mit dem Verfahren nach Ingerle [10] gearbeitet werden.

Bei größeren Anlagen mit mehreren Brunnen, großen Entnahmemengen oder komplexeren Untergrundverhältnissen muss jedoch auf eine dreidimensionale Modellierung mit speziellen numerischen Simulationsprogrammen (z.B. Comsol Multiphysics) zurückgegriffen werden, die eine gekoppelte Berechnung von thermischen und hydraulischen Aufgabestellungen erlauben.

Um die thermische Reichweite (Thermalfront) im Bereich der Versickerung zu berechnen, ist im Regelfall eine dreidimensionale gekoppelte hydraulisch-thermische Simulation durchzuführen, damit die im Untergrund auftretenden Wärmetransportmechanismen und Randbedingungen berücksichtigt werden können. Die wichtigsten Wärmetransportvorgänge im Untergrund sind:

- Wärmeleitung (Konduktion)
- Wärmeströmung (Konvektion)
- Dispersion
- Wärmespeicherung

Die wesentlichen Aspekte des thermischen Modells lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Transiente Berechnung für einen Zeitraum von 20 Jahren
- Zeitschrittintervall: 1 Monat
- Berechnung mit den mittleren Monats-Pumpraten (max: 80 l/s, min: 11,7 l/s)
- Konstante Grundwassereigenschaften für das gesamte Modellgebiet (Grundwassermächtigkeit, Strömungsrichtung, Durchlässigkeit, Porenanteil, Gefälle)

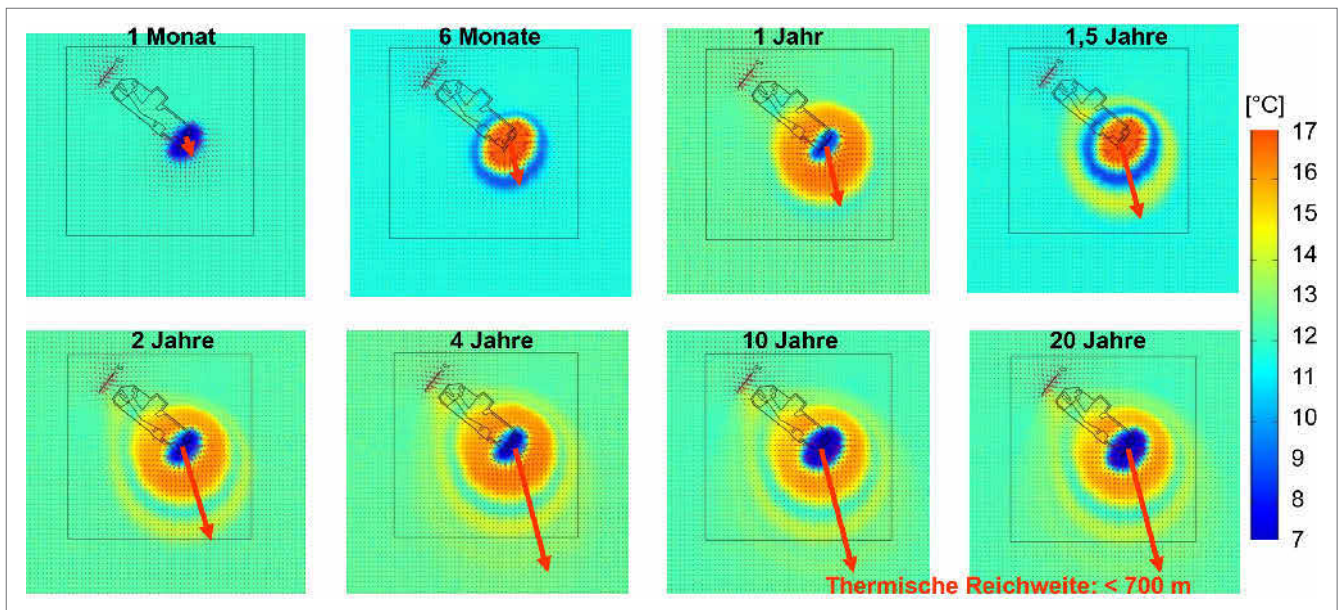


Bild 10. Ermittlung der Reichweite der Temperaturfront bei der direkten Grundwassernutzung (Grundrissdarstellung). An der Versickerungsstelle wird während der Heizperiode 7°C kaltes Wasser und während der Kühlperiode 17°C warmes Wasser dem Aquifer rückgeführt. Die ungestörte Grundwassertemperatur beträgt 12°C. Der rote Pfeil markiert die thermische Reichweite zu den angegebenen Betriebsmonaten bzw. -jahren. Ab dem 4. Betriebsjahr beträgt diese ca. 700 m. Grafik: Markiewicz

Fig. 10. Determination of the range of thermal influence due the thermal groundwater use (plan view). During the heating period, water with a temperature of 7°C is returned to the aquifer at the recharge point, and during the cooling period, water with a temperature of 17°C is returned. The undisturbed groundwater temperature is 12°C. The red arrow indicates the thermal range corresponding to the specified months or years of operation. Starting in the fourth year of operation, this range is approximately 700 m. Source: Markiewicz

- Die künstliche Grundwasserbewirtschaftung (vgl. Abschnitt 2.6.2) wurde indirekt über die natürliche Filtergeschwindigkeit berücksichtigt
- flächige Entnahme bzw. Rückführung des Grundwassers
- Geometrie des Bauwerks inklusive der Schmalwand und deren Öffnungen berücksichtigt

Bild 10 zeigt als Ergebnis der gekoppelten hydraulisch-thermischen Simulationsberechnung die zu erwartende Temperaturfahne infolge der thermischen Grundwassernutzung. Die thermische Reichweite beträgt circa 700 m von der Einleitstelle; zu erkennen ist auch ein geringer Kurzschlusseffekt, wodurch thermisch verändertes Grundwasser durch den Horizontalfilterbrunnen wieder eingezogen wird.

3.5 Hydraulischer und Thermischer Einflussbereich

Zur Beurteilung der Beeinflussung bestehender Wasserrechte wurde auch eine Simulationsberechnung durchgeführt, bei der zusätzlich zur Grundwassernutzung durch den WU Campus auch alle anderen (fremden) Grundwassernutzungen modelliert wurden (Kumulationsbetrachtung). Dazu wurden die Unterlagen zu sämtlichen bestehenden Wasserrechten im Umfeld erhoben und die jeweils bewilligten maximalen Pumpraten im Modell angesetzt.

Diese hydraulischen Modellberechnungen bildeten zusammen mit den thermischen Berechnungen schließlich die Grundlage für die Beurteilung, ob die zahlreichen im Umfeld bestehenden Wasserrechte durch den Betrieb der Grundwassernutzungsanlage beeinflusst werden (**Bild 11**). Die Überprüfung jedes einzelnen Wasserrechts (41 hydraulische (für Gartenbewässerungen, WC-Spülungen etc.) und drei thermische Nutzungen (für Kühlzwecke)) hat letztlich ergeben, dass infolge der Grundwassernutzung

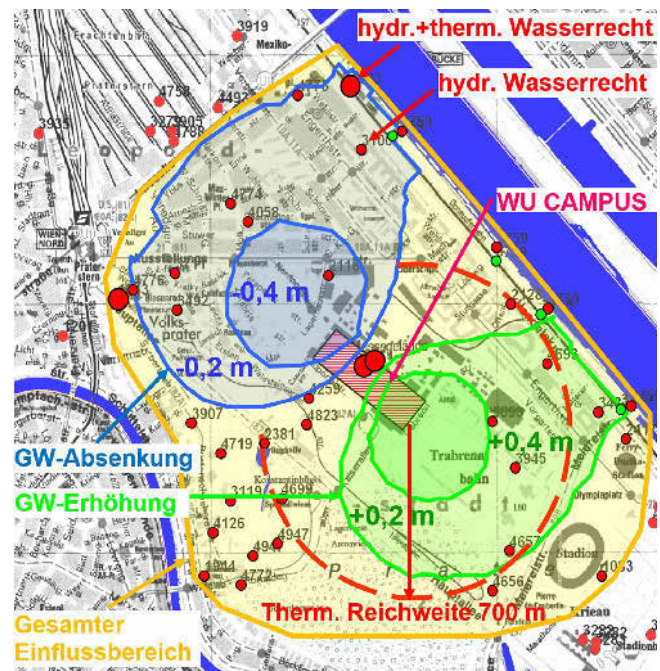


Bild 11. Hydraulische (blau: Absenkung; grün: Aufspiegelung) und thermische (rot strichliert; 700 m) Einflussbereiche sowie bestehende hydraulische (rote Punkte) und bestehende hydraulische+thermische (große rote Punkte) Wasserrechte innerhalb des gesamten Einflussbereiches (gelber Bereich). Grafik: Markiewicz; Hintergrund: Stadt Wien

Fig. 11. Hydraulic (blue: lowering; green: heightening) and thermal (red dotted line; 700 m) areas of influence as well as existing hydraulic (red dots) and existing hydraulic+thermal (large red dots) water rights within the entire area of influence (yellow area)

Source: Markiewicz; background: City of Vienna

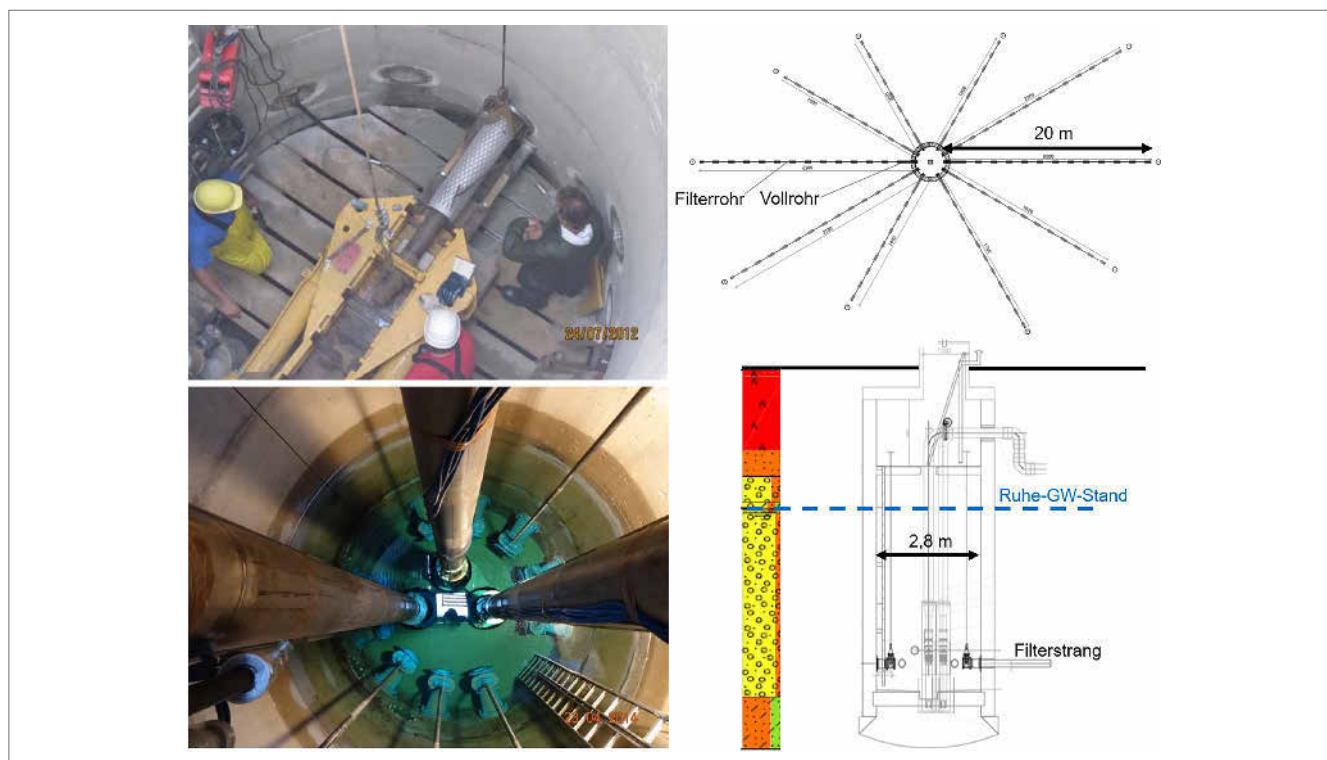


Bild 12. Links, oben: Herstellung des Horizontalfilterbrunnens nach dem Ranney-Falley-Verfahren. Links, unten: Fertiger Brunnen mit den drei Pumpen. Rechts, oben; Grundriss des Horizontalfilterbrunnens. Rechts, unten: Schnitt durch den Horizontalfilterbrunnen

Grafik: Markiewicz; Fotos und Plandarstellungen: Züblin Spezialtiefbau Ges.m.b.H

Fig. 12. Left, top: Construction of the horizontal filter well using the Ranney-Falley method. Left, bottom: Finished well with the three pumps.

Right, top: ground view of the horizontal filter well. Right, bottom: cross section of the horizontal filter well

Source: Markiewicz; photos and drawings: Züblin Spezialtiefbau Ges.m.b.H

durch den WU Campus fremde Wasserrechte zwar berührt werden, jedoch bei sämtlichen Wasserrechten die konsensmäßige Nutzung weiterhin betrieben werden kann.

Außerdem ist hervorzuheben, dass zusätzlich zu dieser Beurteilung der Wasserrechte auch eine geotechnische Beurteilung erfolgte, indem sämtliche Gebäude im hydraulischen Einflussbereich beurteilt wurden, ob eine nachteilige Beeinflussung (z. B. Setzungen, Überflutungen) zu erwarten ist.

Zu erwähnen ist noch, dass das im 2. und 20. Bezirk vorhandene künstliche Grundwasserbewirtschaftungssystem genutzt wird (durch Anpassung der Pumpbetriebszeiten), um die Grundwasserspiegeländerungen möglichst gering zu halten

4 Bausausführung

4.1 Horizontalfilterbrunnen

Der gegenständliche Horizontalfilterbrunnen ist auf einer Freifläche zwischen den Gebäudeobjekten W1E und W2 situiert. Die Herstellung des rund 9 m tiefen Schachtes mit einem Innendurchmesser von 2,8 m erfolgte im Absenkverfahren; die horizontalen Filterstränge wurden nach dem Ranney-Falley-Verfahren (siehe z. B. [11]) unter Verwendung von starkwandigen Schlitzfilterrohren (DN200, einfache Schlitzlochung 6 x 35 mm aus Edelstahl) hergestellt (**Bild 12**). Innerhalb der Filterrohre wurde ein starkwandiges Entsandungsgestänge eingesetzt, das den Filterrohren vorausleitet. Die Entsandung der einzelnen Filterstränge erfolgte zunächst durch Schockentsandung (Öffnen und Schließen des Schiebers) mit zusätzlichem Einsatz von Druckluft, um einen möglichst mächtigen Stützfilterkörper im Untergrund auf-

zubauen. Anschließend erfolgte eine Intensiventsandung mittels Gestänge. Die gemäß ÖNORM B 2601 geforderte technische Sandfreiheit (Restsandgehalt geringer als 1 g/m³) wurde nachgewiesen.

Im Vorfeld der Herstellung wurde eine Bohrung abgeteuft, um die Untergrundverhältnisse zu verifizieren. Der Grundwasserstauer wurde dabei in einer Tiefe von 8,9 m unter GOK aufgeschlossen. Pumpversuche mit Pumpraten bis zu 8,8 l/s wurden in der Bohrung durchgeführt und ergaben eine Wasserdurchlässigkeit des Aquifers von $k_f = 1,4$ bis $6,2 \cdot 10^{-3}$ m/s, womit die Planungsannahmen bestätigt wurden.

Aufgrund der relativ geringen Mächtigkeit des Grundwasserleiters wurden alle Filterstränge in einer Ebene angeordnet, wobei die zehn Filterstränge circa 0,5 m über dem Grundwasserstauer liegen. Zusätzlich dazu wurden sechs Reserveöffnungen im Schacht (sogenannte F-Stücke) für mögliche spätere Vortriebe vorgesehen, wobei zwei Reserveöffnungen in der Ebene der Filterstränge und vier Reserveöffnungen circa 0,5 m über den Filtersträngen angeordnet wurden.

Die gesamte nutzbare Filterlänge des ausgeführten Horizontalfilterbrunnens beträgt 167,2 m (die ersten 5 m sind jeweils als Vollrohre ausgebildet). Die ursprünglich geplante Gesamtlänge von 180 m konnte nicht hergestellt werden, da im Zuge der einzelnen Vortriebe Hindernisse im Untergrund angetroffen wurden.

4.2 Versickerungsanlage und Schluckbrunnen

Die Rückführung des Grundwassers erfolgt – abstromseitig des Horizontalfilterbrunnens – über oberflächennahe Sickersträn-

Tabelle 2. Gegenüberstellung Planungsphase und Betriebsphase
 Table 2. Comparison of planning phase and operating phase

		Planungsphase 2008 (Kapitel 2.3)	10. Betriebsjahr 2023 (Messwerte)
Jahresheizarbeit aus Grundwasser	MWh	2 500	2 412
Jahreskühlarbeit aus Grundwasser	MWh	5 700	5 763
Max. Pumprate	l/s	150	150
Mittlere Pumprate pro Monat	l/s	11-80	26-52
Mittlere Jahrespumprate	l/s	44	39

ge in Form eines rund 150 m langen Filterstranges mit einem Drainagerohr DN300 innerhalb eines Drainagekieskoßers, wobei das zu versickernde Grundwasser – zur besseren Verteilung – an drei Stellen in den Filterstrang eingeleitet wird.

Wie Abschnitt 4.3 noch entnommen werden kann, wurden in der Bauphase zusätzlich noch drei Schluckbrunnen hergestellt, um die Leistungsfähigkeit der Grundwasserrückführung zu erhöhen. Die Brunnen haben einen Bohrdurchmesser von 900 mm mit einem Ausbaudurchmesser (Filtergarnitur) von 400 mm und reichen bis zur Oberkante des Grundwasserstauers.

4.3 Grundwasser-Leitertest und Ertüchtigungsmaßnahmen

Zur Prüfung der Ergiebigkeit des Horizontalfilterbrunnens, der Auswirkungen auf den Grundwasserleiter sowie zur Untersuchung der Verhältnisse im Nahbereich des Brunnens wurde ein so genannter Leitertest ausgeführt. Für diesen Leitertest wurde ein Netz aus mehreren Beobachtungspiegel aufgebaut, wobei Pegel sowohl außerhalb als auch innerhalb der Schmalwandumschließung vorgesehen wurden. Der Leitertest sollte in 5 Stufen mit unterschiedlichen Pumpmengen und Beobachtungszeiten durchgeführt werden:

- Stufe 1: 20 l/s
- Stufe 2: 45 l/s
- Stufe 3: maximal mögliche Entnahme
- Stufe 4: Wiederaufspiegelung des Grundwassers
- Stufe 5: 150 l/s

Der Leitertest offenbarte allerdings bereits in der Stufe 1 und 2 mit geringen Offenraten mehrere Probleme, sodass folgende Ertüchtigungsmaßnahmen ausgeführt wurden:

- Erneute Entsandung einzelner Filterstrecken des Horizontalfilterbrunnens
- Vertiefung der Schachtsohle und Tiefersetzen der Tauchpumpen im Horizontalfilterbrunnen zur Steigerung der maximalen Absenktiefe (max. Absenkung bis 1,0 m oberhalb der Filterstränge)
- Einbau von automatischen Rückspülfiltern, um den Aufwand zur Reinigung der Filter zu minimieren
- Zur Verbesserung der Grundwasserkommunikation im Bereich der Baugrubenumschließung wurde die Schmalwand punktuell mittels Großlochbohrungen (Bohrdurchmesser 900 mm) aufgebohrt und mit Kies verfüllt.
- Im Bereich der Sickeranlagen wurden teilweise stauende Zwischenschichten unterhalb der Versickerungsebene angetroffen, die einen Wasserrückstau verursachten. Zur Ertüchtigung wur-

den ein Bodenaustausch durchgeführt und zusätzlich drei Schluckbrunnen ausgeführt.

Ein erneuter Leitertest verlief letztlich positiv, sodass die gesamte thermische Grundwassernutzungsanlage in Betrieb genommen werden konnte.

5 Betriebsphase

Seit Inbetriebnahme der thermischen Grundwassernutzungsanlage im Jahr 2013 kann mittlerweile auf eine mehr als 10-jährige Betriebsphase zurückgeblückt werden. In **Tabelle 2** sind die Planungsannahmen den Messwerten aus dem 10. Betriebsjahr gegenübergestellt und es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung.

Zudem ist darauf hinzuweisen, dass den Autoren keine Störungen oder sonstige Beeinträchtigungen bekannt sind, sodass ein plangemäßer Betrieb unterstellt werden kann.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Das Projekt „Thermische Grundwassernutzung am neuen Campus der Wirtschaftsuniversität Wien“ stellt eines der größten innerstädtischen Beispiele für die Nutzung von Geothermie in Österreich dar. Ziel war es, ein ökologisch nachhaltiges Energiekonzept umzusetzen, das rund 65-70 % des Heiz- und Kühlbedarfs des Campus mittels direkter Nutzung von Grundwasser abdeckt.

Das System basiert auf einem Horizontalfilterbrunnen zur Grundwasserentnahme mit einer maximalen Förderleistung von 150 l/s. Das Wasser wird für Heiz- und Kühlzwecke genutzt und anschließend über Versickerungsgräben und Schluckbrunnen in das Grundwasser zurückgeführt. Die jährliche Heizarbeit beträgt etwa 2 500 MWh, die Kühlarbeit rund 5 700 MWh.

Zur Planung und Überprüfung wurden umfangreiche geotechnische, hydraulische und thermische Modellierungen durchgeführt. Dabei kamen 2D- und 3D-Simulationsmodelle zum Einsatz, um die Auswirkungen auf das Grundwasser in hydraulischer und thermischer Hinsicht zu analysieren. Auch der Einfluss auf bestehende Wasserrechte im Umfeld wurde untersucht.

Seit der Inbetriebnahme im Jahr 2013 läuft die Anlage störungsfrei. Die gemessenen Betriebsdaten nach zehn Jahren bestätigen die Planungsannahmen nahezu vollständig.

Insgesamt zeigt das Projekt wie durch intelligente Planung, modellgestützte Analysen und angepasste Bauweise ein nachhalti-

ges Energiekonzept für ein großflächiges, innerstädtisches Universitätsgelände erfolgreich umgesetzt werden kann.

LITERATUR

- [1] Baudirektion Kanton Zürich: Energienutzung aus Untergrund und Grundwasser – Planungshilfe. Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft. Zürich, 2010.
- [2] Adam, D.; Markiewicz, R.; Pammer, M.: Thermische Grundwassernutzung zur Heizung und Kühlung des neuen Campus WU Wien – Ein innovatives und nachhaltiges "Green Building"-Projekt. In: ÖBV (Hrsg.): Baukongress, Wien, 2016.
- [3] Gary, G.: Campus WU Wien. In: VÖZ (Hrsg.): zement + beton (2015), 36-41.
- [4] Vasko+Partner Ingenieure: Projektunterlagen. Wien, 2008.
- [5] Dreher, J.; Gunatilaka, A.: Donaukraftwerk Freudenau – Bewirtschaftung der Grundwasserverhältnisse im Stauraum. In: ÖIAV (Hrsg.): Österr. Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift (ÖIAZ), Heft 142-10 (1997), S. 747-752.
- [6] Dreher, J.; Gunatilaka, A.; Wimmer, S. et al: Grundwassermonitoring und Umweltmanagement im Stauraum des Kraftwerkes Freudenau. In: VAW Technische Hochschule Zürich (Hrsg.): Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau, Internationales Symposium, Zürich, 2002.
- [7] Kitanidis, P.: Depth-Averaged Modeling of Groundwater Flow and Transport. In: Comsol (Hrsg.): Comsol-conference, Boston, 2008.
- [8] Chui, M.; Freyberg, D.: The Use of COMSOL for Integrated Hydrological Modeling. In: Comsol (Hrsg.): Comsol-conference, Boston, 2007.
- [9] VDI 4640: Thermische Nutzung des Untergrundes. Düsseldorf. Energie und Umwelt. 2010.
- [10] ÖWAV Regelblatt 207: Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrundes – Heizen und Kühlen. 2009.
- [11] Bieske, E.; Rubbert, W.; Treskatis, C.: Bohrbrunnen. Verlag Oldenbourg, München, 1998.

**Dipl.-Ing. Dr.techn.
Roman Markiewicz**

roman.markiewicz@tuwien.ac.at
Technische Universität Wien, Institut für Geotechnik
Karlsplatz 13, 1040 Wien, Österreich

**Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.
Dietmar Adam**

dietmar.adam@tuwien.ac.at
Technische Universität Wien, Institut für Geotechnik
Karlsplatz 13, 1040 Wien, Österreich

Geotechnik Adam ZT GmbH
Wiener Straße 66-72/15/4, 2345 Brunn am Gebirge, Österreich





Jetzt Technik- wissen testen: 2 Ausgaben gratis

Sie wollen als Ingenieur oder Ingenieurin immer auf dem neuesten Stand sein, wenn es um zukunftsweisende und einzigartige Fachinformationen für die Planung und Ausführung aktueller Bauprojekte für das gesamte Bauingenieurwesen geht? Dann testen Sie jetzt die Zeitschrift Bauingenieur, Organ der VDI-Gesellschaft Bautechnik:

Einfach QR-Code scannen und
2 Print-Ausgaben gratis erhalten! ¹⁾



Technikwissen für Ingenieur*innen - jetzt testen:

T +49 6123 9238-202

E vdi-fachmedien@vuserice.de

vdi-fachmedien.de

¹⁾ Angebot nur gültig für Neu-Abonnenten und Neu-Abonnentinnen.



Wissenschaftlich-ökologische Bewertung dreier Konstruktionsweisen für Bürobauten anhand Grauer Emissionen am Projektbeispiel

R. Müller, A. Dernbach, D. Jochum, E. Wagner, C. Glock

ZUSAMMENFASSUNG Am Siemens Campus Erlangen wurden Büroneubauten von äquivalenter Architektur, Kubatur und Nutzung aber unterschiedlicher Konstruktionsweisen des Tragwerks errichtet. Diese bieten die einmalige Chance der systematischen vergleichenden ökologischen Bewertung der Konstruktionsweisen hinsichtlich der Grauen Emissionen. Zu diesem Zweck wurde in einem Forschungsprojekt zwischen der Siemens Real Estate (SRE) und der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU) jeweils ein realisiertes Referenzgebäude als Stahlbetonskelettbau, als Holz-Beton-Hybridbau und als Stahlbetonsystembau detailliert in einer Ökobilanzierung anhand des Indikators GWP-total analysiert. Der Vergleich der Grauen Emissionen umfasste die Bilanzierungsszenarien Cradle to Site, Cradle to Grave und Cradle to Cradle. Auf Gebäudeebene lag der Schwerpunkt der Untersuchungen auf der konstruktiven Durchbildung des Tragwerks sowie der direkt zugehörigen Ausbauelemente. Bemerkenswert ist, dass sich die Grauen Emissionen auf Gebäudeebene im Referenzszenario Cradle to Cradle zwischen den drei unterschiedlichen Konstruktionsweisen um weniger als 10 % unterscheiden. Im Szenario Cradle to Grave werden im Kontrast dazu die Effekte der Wahl der Systemgrenzen bei Ökobilanzierung mit Holzbaustoffen deutlich. Neben den Rohdecken, Wänden, Fundamenten, Fenstern und dem Dachaus- und -aufbau zeigten sich auch die Bodenaufbauten als emissionsintensive Bauteilgruppe. Auf Basis der Auswertungen konnten fundierte und praxisrelevante Ergebnisse und Empfehlungen zur Wahl der Konstruktionsweise, aber auch zu Vergabe- und Dokumentationsanforderungen zum emissionsreduzierten Bauen abgeleitet werden.

STICHWÖRTER

Stahlbeton, Treibhausgasemissionen, Graue Emissionen, Lebenszyklusanalyse

Scientific Environmental Assessment of Three Office Building Construction Methods Based on Embodied Emissions: A Project Case Study

ABSTRACT At the Siemens Campus in Erlangen, new office buildings of equivalent architecture, cubature and use but differing structural systems were constructed. This provided a unique opportunity for systematic life cycle assessment (LCA) comparing structural systems with regard to embodied carbon. For this purpose, a research project conducted jointly by Siemens Real Estate (SRE) and the University of Kaiserslautern-Landau (RPTU) carried out a detailed LCA of three realised reference buildings: a reinforced concrete frame, a timber-concrete hybrid and a reinforced concrete system. The assessment was based on the total Global Warming Potential (GWP-total). The comparison of embodied carbon covered the assessment scenarios Cradle to Site, Cradle to Grave and Cradle to Cradle. At building level, the analysis focused on the structural design of the load-bearing system and the directly associated construction elements. Notably, in the Cradle to Cradle reference scenario, the embodied carbon at building level differed by less than 10 % between the three structural systems. In contrast, the Cradle to Grave scenario clearly illustrates the effects of the choice of system boundaries in LCA involving timber building material. In addition to floor slabs, walls, foundations, windows and roof structures, floor build-up was also identified as an emission-intensive component group. Based on the assessment, well-founded and practice-oriented findings and recommendations were derived regarding the selection of structural systems as well as procurement and documentation requirements for low-emission construction.

1 Einleitung

Das Unternehmen Siemens verfolgt das selbstgesteckte Ziel der Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2030 und hat daher für die eigenen Gebäude über den Bereich SRE eine Richtlinie bezüglich der Nachhaltigkeit mit verschiedenen Leistungskennzahlen (KPIs) und Zielwerten festgesetzt [1]. Unter dem KPI „Embodied

Carbon“ gibt die SRE für Entwicklungs- und Bauprojekte sowie umfangreichere Sanierungen einen maximalen Ausstoß Grauer Emissionen von 300 kg CO₂-Äq./m²NGF bei Bürogebäuden als Zielwert für das Gesamtgebäude aus. Im Vergleich dazu wird in der DAfStb-Richtlinie „Treibhausreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton“ [2] als Referenzzustand für Büro- und Nichtwohngebäude 320 kg CO₂-Äq./m²BGF, allerdings be-



Bild 1. „Module“ und untersuchte Gebäude G1 bis G3 am Siemens Campus Erlangen Foto: Siemens Real Estate, bearbeitet
Fig. 1. „Modules“ and analyzed buildings G1 to G3 at Siemens Campus Erlangen Source: Siemens Real Estate, edited

zogen auf die Bruttogrundfläche (BGF) ausschließlich für die tragende Konstruktion ausgegeben.

In einem gemeinsamen Forschungsprojekt zwischen SRE und dem Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion der RPTU wurden im Zeitraum Januar bis September 2024 drei Büroimmobilien mit dem Schwerpunkt Graue Emissionen vergleichend ökobilanziert und wissenschaftlich ausgewertet. Die untersuchten Gebäude wurden innerhalb der letzten Dekade (2016 bis 2025) am Siemens Campus Erlangen errichtet und weisen eine identische äußere Architektur, Kubatur und Nutzung sowie dieselbe Auftraggeberin auf. Dies bietet die außergewöhnliche Gelegenheit, die Grauen Emissionen verschiedener Konstruktionsweisen des Tragwerks in real umgesetzten Bauvorhaben zu vergleichen, die sämtliche über Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit hinausgehende baulichen Anforderungen sowie nutzungsspezifische Aspekte berücksichtigen. Die sonst übliche variable Architektur und Nutzung, die den Vergleich von Gebäuden und Infrastrukturbawerken erschwert [3-6], ist aufgrund der besonderen Konstellation eliminiert.

2 Projektvorstellung

2.1 Siemens Campus Erlangen

Mit Beginn der Bauarbeiten im Jahr 2016 legte Siemens den Grundstein zur umfassenden Umgestaltung des Siemens Areals in Erlangen. Bis in die 2030er-Jahre entsteht auf einer Gesamtfläche von über 54 ha mit einem Investitionsvolumen von einer Mrd. Euro ein offener und lebendiger Stadtteil als Siemens Campus Erlangen (SCE) [7]. Die drei untersuchten Gebäude wurden jeweils von verschiedenen Generalunternehmern in unterschiedlichen Bauabschnitten, den sogenannten „Modulen“, umgesetzt. Die Umgestaltung des Campus wird in einem Masterplan in 8 „Module“ untergliedert und unterliegt den in der internen Richtlinie festgelegten Nachhaltigkeitsanforderungen [1]. Über die bloße Wiederverwendung von Materialien hinausgehend, etablieren die neuen Vertragsbestimmungen einen Paradigmenwechsel im Bauwesen: Erstmals werden von Auftraggeberinnenseite Zielwerte definiert

und für „Modul 8“ sogar vertraglich festgelegte CO₂-Emissionsziele hinsichtlich der Grauen Emissionen für die Durchführung des Bauvorhabens vereinbart.

Entsprechend der chronologischen Reihenfolge startete die Firma Max Bögl mit dem „Modul 1“ im Jahr 2016, welches 2020 fertiggestellt wurde. Gleichzeitig begann der Hochbau für „Modul 2“ durch die Firma Zech Bau. Die Fertigstellung erfolgte 2022. „Modul 8“ wurde von 2024 bis Ende 2025 von der Firma Goldbeck errichtet und befand sich somit während der Bilanzierungsstudie noch im Bau. Trotz nahezu identischer architektonischer Rahmenbedingungen unterscheiden sich die untersuchten Gebäude in den drei „Modulen“ grundlegend in ihrer Konstruktionsweise.

2.2 Forschungsprojekt zum ökobilanziellen Vergleich

Die reine Variation der Konstruktionsweise der Gebäude am SCE erlaubt es erstmals, die konstruktiven Unterschiede unabhängig von der Architektur zu bewerten und sichtbar zu machen. Zur Bilanzierung der drei exemplarisch gewählten Gebäude arbeitete die RPTU in enger Abstimmung mit der SRE zusammen. Im Mittelpunkt der Untersuchungen steht die wissenschaftliche Bewertung der Konstruktionsweisen mit dem Ziel, emissionsreduzierende Optimierungspotenziale zu identifizieren und Empfehlungen auszusprechen.

Der Untersuchungsrahmen des gemeinsamen Forschungsprojekts sowie die vorliegende Veröffentlichung beschränken sich auf die „Module“ 1, 2 und 8 des SCE, woraus je ein Gebäude bilanziert wurde. Aufgrund der begrifflichen Überschneidung mit dem Modulbegriff der Ökobilanz werden die untersuchten Bauwerke im Folgenden als Gebäude 1, 2 und 3 (G1, G2, G3) bezeichnet. G1 und G2 bezeichnen die Gebäude aus den gleichnamigen „Modulen“, G3 das Gebäude aus „Modul 8“. **Bild 1** zeigt die Lage der „Module“ sowie untersuchten Gebäude G1 bis G3 am Siemens Campus Erlangen.

Um die Methodik der Ökobilanzierung und die daraus resultierenden Ergebnisse angemessen in den Gesamtkontext einordnen zu können, werden in **Tabelle 1** und Abschnitt 2.3 die zentralen Parameter sowie die konstruktiven Unterschiede von G1, G2 und G3 dargestellt. Zur vereinfachten Übersicht werden die Unterschiede in der Konstruktionsweise von G1 bis G3 zusätzlich anhand der schematischen Darstellung der Regelgeschossgrundrisse und Schnitte der Deckensysteme gezeigt (**Bild 2**). Bei mehrgeschossigen Gebäuden verantworten diese mit circa 40 % [8] den Großteil an tragwerksbedingten Emissionen und sind folglich von hoher Relevanz für die Bilanzierung und den gebäudeübergreifenden Vergleich [9-11].

2.3 Konstruktionsweisen

2.3.1 G1: Stahlbetonskelettbau

Bei G1 wurde das Tragwerk in Stahlbeton-Skelettbauweise ausgeführt. Charakteristisch für das von Max Bögl errichtete Gebäude sind Stahlbeton-Flachdecken in Ortbetonbauweise. Diese wurden schlaff bewehrt und mit einer Betondruckfestigkeitsklasse C30/37 sowie einer Dicke von 24 cm ausgeführt. Dabei wurden alleine bei der Ausführung der Stahlbeton-Flachdecke bereits 3 100 m³ Beton verbaut.

Tabelle 1. Konstruktionsweise und Materialeinsatz bei G1 bis G3
Table 1. Design and material used in G1 to G3

	Stahlbetonskelettbau (G1)	Holz-Beton-Hybridbau (G2)	Stahlbetonsystembau (G3)
Rohdecken	Stahlbetonflachdecke $h=24$ cm. Deckenquerschnitt im Gebäude einheitlich. ca. 7 500 t Beton (C30/37), 430 t Bewehrung.	Cree-Deckenelemente (HBV) $h_{ges}=40$ cm, $h_c=13$ cm, $h_t=30$ cm, Deckenquerschnitt variiert im Gebäude, ca. 5 200 t Beton (C40/50), 290 t Holz (GL28c) und 360 t Bewehrung.	Flach – und Rippendecken, $h_{Rippe}=25$ bzw. 32,5 cm, $h_{Platte}=10$ cm. Teilweise vorgespannt. Deckenauflagerung auf Stahlprofil-Unterzügen. Ca. 4 800 t Beton (C40/50), 280 t Bewehrung und 250 t Stahlunterzüge
Bodenaufbau	ca. 10 500 m ² Hohlböden; ca. 430 m ³ Zement- und CAF-Estrich; Oberbeläge Teppich, Linoleum und Fliesen.	ca. 10 900 m ² Hohlböden; ca. 358 m ³ Zement- und CAF-Estrich; Oberbeläge Teppich, Linoleum und Fliesen.	ca. 12 930 m ² Hohlböden; ca. 1 900 m ³ Zement- und CAF-Estrich; Oberbeläge Teppich, Linoleum und Fliesen, bituminöse Abdichtung
Stützen	273 Stahlbetonstützen (C20/25 – C40/50); Abnahme der Festigkeit mit zunehmender Geschosshöhe. Ca. 250 t Beton.	172 Stahlbetonstützen (C35/45 oder C50/60) sowie 94 Holzstützen (GL25h).	103 Stahlbetonstützen (C50/60), 480 Stahlstützen im Innenbereich und 337 Stahlstützen zum Anschluss der Außenwand. Ca. 100 t Beton und 200 t Stahlprofile. Für die Stahlstützen ist eine Brandschutzverkleidung berücksichtigt.
Wände	FT-Außen- und Innenwände, ergänzt durch vereinzelte Ortbetonwände. Attika als Halbfertigteil (Doppelwand). vereinzelt Kalksandstein-Mauerwerkswände im Keller. Festigkeitsklassen C35/45 und C40/50. ca. 3 600 t Beton.	ca. 501 t Cree-Holzwandelemente (zementgebundene Spanplatten, KVH, BSH, OSB3) sowie ca. 2 400 t Stahlbetonwände in den aussteifenden Bereichen der Treppenhäuser mit den Festigkeitsklassen C30/37 und C50/60.	Wände überwiegend in Systembauweise errichtet. Bei den Außenwänden sind die Fertigteile mit Stahlstützen ergänzt. Insgesamt ca. 2 760 t Beton (C30/37 und C35/45) sowie 230 t KS-Mauerwerk.
Wanddämmung	Reine Außendämmung auf Massivwänden als Teil der Alcobond Fassade (Außenansicht) & des WDVS (Fassade Innenhof). Mineralfaserdämmung 16-18 cm.	Cree-Wandelemente (Ständerbauweise) mit Dämmmaterial gefüllt, zusätzliche Dämmschicht auf Wandinnenseite. WDVS auf Außenseite (Bereich Innenhof).	18 cm Mineralwolldämmung der Kassetten der Außenfassade. Zum Innenhof hin ebenfalls Kassettendämmung (kein WDVS).
Gründung	Block- & Balkenfundamente, Bodentrasse & Bodenplatten. Fundamente unter EG C30/37 und unter KG C35/45. Ca. 3 000 t Beton. Gegen Erdreich Perimeterdämmung aus XPS.	Überwiegend Streifenfundamente der Festigkeitsklassen C30/37, C35/45 und C40/50. Ca. 4 000 t Beton. Gegen Erdreich Perimeterdämmung aus XPS.	Einzel- und Streifenfundamente aus Beton der Festigkeitsklasse C25/30. Ca. 2 000 t Beton. Gegen Erdreich Perimeterdämmung aus XPS.
Treppen	ca. 145 t Beton C40/50.	ca. 145 t Beton C30/37.	ca. 225 t Beton C35/45.
Fenster	ca. 2 500 m ² Fensterfläche.	ca. 1 935 m ² Fensterflächen.	ca. 2 220 m ² Fensterfläche.
Fassadenoberfläche	ca. 3 100 m ² Aluminiumverbundbleche & ca. 1 300 m ² WDVS-Oberfläche (abzgl. Wandaußendämmung).	ca. 3 200 m ² Aluminiumverbundbleche und ca. 1 300 m ² WDVS-Oberfläche.	ca. 5 350 m ² Aluminiumverbundbleche (einheitliche Fassade, kein WDVS).
Abhangdecken	Deckenkoffer, bereichsweise abgehängte Decken und Deckensegel mit Akustik- und Kühlfunktion.	Deckenkoffer, bereichsweise abgehängte Decken und Deckensegel, Bandrasterdecken, Mineralfaserplatten, GK-Platten und Feuchtraumplatten.	Mineralfaser-Deckenplatten, Gipskarton-Platten oder gelochte Gipskarton-Platten. Im EG zusätzlich gelochte Metallrasterdecken.
Dachausbau	Gründach (Mineralwolle, Dicht- & Schweißbahnen, Filterflies, Rundkies 16/32, Einschichtsubstrat, Foamglas, PVC-Folie, Drainagematten), Dachaufbauten zur Einhausung TGA aus Stahlprofilen.	Gründach (analog G1), Dachaufbauten zur Einhausung TGA aus Stahlprofilen.	Gründachaufbau (analog zu G1), Dachaufbauten für TGA aus Stahlprofilen und Trapezblech.

2.3.2 G2: Holz-Beton-Hybridbau

Das von der Firma Zech Bau errichtete G2 ist durch ein hybrides Holz-Beton-Verbund-Rippendeckensystem und Holztafelwände charakterisiert. Die Betondruckfestigkeitsklassen variieren zwischen C30/37, C40/50 und C50/60. Im Cree-Deckensystem (HBV) sind 13 cm dicke Stahlbetonplatten mit Brettschichtholzträgern der Güte GL 28c verbunden. Die Stützen sind einreihig

ausgeführt. Insgesamt wurden bei G2 etwa 2 170 m³ Beton im Deckensystem eingebaut.

2.3.3 G3: Stahlbetonsystembau

Charakteristisch für G3 ist die von der Firma Goldbeck angewandte Systembauweise mit teilweise vorgespannten Stahlbeton-Flach- und -Rippendecken und integrierten Stahlunterzügen so-

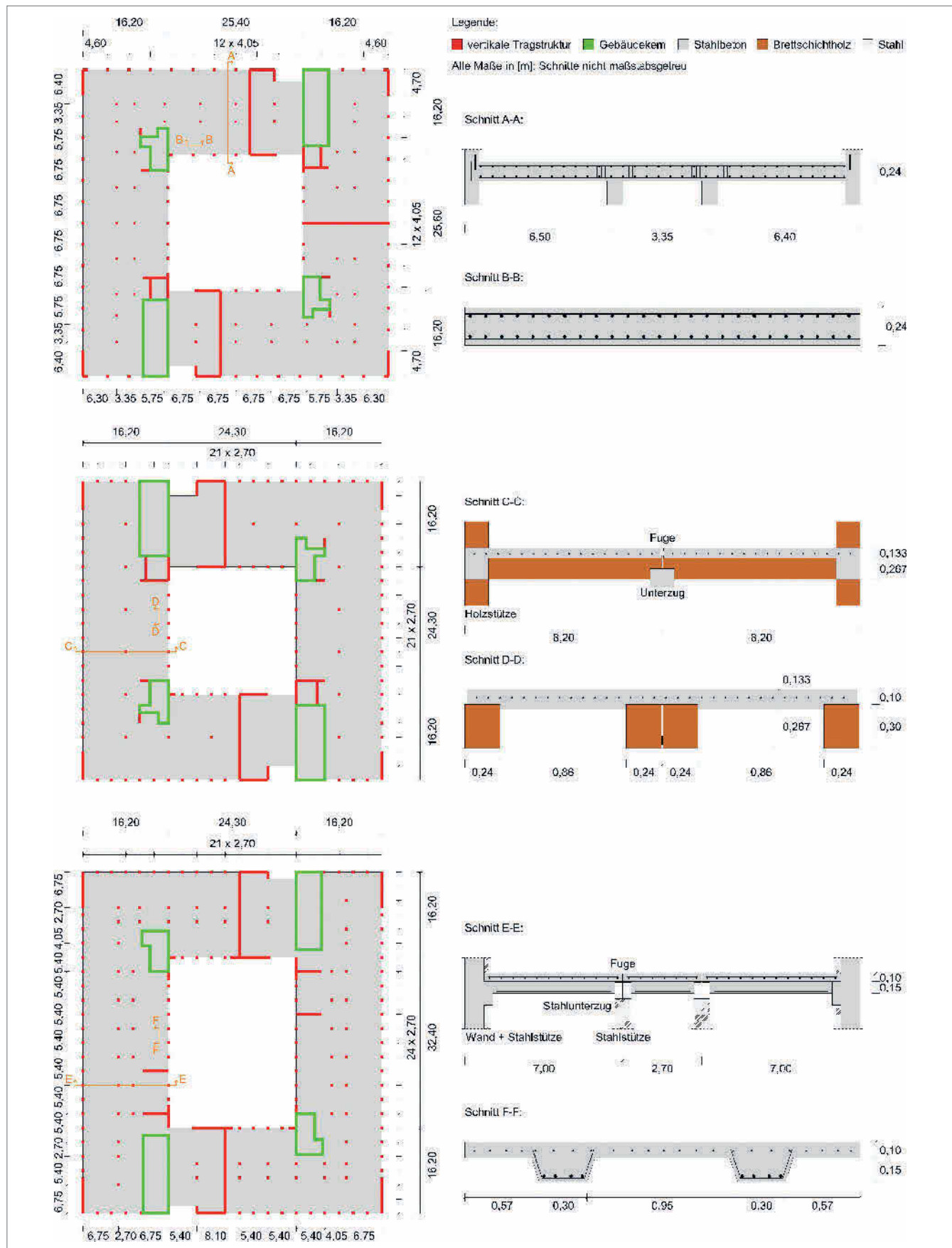


Bild 2. Grundrisse und Schnitte der Gebäude G1 (oben), G2 (Mitte) und G3 (unten) schematisch Grafik: RPTU
Fig. 2. Schematic floor plans and sections of buildings G1 (top), G2 (middle) and G3 (bottom) Source: RPTU

wie Stahlstützen. Die Betondruckfestigkeitsklassen variieren zwischen C35/45, C40/50 und C50/60. Insgesamt kamen etwa 2 000 m³ Beton im Deckensystem zum Einsatz.

3 Ökobilanzierung der Grauen Emissionen

3.1 Definition des Untersuchungsziels

Die Ökobilanzierung der drei Gebäude wurde in Anlehnung an die Grundsätze und Anforderungen nach DIN EN ISO 14040 [12] und DIN EN ISO 14044 [13] durchgeführt. Als Ziel der Bilanzstudie wurden als signifikanteste Größe im Zusammenhang der Klimaverträglichkeit [14] die Grauen Emissionen betrachtet. Letztere werden im Rahmen der Studie in Anlehnung an [8] definiert als diejenigen Treibhausgasemissionen, welche durch die Herstellung, Errichtung und Entsorgung der Gebäude, nicht aber deren Betrieb, anfallen und in CO₂-Äquivalenten angegeben. Somit war eine Bewertung der Gebäude G1 bis G3 in Bezug auf den KPI „Embodied Carbon“ der SRE möglich [1]. Die Bilanzierung der Grauen Emissionen erfolgte anhand des Indikators Global Warming Potential (GWP-total) als Summe der Anteile aus fossilem und biogenen GWP sowie des GWP aus Landnutzung und Landnutzungsänderung (engl. „land use and land use change“, GWP-luluc). Die Auswertung der Ökobilanz zielte auf die Identifikation der relevantesten GWP-Treiber unter den Bauteilgruppen sowie zwischen den Gebäuden verschiedener Konstruktionsweisen ab. Hierdurch werden sowohl konstruktions- als auch materialspezifische Handlungsempfehlungen für die SRE als Bauherrin abgeleitet, um die Grauen Emissionen ihrer Büroimmobilien weiter senken zu können als auch die Effektivität ihrer diesbezüglichen KPIs zu reflektieren.

3.2 Festlegung des Untersuchungsrahmens

3.2.1 Bilanzierte Bauteile

Der Untersuchungsrahmen umfasste initial die möglichst vollständige Bilanzierung sämtlicher Bauteile in jedem der drei Gebäude, wobei sich entsprechend der verfügbaren qualifizierten Datengrundlage Einschränkungen ergaben. Im Sinne valider Ergebnisse sowie einer Sicherstellung der objektiven Vergleichbarkeit der bilanzierten Gebäude wurde der Betrachtungsfokus auf den Rohbau gelegt und nur ausgewählte und direkt mit dem Rohbau im Zusammenhang stehende Positionen des Ausbaus in die Berechnung einbezogen. Auf die Bilanzierung der TGA wurde verzichtet, da diese bei den Beispielprojekten nicht in direktem Zusammenhang mit den baukonstruktiven Unterschieden der verglichenen Gebäude steht. Zudem galt es zu vermeiden, dass der Gesamtvergleich durch im TGA-Bereich teilweise nur bedingt vergleichbare Gebäudedokumentation verfälscht würde.

Auf Bauteilebene wurden innerhalb aller Gebäude einheitlich folgende elf Bauteilgruppen bilanziert: Rohdecken, Bodenaufbauten, Stützen, Wände und Wanddämmung, Gründung, Treppen, Fassadenoberfläche, Fenster, Abhangdecken, Dachausbau. Die Rohdecken umfassten dabei sämtliche tragenden Deckenplatten mit zugehörigen Unterzügen beziehungsweise Rippenteilquerschnitten sowie die tragende Platte als oberen Gebäudeabschluss im Flachdach. Folglich enthielt die Kategorie Dachausbau noch die Abdichtung, Dämmung und Schüttungen auf dieser obersten

Platte sowie die im Stahlbau ausgeführte Einhausung auf dem Dach befindlicher TGA. Unter der Kategorie Gründung wurden sowohl Einzel- und Streifenfundamente als auch Bodenplatten zuzüglich der Dämmung gegen das Erdreich erfasst. Die Wanddämmung umfasste sämtliche vertikal angeordnete Dämmung an oder in Wandquerschnitten, auch die Dämmung im WDVS, dessen übrige Bestandteile zusammen mit den Aluminiumpaneelen in der Fassadenoberfläche subsummiert wurden. Da in G2 Holzständerwände ausgeführt sind, deren Dämmung teilweise innerhalb des Wandquerschnitts liegt, zeigt sich die direkte Zuordnung der übrigen Wandaußendämmung zur Fassade im Sinne der Vergleichbarkeit der Konstruktionsweisen als nicht zweckmäßig. Die Kategorie Bodenaufbauten enthielt alle Estriche und Beläge oberhalb der Rohdecken oder Bodenplatten.

3.2.2 Angesetzte Lebensdauer der Bauteile und Lebenszyklusphasen

Die Komplexität in der Bilanzierung mehrschichtiger Bauteile trug dazu bei, dass auf den materialspezifischen Ansatz von Austauschhäufigkeiten während des Gebäudelebenszyklus bewusst verzichtet wurde. Entsprechend des Untersuchungsziels sollte der Betrachtungsfokus auf die Konstruktionsweisen der Neubauten und die damit verbundenen Grauen Emissionen gelegt werden. Es ist anzumerken, dass sich das Gesamtergebnis der Ökobilanzierung bei Berücksichtigungen von Bauteilaustauschen verändert.

Alle ökobilanziellen Berechnungen mit Blick auf das GWP-total wurden jeweils vollständig für die Bilanzierungsszenarien Cradle to Site (Lebenszyklusphasen A), Cradle to Grave (Lebenszyklusphasen A-C) und Cradle to Cradle (Lebenszyklusphasen A-D) nach [15] für eine Lebensdauer von 50 Jahren durchgeführt.

3.2.3 Verwendete Datensätze

Insbesondere für die Bilanzierung der Materialien der Tragstruktur – Beton, Betonstahl, verschiedene Holzwerkstoffe und Baustahl – wurden generische Datensätze aus der Ökobaudat, Version 2023, zum Ansatz gebracht [16]. Die generischen Datensätze, die einer theoretischen Modellierung entstammen und nicht auf Industriedaten basieren, enthalten aufgrund der Modellierungsunsicherheit je nach Vollständigkeit Sicherheitszuschläge zwischen 10 % und 30 % auf die GWP-Anteile GWP-fossil und GWP-luluc [17]. Auf durchschnittliche und repräsentative Datensätze wurde lediglich mangels Alternativen vereinzelt zurückgegriffen. Nur bei den Materialien des Ausbaus und konkreten Bauprodukten, die aufgrund ihrer speziellen Funktionen verbaut wurden, wie beispielsweise Akustik-Deckensegel mit Kühlfunktion, wurden in Teilen auch spezifische Datensätze der jeweiligen Hersteller verwendet. Für den Vergleich der Konstruktionsweisen zwischen den drei bilanzierten Gebäuden ist der Ansatz von Datensätzen, die in gleichem Maße für ein vielfach verwendetes Material repräsentativ sind, essentiell. Andernfalls droht die Vergleichsrechnung und deren wissenschaftliche Auswertbarkeit durch spezifische Datensätze verschiedener Hersteller verzerrt zu werden. Die Bilanzierung der Fenster erfolgte vereinfacht durch Umlegung eines herstellerspezifischen Datensatzes der primär in

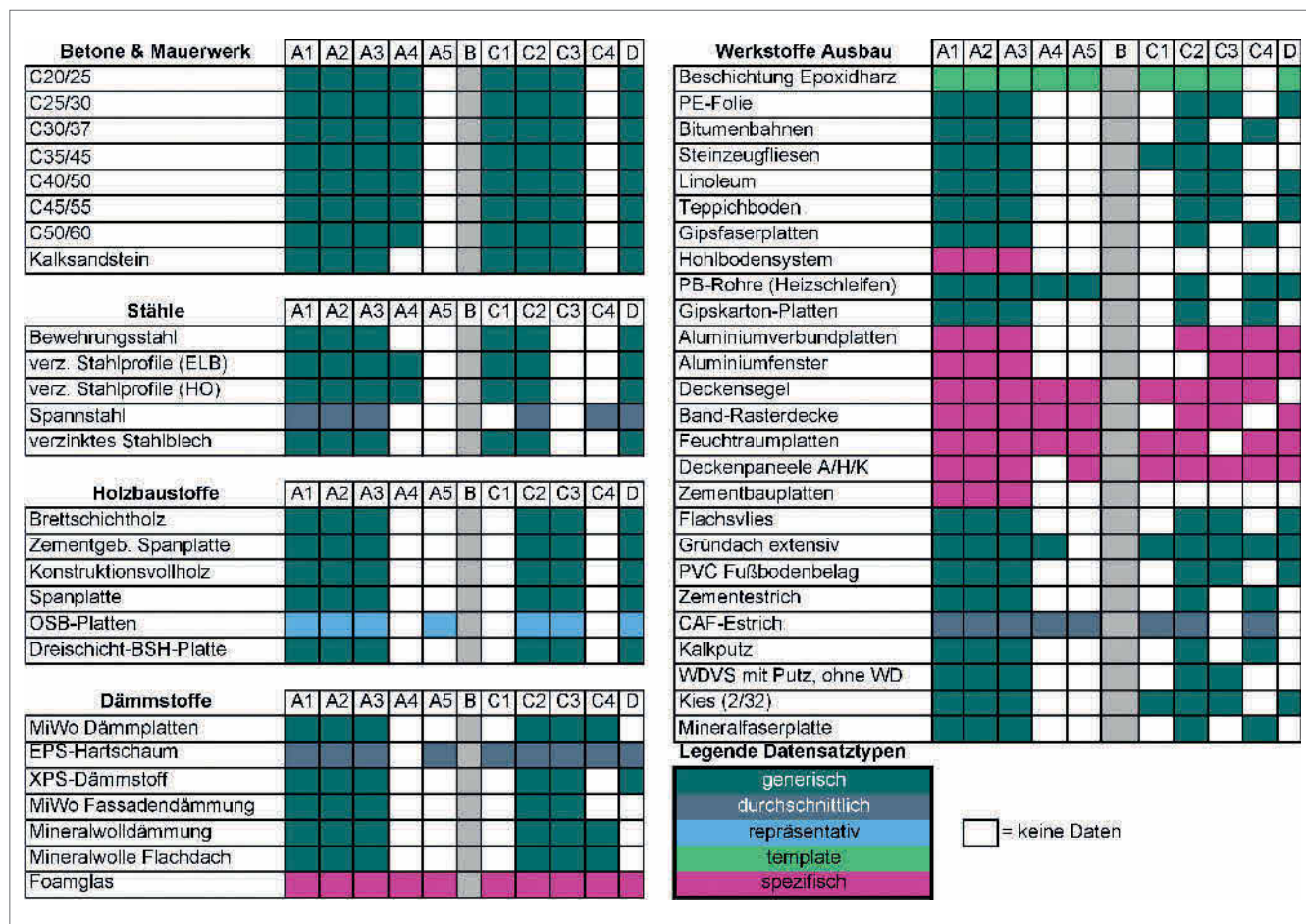


Bild 3. Qualitative Übersicht der Typen verwendeter Datensätze und enthaltener Lebenszyklusdaten *Grafik: RPTU*
 Fig. 3. Qualitative overview of the types of data sets used and the life cycle data contained *Source: RPTU*

G1 verbauten Fenster auf die Fensterfläche der anderen Gebäude, da für die übrigen Gebäude kein entsprechender Datensatz verfügbar war. Anhand der Relevanz des Baustoffs Beton für das Bilanzierungsergebnis ist zu erwähnen, dass die ermittelten Betonvolumina im Rahmen der Untersuchungen ausschließlich in Abhängigkeit der angegebenen Betondruckfestigkeitsklasse differenziert wurden. Weiterführende Informationen zu den Betonrezepturen, insbesondere zu den verwendeten Zementen oder zum Einsatz von RC-Beton, lagen nicht vor. Die Datensätze für die Betondruckfestigkeitsklassen C35/45, C40/50 und C45/55 wurden mangels Verfügbarkeit in der Ökobaudat durch Interpolation zwischen den Datensätzen der übrigen Druckfestigkeitsklassen abgeleitet. Dies trägt dem Zusammenhang Rechnung, dass Zementgehalt und Betondruckfestigkeit positiv korrelieren.

Da die generischen Datensätze für die Ökobaudat als Gesamtheit vom BBSR beauftragt und vom selben Lieferanten bereitgestellt werden [18], kann von einer kontrollierten und einheitlichen Qualität der Datensätze als Vergleichsgrundlage ausgegangen werden. Zudem sind die generischen Datensätze hinsichtlich enthaltener Bilanzmodule einheitlich ausgelegt. Dennoch ist anzumerken, dass die Gesamtheit der verwendeten Datensätze in Bezug auf die ausgewiesenen Module lückenhaft ist, lediglich die Module der Herstellung A1-A3 sind in jedem Fall enthalten. Diesen Umstand sowie die Verteilung der Datensatztypen zeigt **Bild 3** auf. Hierdurch verfügt das Bilanzszenario A gegenüber A-C und A-D über eine erhöhte Aussagekraft.

3.3 Durchführung der Sachbilanz

Im Sinne größtmöglicher Transparenz wurden sowohl Sachbilanz als auch Wirkungsabschätzung aufwändig händisch in MS Excel durchgeführt, spezielle Software zur Ökobilanzierung wurde bewusst nicht verwendet. Hierdurch sollte die vollständige Nachvollziehbarkeit aller Rechenschritte und Ergebnisse gewährleistet werden. Zudem unterschieden sich die vorliegenden BIM-Modelle der drei bilanzierten Gebäude signifikant im Grad sowie der Vollständigkeit der Attribuierung und Detaillierung, sodass die Bilanzierung händisch unter ständigem Abgleich der Bilanzgrenze erfolgen musste. Primäre Grundlage der Massenermittlung waren die Planunterlagen. Sofern BIM-Modelle mit hinreichender Eignung vorlagen, konnten diese durch Export von Bauteillisten und Anwendung von Filtern für schwer überschaubare Positionen, wie zum Beispiel die Gründung, ergänzt werden. Die ermittelten Massen wurden fortlaufend anhand der Nutzfläche der Gebäude, im Vergleich zwischen den Gebäuden oder im Austausch mit Vertreter:innen der SRE plausibilisiert. Vereinzelt mussten fundierte Annahmen zu Materialgütern, insbesondere Betonfestigkeitsklassen, oder Ausführungsvarianten beziehungsweise Planungsständen getroffen werden. In der Betrachtung von Massen beziehungsweise Volumina muss bei G3 die um 14 % größere Nutzfläche beachtet werden, da G3 eine geringfügig abweichende Grundfläche aufweist. In weiterführenden Vergleichen auf Ebene des GWP pro m² korrigiert sich diese Differenz im Vergleich zu G1 und G2.

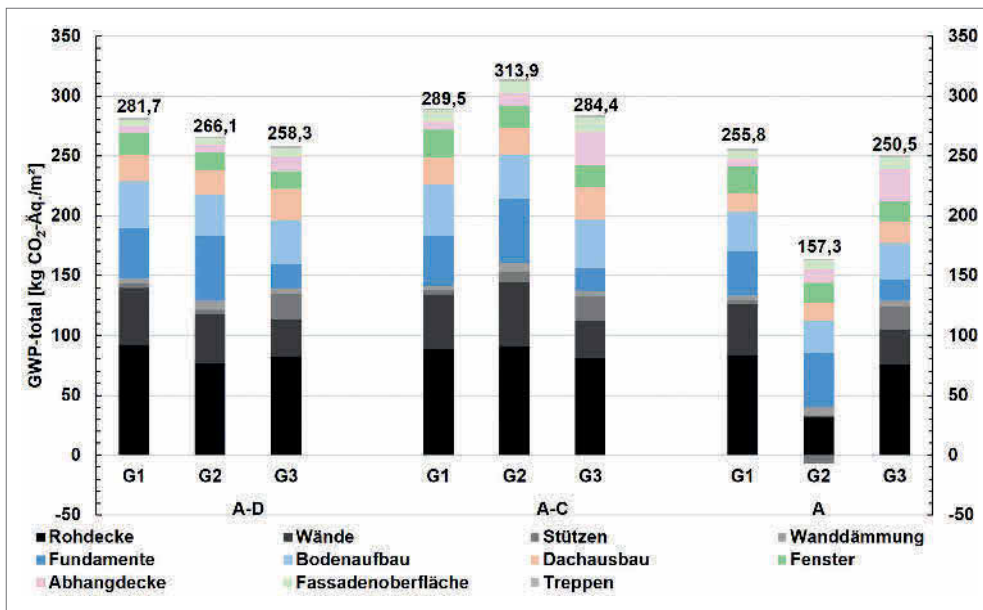


Bild 4. GWP-total pro m² Nutzfläche der Gebäude G1 bis G3, differenziert nach Bilanzierungsszenarien und Bauteilgruppen
 Grafik: RPTU
 Fig. 4. GWP-total per m² of usable floor space in buildings G1 to G3, differentiated by scenarios and component groups Source: RPTU

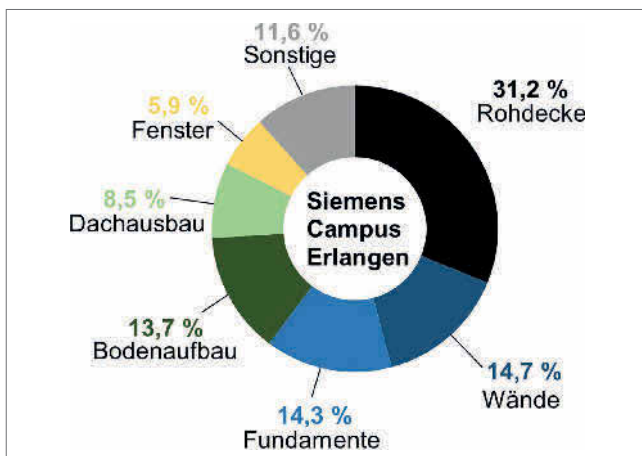


Bild 5. Anteile der Lebenszyklusphasen (A-D) am GWP-total pro m² Nutzfläche: Durchschnittswerte der Referenzgebäude G1 bis G3 Grafik: RPTU
 Fig 5. Proportion of life cycle phases (A-D) in total GWP per m² of usable floor space: Average values for buildings G1 to G3 Source: RPTU

4 Ergebnisse der Ökobilanzierung

4.1 Gebäudevergleich

Die folgenden Ergebnisse zeigen den quantitativen Vergleich der Grauen Emissionen je m² Nutzfläche anhand des Indikators GWP-total unter Berücksichtigung der definierten Systemgrenzen. Die Bezugsfläche wurde für dieses Forschungsprojekt in Anlehnung an die SRE-Richtlinie [1] von Siemens und abweichend von der DAfStb-Richtlinie [2] vorgegeben. Der Gesamtgebäudevergleich in **Bild 4** umfasst alle bilanzierten Bauteilgruppen und differenziert zwischen den Bilanzierungsszenarien Cradle to Site (A), Cradle to Grave (A-C) und Cradle to Cradle (A-D).

Im Gesamtgebäudevergleich des Szenarios A-D wird ersichtlich, dass insgesamt 82 % bis 93 % des GWP-total in Summe durch die Bauteilgruppen Rohdecke, Wände, Fundamente, Bodenaufbauten, Dachausbau und Fenster verursacht werden (**Bild 5**).

Die Position Rohdecke entspricht rund einem Drittel des GWP-total (A-D). Diese sechs Positionen können damit für alle

Konstruktionsweisen als relevanteste Treiber des GWP innerhalb der untersuchten Büroimmobilien identifiziert werden. Bei G3 zeigt sich zudem in allen Szenarien ein erhöhter Anteil der Stützen am Gesamtergebnis, was der primären Verwendung von Baustahl geschuldet ist. Sowohl im Szenario A-D als auch A erzielt G1 mit 281,7 beziehungsweise 255,8 kg CO₂-Äq./m² das höchste GWP-total der drei Gebäude. Das GWP von G3, welches in diesen beiden Szenarien mit dem geringsten Gesamtergebnis abschneidet, weist jedoch mit einer maximalen Differenz von bis zu 9 % (A-D) keine erhebliche Reduktion gegenüber G1 auf. Im Szenario A-D ordnet sich G2 im Mittelfeld ein, während mit den Bilanzgrenzen A-C der größte absolute GWP-Wert von 313,9 kg CO₂-Äq./m² hervorgerufen wird. Bei exklusiver Berücksichtigung der Herstellungsphase (A1-A3) wiederum halbiert sich das GWP-total von G2 auf den insgesamt kleinsten Einzelwert. Diese Inkohärenz ist durch die Erfassung der biogenen Kohlenstoffspeicherung und entsorgungsbedingten Wiederfreisetzung in Holzwerkstoffen von unterschiedlicher Vollständigkeit sowie der Anrechenbarkeit energetischer Vorteile aus der Verwertung begründet [8, 19].

4.2 Bauteilvergleich

4.2.1 Allgemeines

Im Sinne einer detaillierteren Betrachtung werden für das Referenzbilanzierungsszenario A-D nachfolgend die Grauen Emissionen der einzelnen Bauteilgruppen Rohdecken, Stützen und Wände inklusive Wanddämmung dargestellt. Als zugehöriges Zwischenergebnis der Sachbilanz wird der absolute Verbrauch der Baustoffe der Deckensysteme wiedergegeben. Anhand dieser Positionen werden die Auswirkungen auf die Grauen Emissionen der verschiedenen Deckensysteme und des daran anschließenden vertikalen Tragwerks als wesentliches Unterscheidungsmerkmal der drei untersuchten Gebäude ersichtlich. Die Wanddämmung als einzig nichttragende Bauteilgruppe wird als Bestandteil der Gebäudehülle, deren Ausgestaltung direkt von der Materialität der tragenden Wände abhängig ist, zur Betrachtung bauartspezifischer Vor- und Nachteile ebenfalls dargestellt. Im Gegensatz dazu sind die übrigen Bauteilgruppen wie zum Beispiel Bodenaufbau, Fens-

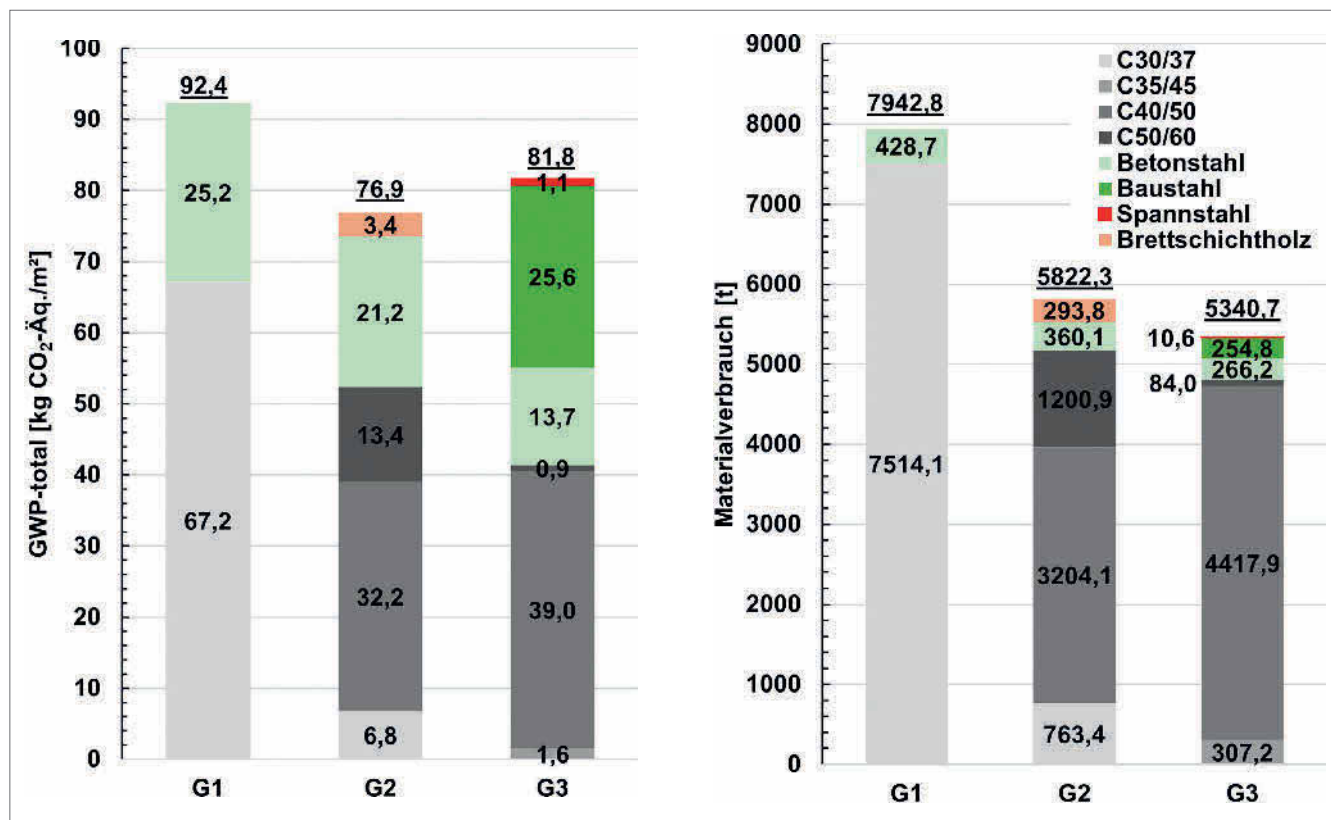


Bild 6. GWP-total (links) und Materialverbrauch (rechts) der Deckensysteme in den Gebäuden G1 bis G3, Bilanzierungsszenario A-D Grafik: RPTU
Fig. 6. GWP-total (left) and material consumption (right) for ceiling systems in buildings G1 to G3, scenario A-D Source: RPTU

ter, Dachausbau weitgehend unabhängig von der gewählten Tragstruktur durchgebildet und werden trotz teilweise größeren GWP-Ergebnissen nicht gesondert diskutiert. Die vorgefundenen Unterschiede in der Gründung der Gebäude entspringen primär baubetrieblichen Abwägungen und zeigen keine direkte Abhängigkeit von den verschiedenen Gesamtmassen der Gebäude auf. Folglich wird hierauf in der vorliegenden Veröffentlichung, die sich auf konstruktions- und materialspezifische Unterschiede der Gebäude konzentriert, nicht näher eingegangen.

4.2.2 Rohdecken

Die Gegenüberstellung von Masse und GWP-total am Beispiel der Deckensysteme in **Bild 6** verdeutlicht einen starken Einfluss bestimmter, emissionsintensiver Materialien. So erbringen die Rohdecken in G1 mit knapp 8000 t signifikant mehr Masse als in den anderen beiden Gebäuden. Durch den Einsatz einer vergleichsweise niedrigen und damit zementärmeren Betondruckfestigkeitsklasse reduziert sich dieser Abstand bei Betrachtung des GWP-total in **Bild 6** allerdings signifikant. In den Rohdecken von G1 wurde ausschließlich die Betonfestigkeitsklasse C30/37 eingesetzt, während in den übrigen Deckensystemen, auch bedingt durch die Fertigteilbauweise, höhere Festigkeiten bis hin zu C50/60 eingesetzt wurden. Dennoch erreicht die Ortbetonflachdecke in G1 mit 92,4 kg CO₂-Äq./m² das größte GWP-total. Obgleich in G3 trotz erhöhter Nutzfläche am wenigsten Masse in den Decken verbaut wurde, ergibt sich ein höheres GWP-total als für die schwereren Decken in G2. Als signifikanter GWP-Treiber ist hierbei der Baustahl in den Decken von G3 zu nennen, während G2 vom Anteil an Brettschichtholz (BSH) in den Holz-Be-

ton-Verbunddecken profitiert. Im direkten Vergleich mit BSH emittiert der Baustahl bei nahezu identischer Masse mehr als das Siebenfache an CO₂-Äquivalenten.

4.2.3 Stützen

Die Analyse der Grauen Emissionen der Stützen (**Bild 7**) unterstreicht die ökologische Relevanz der Materialwahl. Trotz nahezu identischer Massen von jeweils circa 300 t in allen drei Modulen treten bei der Verwendung von Stahlstützen gravierende Unterschiede in der Bilanz auf. Die Stützen von G3 verursachen aufgrund des hohen Stahlanteils etwa das Fünffache der Grauen Emissionen im Vergleich zu den anderen Konstruktionsweisen. Die Ausbildung der Stützen in Ortbeton- bzw. teilweiser Holzbauweise in G1 und G2 führt mit rund 4 kg CO₂-Äq./m² zu einem insgesamt vernachlässigbaren Ergebnis für die Bauteilgruppe, wobei das durch Stützen verursachte GWP-total von 21,9 kg CO₂-Äq./m² auch bei Betrachtung des Gesamtgebäudes G3 eine relevante Position darstellt. Auch in diesem Vergleich wird deutlich, wie entscheidend die Wahl der Baustoffe ist und die Bilanzierung signifikant beeinflusst; auch welch großes Potenzial die Verwendung von „grünem“ Beton und Stahl hinsichtlich einer CO₂-Reduzierung haben.

4.2.4 Wände und Wanddämmung

Die vertikal abtragende Baustuktur wird neben den Stützen durch die Darstellung der Grauen Emissionen der Wände in **Bild 8** vervollständigt. G1 verzeichnet hierbei trotz zonierter Bauweise wegen der Verwendung hoher Betondruckfestigkeiten

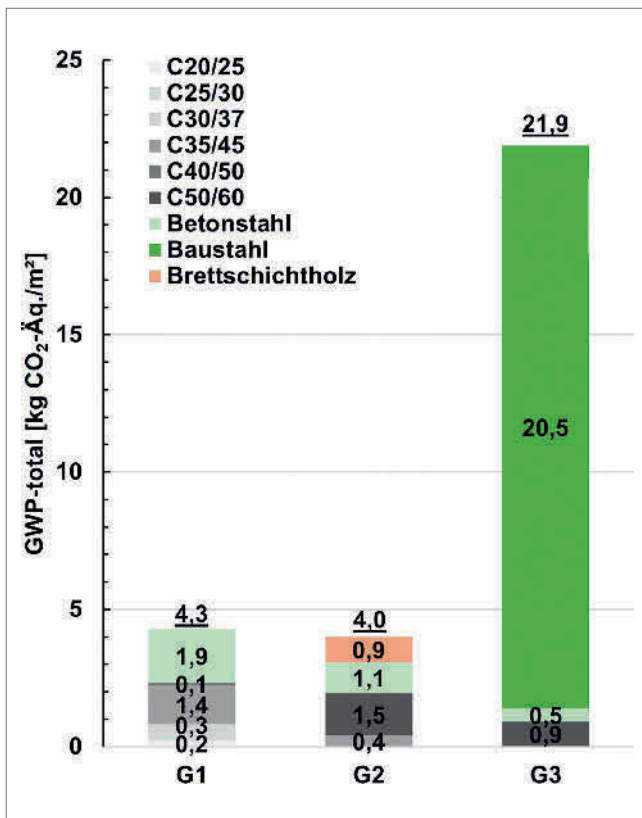


Bild 7. GWP-total der Stützen in den Gebäuden G1 bis G3, Bilanzierungs-szenario A-D Grafik: RPTU
 Fig. 7. GWP-total of columns in buildings G1 to G3, scenario A-D
 Source: RPTU

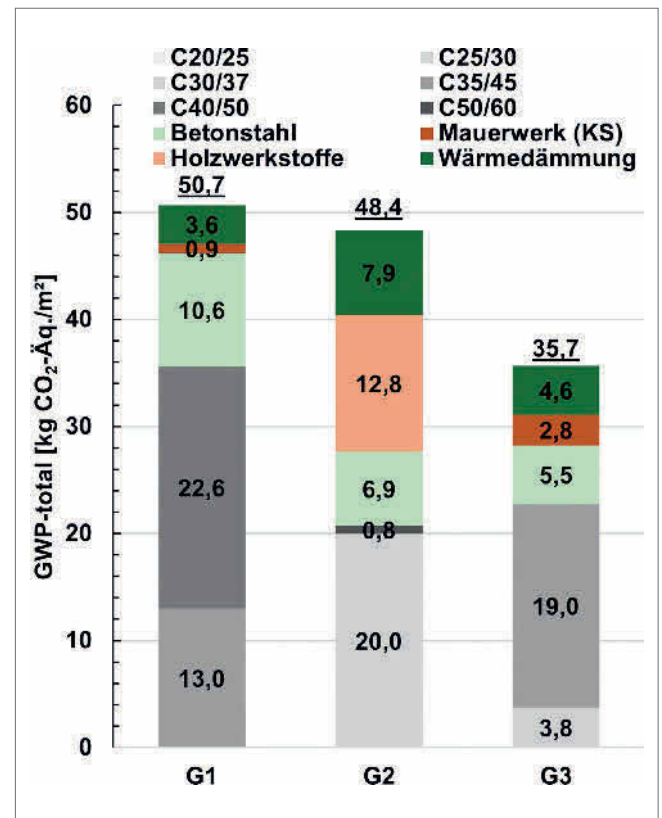


Bild 8. GWP-total der Wände inkl. Dämmung in den Gebäuden G1 bis G3, Bilanzierungsszenario A-D Grafik: RPTU
 Fig. 8. GWP-total of walls incl. insulation in buildings G1 to G3, scenario A-D Source: RPTU

mit 50,7 kg CO₂-Äq./m² das Maximum. Die überwiegend in Holzständerwandkonstruktion ausgeführten Wände von G2 ordnen sich mit 48,4 kg CO₂-Äq./m² ins Mittelfeld ein. Stahlbetonwände sind hier vor allem im Bereich der aussteifenden Gebäudekerne vorzufinden. In G3 kommen relativ wenige Stahlbetonwände aus nur mittleren Festigkeitsklassen vor, sodass sich mit 35,7 kg CO₂-Äq./m² das Minimum dieser Position ergibt. Möglicherweise konnte bei G3 der Umfang tragender Wände durch hohe Tragfähigkeiten der Stahlstützen reduziert werden.

Die Grauen Emissionen im Bereich der Wanddämmung variieren zwischen 3,6 und 7,9 kg CO₂-Äq./m². Wie Bild 8 verdeutlicht, markiert G2 hierbei den oberen Grenzwert. Die signifikante Abweichung von bis zu 211 % resultiert primär aus den grundverschiedenen Konstruktionsaufbauten. Während G1 und G3 ein konventionelles Wärmedämmverbundsystem (WDVS) mit einer reinen Außendämmung nutzen, kommt in G2 eine Holzständerbauweise zum Einsatz. Bei dieser wurde der Hohlraum der Tragstruktur zusätzlich zur äußeren Dämmschicht vollständig mit Dämmmaterial gefüllt. In Kombination mit teilweise gedämmten Innenbereichen führt dies in G2 zu einem deutlich höheren Materialeinsatz, was sich unmittelbar in der Ökobilanz widerspiegelt.

5 Bewertung und Empfehlungen

5.1 Konstruktionsweisen

Die detaillierte Analyse der Grauen Emissionen der drei untersuchten Bürobauten als Stahlbetonskelettbau, als Holz-Beton-Hy-

bridbau und als Stahlbetonsystembau ermöglicht eine fundierte Bewertung der ökologischen Vor- und Nachteile der verschiedenen Konstruktionsweisen. Bild 4 veranschaulicht die Unterschiede innerhalb der Szenarienbetrachtung.

Bemerkenswert ist, dass trotz unterschiedlicher Konstruktionsweisen, welche auf Materialien mit grundverschiedenem Treibhausgaspotenzial beruhen, die Gesamtergebnisse auf Gebäudeebene im Schwerpunktszenario A-D um weniger als 10 % voneinander abweichen. Die Größenordnung dieser Unterschiede ist angesichts der vorgefundenen Daten- und Modellierungsunsicherheiten als sehr gering einzustufen. Folglich kann in diesem Betrachtungsszenario keine der Konstruktionsweisen mehr als eine andere empfohlen werden, vielmehr kommt es darauf an, aus welchen spezifischen Materialvarianten die jeweilige Konstruktionsweise hergestellt wird und dass diese optimiert geplant und umgesetzt werden. Die verwendeten Materialien sowie die Tragwerksplanung sind hier von zentraler Bedeutung. Beispielsweise würde die Verwendung von Ökobetonen mit reduzierten Grauen Emissionen oder „green steel“ die Gesamtergebnisse mehr beeinflussen als die Konstruktionsweise selbst. Daher werden zukünftige Entwicklungen im Bereich der Ökobetonen auch darüber entscheiden, ob es aus Sicht der Grauen Emissionen vorteilhafter ist, Decken aus Ort beton mit tendenziell geringerer Festigkeit oder Decken als Betonfertigteilen mit Anforderungen an die Frühfestigkeit herzustellen. Jedoch ist zu beachten, dass die Betone in der Studie bedingt durch die Datengrundlage lediglich anhand der Druckfestigkeitsklassen und nicht in höherer Detaillierung nach Rezepturen oder Herstellverfahren unterschieden wurden und das

Bilanzierungsergebnis dies somit nicht differenziert abbilden kann.

5.2 Bedeutung der Systemgrenze in Abhängigkeit der Datensätze

Die größten Schwankungen sowohl je Gebäude als auch im Vergleich der Gebäude untereinander geht bei Mitbetrachtung der Szenarien A und A-C mit der Wahl der Bilanzgrenzen einher. Beispielsweise profitieren Holzwerkstoffe ökobilanziell stark von einer erheblichen Gutschrift durch angenommene Einsparungen anderer Energieträger in Lebenszyklusphase D, welche direkt aus der ökologisch zu hinterfragenden thermischen Verwertung in Phase C3 resultiert. Zum Bilanzierungszeitpunkt können Aussagen zur Materialverwertung in der zukünftigen Entsorgungsphase sowie deren Auswirkungen auf den Energiesektor jedoch nur reine Prognosen darstellen, während zur bereits abgeschlossenen Herstellungsphase eine breite Datengrundlage vorliegt. Dahingegen enthalten beispielsweise die generischen Datensätze, welche für die Bilanzierung der Betone zum Ansatz kamen, keine negativen GWP-Anteile zur Berücksichtigung der CO₂-Aufnahme im Zuge der Karbonatisierung.

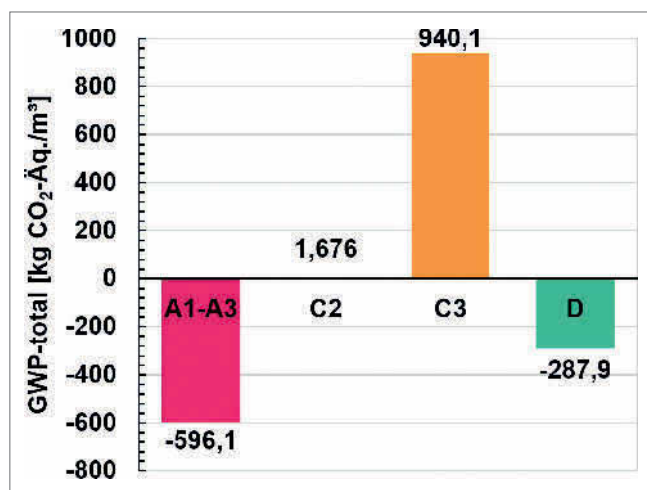


Bild 9. Gewählter generischer Datensatz für Brettschichtholz Grafik: [20]
Fig. 9. Selected generic data set for laminated timber Source: [20]

Bild 9 veranschaulicht, dass bei Aufsummieren aller verfügbaren Lebenszyklusphasen (A–D) lediglich rund 60 kg CO₂-Äq./m³ für Brettschichtholz anfallen, da sich die biogene Kohlenstoffspeicherung in A1–A3, das Freiwerden u.a. dieses Kohlenstoffs in der Entsorgungsphase C3 und die Gutschrift in Phase D nahezu vollständig ausgleichen. Berücksichtigt man nur A–C, wird lediglich die Gutschrift in D vernachlässigt und es fallen mehr als 340 kg CO₂-Äq./m³ an, was in etwa dem GWP-total eines m³ Beton C50/60 gleich kommt. Dessen GWP entstammt allerdings zu rund 95 % der Herstellungsphase A1–A3, wo sich beim Brettschichtholz ein negativer Wert ergibt, sodass auch Cradle to Site kein objektives Vergleichsszenario bei Vorkommen dieser beiden Materialien darstellt.

Ebenfalls ist eine Beeinflussung des Szenarienvergleichs durch die Wahl des Datensatzes für Betonstahl möglich. Der generische Datensatz [21] nimmt die Produktion im Elektrostahlwerk durch Einschmelzen von Schrott an, sodass bereits in der Herstellungsphase A1–A3 und nicht erst in Phase D im-

plizit eine Gutschrift durch Recycling des Rohmaterials enthalten ist [22].

5.3 Einfluss der Datensätze

Bezüglich der Vergleichbarkeit der Endergebnisse ist zudem die Unvollständigkeit der verwendeten Datensätze hervorzuheben; Bild 3 zeigt diese Lückenhaftigkeit auf. Problematisch an nicht vorhandenen Lebenszyklusdaten ist, dass diese in die Gesamtbilanz mit Null eingehen müssen, das Bilanzergebnis also limitieren und damit gegebenenfalls eine nicht zutreffende Einhaltung einer Benchmark herbeiführen könnten. Aufgrund der Verschiedenheit der eingesetzten Materialien und damit angesetzten Datensätzen für die unterschiedlichen Gebäude und Konstruktionsweisen kann sich die Unvollständigkeit der Datensätze bestimmter Materialgruppen ungleichmäßig auswirken. Dem wird entgegengewirkt, indem schwerpunktmäßig auf generische Datensätze, die einer Qualitätskontrolle unterliegen und die relevantesten Stoffströme abbilden müssen, zurückgegriffen wurde. Bezüglich dieses Datensatztyps ist erwähnenswert, dass in deren Modellierung Sicherheitszuschläge zwischen 10 % und 30 % vorgenommen werden. Im Hinblick auf den Indikator GWP-total betrifft dies die Anteile GWP-fossil und GWP-luluc, nicht aber den biogenen Anteil des GWP. Dieser Umstand hemmt die Vergleichbarkeit der Konstruktionsweisen bei Verwendung mineralischer, metallischer und hölzerner Baustoffe, deren GWP-Anteile grundverschieden in diesen Kategorien verteilt sind. Dennoch bietet der einheitliche Ansatz generischer Datensätze eine verbesserte Objektivität und erhöhte Transparenz gegenüber der Auswahl spezifischer Datensätze, die einen abweichenden Umfang an Lebenszyklusdaten enthalten und von Interessen der Hersteller an Repräsentation und Marktanteilen geprägt sein könnten. Darüber hinaus konnte in der Massenermittlung nicht jedem Bauelement das korrekte Produkt zugeordnet werden und eine Vielzahl von Produkten verfügten noch nicht über gültige EPDs.

Abschließend ist festzuhalten, dass der im Forschungsprojekt im Sinne der Vergleichbarkeit gewählte Ansatz generischer Datensätze für die emissionstreibenden Baustoffe Beton und Stahl zur Folge hat, dass auch keine positive Auswirkung der Nutzung von ökologischeren Materialalternativen wie „Ökobetonen“ oder „green steel“ im Bilanzergebnis abgebildet werden kann. Im konkreten Projekt ist dies allerdings sehr empfehlenswert, daher können die vorliegenden Ergebnisse von den tatsächlichen Werten der analysierten Gebäude unter Verwendung projektspezifischer Datensätze abweichen. Zugleich zeigen die erheblichen Anteile insbesondere von Beton und Bau- beziehungsweise Bewehrungsstahl an den Gesamtergebnissen Hebel zur Senkung der Grauen Emissionen durch Materialoptimierung auf. Diese Potenziale sollten gehoben werden und können sich stärker auswirken als die geringen Unterschiede, die in den vorliegenden Untersuchungen mit Fokus auf die Konstruktionsweise erzielt wurden.

5.4 Dokumentationsanforderungen

Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, ließ die Heterogenität der BIM-Modelle bezüglich Vollständigkeit der Attribuierung die Anwendung entsprechender Bilanzierungstools nur bedingt zu. Daher sollten zukünftig bereits im Zuge von Ausschreibung und Vergabe einheitliche Dokumentationsanforderungen gestellt werden, die eine lückenlose Durchführbarkeit der Massenbilanz und

damit der Ökobilanzierung gewährleisten. Angaben zu den verbauten Volumina, welche aus der Projektkalkulation vorhanden sein müssen, sollten strukturiert, vollständig und entsprechend der Ausführungsplanung abgelegt werden. Insbesondere im Kontext verschiedener Betonfestigkeitsklassen, welche mit steigenden Zementgehalten erhöhten Einfluss auf das Bilanzierungsergebnis des GWP-total nehmen, müssen BIM-Modelle vollständig und stringent attribuiert werden. Auch Bewehrungsgehalte von Stahlbetonbauteilen sollten prioritär hinterlegt werden.

Da die Abgrenzung von Bauteilgruppen in Abhängigkeit des Projekts und Untersuchungsziels variieren und von den in dieser Studie verwendeten Bilanzierungskategorien abweichen können, sollten Bauteile in BIM-Modellen zudem funktionellen Bauteilkategorien und Kostengruppen zugeordnet werden. Durch die Anwendbarkeit von Filtern können Bauteillisten effektiv und vollständig erstellt und direkt der Massenbilanz zugeführt werden. Die Ergänzung einer individuellen Bauteil-ID sowie die Attribuierung der zugehörigen Plannummer beugt Missverständnissen und damit Bilanzierungsfehlern vor.

Jedoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass in den verwendeten BIM-Modellen Attribuierungen vorhanden waren, die nicht vollständig abgerufen werden konnten. Hier gilt es, die Verwendung von Open BIM zu stärken, um die Kompatibilität der Modelle mit verschiedener Software zu verbessern. Da allerdings bereits bei verschiedenen Versionen derselben Software nach wenigen Jahren Kompatibilitätsprobleme offenkundig wurden, ist eine zusätzliche Dokumentation der wesentlichen Eigenschaften der relevantesten Bauteilgruppen, wie in Abschnitt 4 erläutert, außerhalb von Modelldateien zu empfehlen.

5.5 Empfehlungen zur Ausschreibung emissionseffizienter Gebäude

Im Vergleich der verschiedenen Konstruktionsweisen hat sich gezeigt, dass deren Auswirkungen auf das GWP-total des Gesamtgebäudes im Referenzszenario Cradle to Cradle gering sind. Dies impliziert, dass eine funktionelle Ausschreibung ohne Vorgabe einer vermeintlich ökologisch vorteilhaften Konstruktionsweise zielführend sein kann. Die vertragliche Festlegung einer GWP-Obergrenze, wie durch Siemens beim „Modul 8“ am SCE umgesetzt, motiviert alle Planenden und Ausführenden zu einer Optimierung der Grauen Emissionen bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit und liefert systemimmanent eine transparente, bilanzierungsgerechte Dokumentation der verbauten Massen und Volumina. Eine Beschränkung auf die Vorgabe des Zielwerts ohne Vorgaben zu den Konstruktionsweisen lässt dabei Raum für Optimierung in der Planung und Ausführung, die gesamtheitlich betrachtet und vergeben werden sollten und bei denen die Expertise aller Fachunternehmen genutzt werden sollte.

6 Fazit

Die vorliegende Veröffentlichung zeigt die Vorgehensweise und Ergebnisse der vergleichenden Bilanzierung der Grauen Emissionen dreier Büro Neubauten unterschiedlicher Konstruktionsweisen für verschiedene Bilanzierungsszenarien anhand überwiegend generischer Datensätze aus der Ökobaudat. Die Bilanzierungsergebnisse werden auf Gebäudeebene als auch für ausgewählte, relevante Bauteilgruppen gegenübergestellt und wissenschaftlich bewertet.

Als wesentliches Resultat der vergleichenden Studie konnte gezeigt werden, dass die äußerlich nahezu identischen drei Büro Neubauten in den unterschiedlichen Konstruktionsweisen Stahlbetonskelettbau, Holz-Beton-Hybridbau und Stahlbetonsystembau im Referenzszenario A-D keine signifikant verschiedenen Graue Emissionen aufweisen. Vielmehr entscheidend sind die verwendeten Materialmengen, -arten und -güten, dabei stellen Beton und Bau- bzw. Bewehrungsstahl aufgrund ihres großen Anteils am Gesamtergebnis auf Gebäudeebene aller drei Konstruktionsweisen den wesentlichen Hebel zur Senkung der Grauen Emissionen dar. Dies unterstreicht die Bedeutung der ressourcenoptimierten Tragwerksplanung mit effizienten Systemen sowie die Weiterentwicklung emissionsärmerer, ökologischerer Baustoffrezepturen oder Herstellungsverfahren [23, 24]. Im Sinne der Nutzung der Potenziale zur Reduktion der Grauen Emissionen sind daher funktionale Wettbewerbe und Ausschreibungen mit Vorgabe von GWP-Obergrenzen oder -Zielen zur tragwerksplanerischen Optimierung anstelle der Vorgabe bestimmter Konstruktionsweisen zu bevorzugen. Dabei sind spezifische Dokumentationsanforderungen zur transparenten Bilanzierung und dem Nachweis der Grauen Emissionen einzuhalten.

Entsprechend bisheriger Forschung und Erfahrungen kann auch bei allen drei analysierten Beispielgebäuden der Bauteilgruppe der Rohdecken das absolut größte GWP-total zugeordnet werden; ihr Anteil liegt im Bereich von 20 %-33 % der Gesamtbilanz. Dabei ist bemerkenswert, dass auch dem Bodenaufbau aus Estrichen und Hohlbodensystemen ein vergleichsweise bedeutender Anteil an Grauen Emissionen zugerechnet werden kann. Zusammenfassend zeigt sich, dass bereits mit den marktverfügbaren Baustoffen und Konstruktionsweisen großes Potenzial zur Senkung der Grauen Emissionen genutzt werden kann, sofern entsprechende Anreizmechanismen gesetzt werden.

DANKSAGUNG

Abschließend möchten die Autor:innen der Siemens Real Estate für das Interesse und die Mitwirkung an den Untersuchungen sowie die finanzielle Förderung des gemeinsamen Projekts danken.

LITERATUR

- [1] Siemens Real Estate: Sustainability Standard – for Development, Construction & Major Renovation Projects. (Internes Dokument). Siemens AG, 2023.
- [2] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie Treibhausgas-reduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton. Ausgabe August 2024.
- [3] Krause, K.; Hartmann, C.; Hafner, A.: Eine Ökobilanz, viele Ergebnisse – Ergebnis und Vergleich der Ökobilanz desselben Einfamilienhauses durch verschiedene Bearbeitende. In: Bauingenieur 100 (2025), Heft 11, S. 326-336. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-11-56.
- [4] Zitterl, T.; Bauer, P.: Ökologische Optimierung von Tragwerken im Infrastrukturbau am Beispiel von Brücken und Portalkonstruktionen. In: Bauingenieur 99 (2024), Heft 10, S. 317-326. doi.org/10.37544/0005-6650-2024-10-53.
- [5] Hoppe, J.; Sanio, D.; Hormel, A. et al.: CO₂-Bilanzierung bei Straßenbrücken – Ein Bewertungsansatz für die Planungsphase von Baumaßnahmen. In: Bauingenieur 99 (2024), Heft 11, S. 354-365. doi.org/10.37544/0005-6650-2024-11-40.

- [6] Görtz, S.; Bardenhewer, E.K.; Volkenhoff, T. et al.: CO₂-Emissionen von Infrastrukturprojekten im Straßenbau. In: Bauingenieur 100 (2025), Heft 03, S. 62-72. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-03-56.
- [7] Siemens AG: Siemens Campus in Erlangen, 2025, <https://press.siemens.com/de/de/feature/siemens-campus-erlangen> [Zugriff am: 20.02.2026].
- [8] Weidner, S.; Mrzigod, A.; Bechmann, R. et al.: Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien. In: Beton- und Stahlbetonbau 116 (2021), Heft 12, S. 969-977. doi.org/10.1002/best.202100065.
- [9] Heckmann, M.; Glock, C.: Ökobilanz im Bauwesen – Treibhausgasemissionen praxisüblicher Deckensysteme. In: Beton- und Stahlbetonbau 118 (2023), Heft 2, S. 110-123. doi.org/10.1002/best.202200102.
- [10] Heckmann, M.; Glock, C.: Graue Emissionen von Hochbaudeckensystemen – Praxis-Umfrage und Hintergründe zur neuen DAfStb-Richtlinie. In: Beton- und Stahlbetonbau 120 (2025), Heft 1, S. 22-32. doi.org/10.1002/best.202400076.
- [11] Haist, M.; Glock, C.; Wiens, U. et al.: Die neue DAfStb-Richtlinie „Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton“ – Meilenstein für den Klimaschutz. In: Beton- und Stahlbetonbau 120 (2025), Heft 1, S. 55-59. doi.org/10.1002/best.202400090.
- [12] DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020. Ausgabe Februar 2021.
- [13] DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020. Ausgabe Februar 2021.
- [14] Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC Sixth Assessment Report – Chapter 7: The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021, www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-7/ [Zugriff am: 27.02.2026].
- [15] DIN EN 15804: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021. Ausgabe März 2022.
- [16] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Ökobaumat, www.oekobaumat.de/ [Zugriff am: 24.09.2024].
- [17] Figl, H.; Kusche, O.: Ökobaumat-Handbuch – Technisch/formale Informationen und Regeln zur Ökobaumat-Datenbank. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Berlin, Wien, Freiburg, 2.1 Ausgabe 2023.
- [18] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Ökobaumat Datenlieferanten, www.oekobaumat.de/anleitungen/datenlieferanten.html [Zugriff am: 20.02.2026].
- [19] Heckmann, M.: Entwicklung eines Benchmarksystems für die Grauen Emissionen von Deckensystemen, DIN Media GmbH; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Dissertation.
- [20] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Ökobaumat – Prozess-Datensatz: Brettschichtholz Nadelholz (generisch), https://oekobaumat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=c816b036-6bdf-48e5-8ef8-a76d7872f589&version=20.23.050&stock=OBD_2023_1&lang=de [Zugriff am: 26.02.2026].
- [21] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Ökobaumat – Prozess-Datensatz: Bewehrungsstahl (generisch), https://oekobaumat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dd3&version=20.23.050&stock=OBD_2023_1&lang=de.
- [22] Bielak, J.; Ros, H.; Hiester, M.: Ressourceneffiziente Gebäudehülle durch nichtmetallisch bewehrte Sandwichfassaden – Von der Forschung zum Pilotprojekt. In: Bauingenieur 101 (2026), Heft 03, S. 41-51. doi.org/10.37544/0005-6650-2026-06.
- [23] Bayer, D.; Berns, K.; Carrigan, S. et al.: Building the Future – an interdisciplinary research initiative/Bauen der Zukunft – eine interdisziplinäre Forschungsinitiative. In: Bauingenieur 100 (2025), Heft 10, E 1-E 10. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-10-41.
- [24] Hegger, J.; Glock, C.; Curbach, M. et al.: Innovativer Betonbau – Tradition und Zukunft. In: Bauingenieur 100 (2025), 07-08, S. 181-195. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-07-08-15.

Rebecca Müller, M.Sc.

rebecca.mueller@rptu.de

Aaron Dernbach, M.Sc.

aaron.dernbach@rptu.de

Daniel Jochum, M.Sc.

daniel.jochum@rptu.de

Erik Wagner, M.Eng.

erik.wagner@rptu.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Christian Glock

christian.glock@rptu.de

Rheinland-Pfälzische Technische Universität
Kaiserslautern-Landau
Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion
Paul-Ehrlich-Straße 14, 67663 Kaiserslautern

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)



Scientific Environmental Assessment of Three Office Building Construction Methods Based on Embodied Emissions: A Project Case Study

R. Müller, A. Dernbach, D. Jochum, E. Wagner, C. Glock

ABSTRACT At the Siemens Campus in Erlangen, new office buildings of equivalent architecture, cubature and purpose but differing structural systems were constructed. This provided a unique opportunity for systematic life cycle assessment (LCA) comparing structural systems with regard to embodied carbon. For this purpose, a research project conducted jointly by Siemens Real Estate (SRE) and the University of Kaiserslautern-Landau (RPTU) carried out a detailed LCA of three realised reference buildings: a reinforced concrete frame construction, a timber-concrete hybrid construction and a systemized reinforced concrete construction. The assessment was based on the total Global Warming Potential (GWP-total). The comparison of embodied carbon covered the assessment scenarios Cradle to Site, Cradle to Grave and Cradle to Cradle. At building level, the analysis focused on the structural design of the load-bearing system and the directly associated construction elements. Notably, in the Cradle to Cradle reference scenario, the embodied carbon of the entire building differed by less than 10 % between the three structural systems. In contrast, the Cradle to Grave scenario clearly illustrates the effects of the choice of life cycle stages in LCA involving timber building material. In addition to floor slabs, walls, foundations, windows and roof structures, floor build-up was identified as an emission-intensive component group. Based on the assessment, robust and practice-oriented findings and recommendations were derived regarding the selection of structural systems, procurement methods, and documentation requirements for low-emission construction.

KEYWORDS

Reinforced concrete, Greenhouse gas emissions, Embodied emissions, Life cycle assessment

Wissenschaftlich-ökologische Bewertung dreier Konstruktionsweisen für Bürobauten anhand Grauer Emissionen am Projektbeispiel

ZUSAMMENFASSUNG Am Siemens Campus Erlangen wurden Büroneubauten von äquivalenter Architektur, Kubatur und Nutzung aber unterschiedlicher Konstruktionsweisen des Tragwerks errichtet. Diese bieten die einmalige Chance der systematischen vergleichenden ökologischen Bewertung der Konstruktionsweisen hinsichtlich der Grauen Emissionen. Zu diesem Zweck wurde in einem Forschungsprojekt zwischen der Siemens Real Estate (SRE) und der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU) jeweils ein realisiertes Referenzgebäude als Stahlbetonskelettbau, als Holz-Beton-Hybridbau und als Stahlbetonsystembau detailliert in einer Ökobilanzierung anhand des Indikators GWP-total analysiert. Der Vergleich der Grauen Emissionen umfasste die Bilanzierungsszenarien Cradle to Site, Cradle to Grave und Cradle to Cradle. Auf Gebäudeebene lag der Schwerpunkt der Untersuchungen auf der konstruktiven Durchbildung des Tragwerks sowie der direkt zugehörigen Ausbauelemente. Bemerkenswert ist, dass sich die Grauen Emissionen auf Gebäudeebene im Referenzszenario Cradle to Cradle zwischen den drei unterschiedlichen Konstruktionsweisen um weniger als 10 % unterscheiden. Im Szenario Cradle to Grave werden im Kontrast dazu die Effekte der Wahl der Systemgrenzen bei Ökobilanzierung mit Holzbaustoffen deutlich. Neben den Rohdecken, Wänden, Fundamenten, Fenstern und dem Dachaus- und -aufbau zeigten sich auch die Bodenaufbauten als emissionsintensive Bauteilgruppe. Auf Basis der Auswertungen konnten fundierte und praxisrelevante Ergebnisse und Empfehlungen zur Wahl der Konstruktionsweise, aber auch zu Vergabe- und Dokumentationsanforderungen zum emissionsreduzierten Bauen abgeleitet werden.

1 Introduction

Siemens company is pursuing its self-imposed goal of greenhouse gas neutrality by the year 2030. Consequently, SRE has established a sustainability guideline for its own buildings, defining various Key Performance Indicators (KPIs) and target values [1]. Under the KPI „Embodied Carbon“, SRE specifies a maximum target value of 300 kg CO₂-eq./m²NFA (Net Floor Area) for the entire building in development and construction

projects, as well as extensive renovations. In comparison, the DAfStb guideline „Greenhouse gas-reduced structures made of concrete, reinforced concrete, or prestressed concrete“ [2] cites a reference value of 320 kg CO₂-eq./m²GFA (Gross Floor Area) for office and non-residential buildings. However, this value refers exclusively to the load-bearing structure.

In a joint research project between SRE and the Institute of Concrete Structures and Structural Design at RPTU, a comparative LCA study was conducted between January and



Fig. 1. „Modules“ and analyzed buildings G1 to G3 at Siemens Campus Erlangen Source: Siemens Real Estate, edited
Bild 1. „Module“ und untersuchte Gebäude G1 bis G3 am Siemens Campus Erlangen Foto: Siemens Real Estate, bearbeitet

September 2024 for three office properties, focusing on embodied emissions. The buildings examined were constructed at the Siemens Campus Erlangen within the last decade (2016 to 2025) and feature identical external architecture, cubature, and use, as well as the same client. This offers an extraordinary opportunity to compare the embodied carbon of different structural systems in real construction projects that account for all structural requirements beyond load-bearing capacity and serviceability, alongside specific operational and functional criteria. The typical variables of architecture and building utilisation, which often complicate the comparison of buildings and infrastructure projects [3-6], are eliminated due to this unique constellation.

2 Project Presentation

2.1 Siemens Campus Erlangen

With the start of construction in 2016, Siemens initiated a comprehensive redevelopment of the Siemens area in Erlangen. Through the 2030s, an open and vibrant district known as the Siemens Campus Erlangen (SCE) is being developed across a total area of over 54 ha with an investment volume of one billion euros [7]. The three buildings examined were realised by different general contractors in various construction phases. These construction phases are referred to as „Modules“. The campus redevelopment is subdivided into 8 „Modules“ within a master plan and is subject to the sustainability requirements defined in internal guidelines [1]. Going beyond the mere reuse of materials, the new contractual provisions establish a paradigm shift in the construction industry. For the first time, target values have been defined by the client side, and for „module 8“, contractually binding CO₂ emission targets regarding embodied carbon have even been agreed upon for the execution of the construction project.

Following the chronological order, Max Bögl began with „Module 1“ in 2016, which was completed in 2020. At the same time, structural construction for „Module 2“ began by Zech Bau and reached completion in 2022. „Module 8“ was constructed by Goldbeck from 2024 to the end of 2025 and was therefore still

under construction during the life cycle assessment study. Despite nearly identical architectural boundary conditions, the buildings examined in the three „Modules“ differ fundamentally in their construction methods.

2.2 Research project on the comparative life cycle assessment (LCA)

The sole variation in the construction methods of the buildings at SCE makes it possible to evaluate and visualize structural differences independently of the architecture for the first time. For the LCA of the three selected exemplary buildings, RPTU worked in close coordination with SRE. The focus of the investigations is the scientific evaluation of the construction methods, aiming to identify emission-reducing optimization potentials and providing recommendations.

The scope of investigation for the joint research project, as well as this publication, is limited to „Modules“ 1, 2, and 8 of the SCE. From each „Module“ one building was assessed. Due to the conceptual overlap with the term „module“ used in life cycle assessments, the investigated structures are hereinafter referred to as building 1, 2, and 3 (G1, G2, G3). G1 and G2 refer to the buildings from the „modules“ of the same number, while G3 refers to the building from „Module 8“. **Figure 1** shows the location of the „Modules“ and the investigated buildings G1 to G3 at the Siemens Campus Erlangen.

To properly contextualize the LCA methodology and the resulting findings, the key parameters as well as the structural differences of G1, G2, and G3 are presented in **Table 1** and Section 2.3. For a simplified overview, the differences in the construction methods of G1 to G3 are presented via a schematic representation of the standard floor plans and cross-sections of the floor slab systems (**Figure 2**). In multi-story buildings, these slab systems account for the majority of structural emissions at approximately 40 % [8] and are consequently of high relevance for LCA and cross-building comparisons [9-11].

2.3 Construction methods

2.3.1 G1: Reinforced concrete skeleton construction

For G1, the load-bearing structure was designed as a reinforced concrete skeleton construction. The building erected by Max Bögl is characterised by in-situ concrete flat slabs. These were designed with non-prestressed reinforcement, a concrete compressive strength class of C30/37, and a thickness of 24 cm. The construction of the reinforced concrete flat slabs consumed 3 100 m³ of concrete.

2.3.2 G2: Timber-concrete hybrid construction

G2, erected by Zech Bau, is characterised by a timber-concrete composite (TCC) ribbed floor system and a timber frame wall structure which is partially prefabricated. The concrete compressive strength classes vary between C30/37, C40/50, and C50/60. Within the commercial Cree slab system, which utilises TCC technology, reinforced concrete slabs with a thickness of 13 cm are connected to glued laminated timber beams with a grade of GL 28c. The columns are arranged in a single row. In total, approximately 2 170 m³ of concrete were installed in the floor system of G2.



Table 1. Design and material used in G1 to G3

Tabelle 1. Konstruktionsweise und Materialeinsatz bei G1 bis G3

	Reinforced concrete skeleton construction (G1)	Timber-concrete hybrid construction (G2)	Systemized reinforced concrete construction (G3)
Structural floor slabs	Reinforced concrete flat slab $h = 24$ cm. Uniform slab cross-section throughout the building. 7 500 t concrete (C30/37), 430 t reinforcement.	Cree ceiling elements (TTC) $h_{ges} = 40$ cm, $h_c = 13$ cm, $h_t = 30$ cm. ceiling cross-section varies throughout the building. 5 200 t concrete (C40/50), 290 t timber (GL 28c) and 360 t reinforcement.	Flat and ribbed slabs, $h_{rib} = 25$ or 32,5 cm, $h_{plate} = 10$ cm. Partially prestressed. Slabs supported on steel-profile beams. 4 800 t concrete (C40/50), 280 t reinforcement and 250 t steel beams
Floor build-ups	10 500 m ² hollow floors; 430 m ³ cement and calcium sulphate (CAF) screed; finishings: carpet, linoleum and tiles.	10 900 m ² hollow floors; 358 m ³ cement and CAF screed; finishings: carpet, linoleum, and tiles.	12 930 m ² hollow floors; 1 900 m ² cement and CAF screed; finishings: carpet, linoleum, and tiles; bituminous waterproofing
Columns	273 reinforced concrete columns (C20/25 – C40/50); strength decreases with increasing floor height. 250 t concrete.	172 reinforced concrete columns (C35/45 or C50/60) as well as 94 timber columns (GL25h).	103 reinforced concrete columns (C50/60), 480 interior steel columns, and 337 steel columns for the outer wall connection. 100 t concrete and 200 t steel profiles. Fire protection cladding is included for the steel columns.
Walls	Precast exterior and interior walls, supplemented by occasional cast-in-place concrete walls. Parapet as semi-precast element (double wall). Occasional sand-lime brick masonry walls in the basement. Strength classes C35/45 and C40/50. 3 600 t concrete.	501 t Cree timber wall elements (cement-bonded particle boards, solid structural timber (KVH), glued laminated timber (BSH), OSB3) as well as 2 400 t reinforced concrete walls in the bracing areas of the stairwells with strength classes C30/37 and C50/60.	Walls predominantly built using system construction. For exterior walls, precast elements are supplemented with steel columns. Total 2 760 t concrete (C30/37 and C35/45) as well as 230 t sand-lime brick masonry.
Wall insulation	Pure exterior insulation on solid walls as part of the Alucobond facade (exterior view) & ETICS (courtyard facade). Mineral fibre insulation 16-18 cm.	Cree wall elements (timber frame construction) filled with insulation material, additional insulation layer on the inner wall surface. ETICS on the exterior (courtyard area).	8 cm mineral wool insulation of the exterior facade cassettes. Cassette insulation also facing the courtyard (no ETICS).
Foundations	Block & beam foundations, floor trenches & floor slabs. Foundations under ground floor C30/37 and under basement C35/45. 3 000 t concrete. Perimeter insulation against soil made of XPS.	Predominantly strip foundations of strength classes C30/37, C35/45, and C40/50. 4 000 t concrete. Perimeter insulation against soil made of XPS.	Single and strip foundations made of concrete strength class C25/30. 2 000 t concrete. Perimeter insulation against soil made of XPS.
Stairs	145 t concrete C40/50.	145 t concrete C30/37.	225 t concrete C35/45.
Windows	2 500 m ² window area.	1 935 m ² window area.	2 220 m ² window area.
Facade surfaces	3 100 m ² aluminium composite panels & 1 300 m ² ETICS surface (excluding exterior wall insulation).	3 200 m ² aluminium composite panels and 1 300 m ² ETICS surface.	5 350 m ² aluminium composite panels (uniform facade, no ETICS).
Suspended ceilings	Bulkheads, partially suspended ceilings and ceiling sails with acoustic and cooling functions.	Bulkheads, partially suspended ceilings and ceiling sails, linear grid ceilings, mineral fibre boards, gypsum plasterboard (GK), and moisture-resistant boards.	Mineral fibre ceiling tiles, gypsum plasterboard, or perforated gypsum plasterboard. Additional, perforated metal grid ceilings on the ground floor.
Roof build-ups	Green roof (mineral wool, sealing & welding membranes, filter fleece, round gravel 16/32, single-layer substrate, cellular glass, PVC foil, drainage mats), roof structures for housing MEP made of steel profiles.	Green roof (analogous to G1), roof structures for housing MEP made of steel profiles.	Green roof build-up (analogous to G1), roof structures for MEP made of steel profiles and trapezoidal sheeting.

2.3.3 G3: Systemized reinforced concrete construction

The construction of G3 is characterised by a systemized and partially prefabricated construction method applied by Goldbeck,

featuring partially prestressed reinforced concrete flat as well as ribbed slab systems with integrated steel beams and steel columns. The concrete compressive strength classes vary between

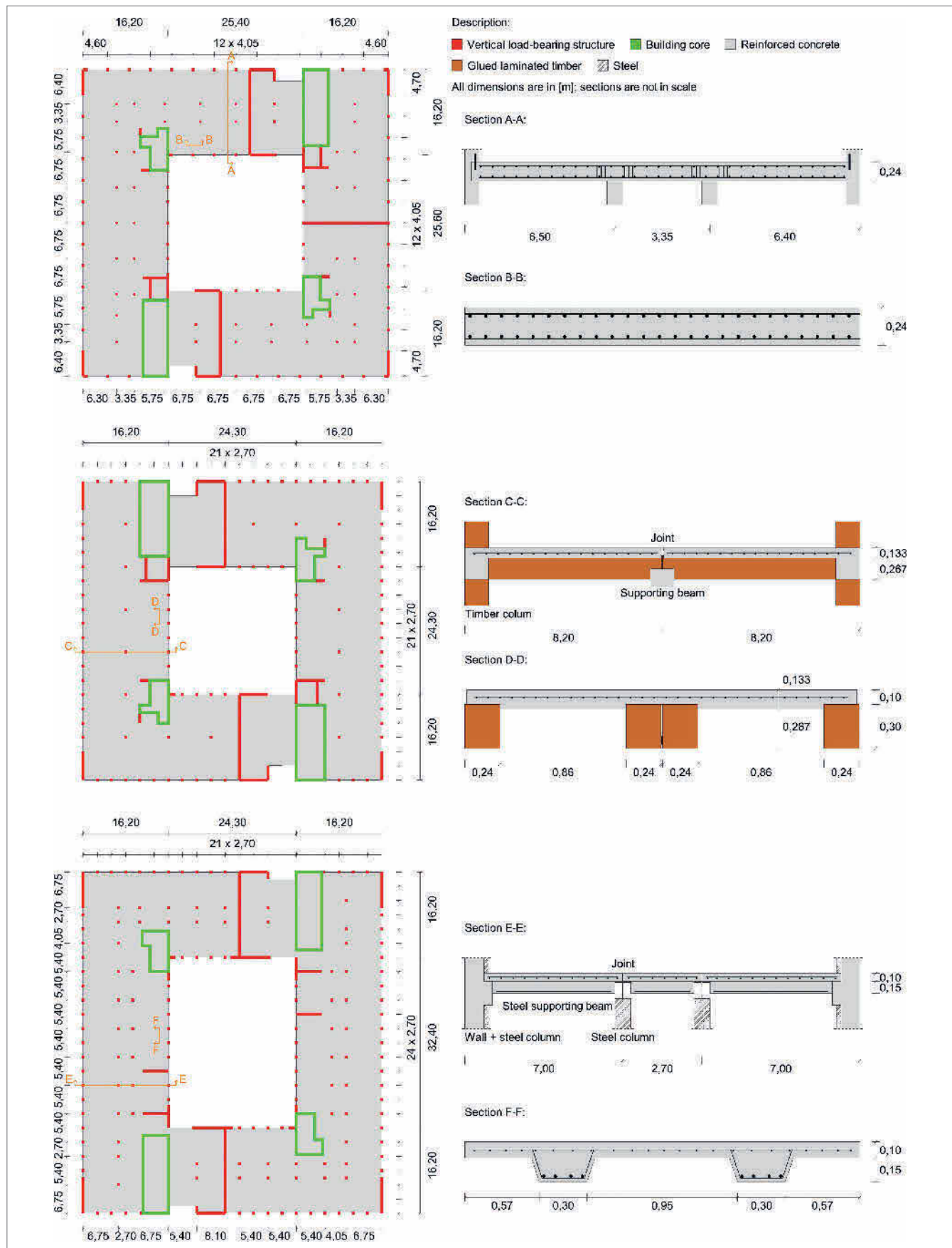


Fig. 2. Schematic floor plans and sections of buildings G1 (top), G2 (middle) and G3 (bottom) *Source: RPTU*
Bild 2. Grundrisse und Schnitte der Gebäude G1 (oben), G2 (Mitte) und G3 (unten) schematisch *Grafik: RPTU*

C35/45, C40/50, and C50/60. A total of approximately 2 000 m³ of concrete was used in the floor system.

3 Life cycle assessment (LCA) of embodied emissions

3.1 Research Objective of the LCA

The LCA of the three buildings G1 to G3 was conducted in accordance with the principles and requirements of DIN EN ISO 14040 [12] and DIN EN ISO 14044 [13]. As the primary objective of the assessment, embodied emissions were considered the most significant variable concerning climate compatibility [14]. In the context of the presented study and following [8], embodied emissions are defined as the greenhouse gas emissions resulting from the production, construction, and end-of-life stages of the buildings, excluding their operation phase, and are expressed in CO₂ equivalents (CO₂-eq.). This facilitated an evaluation of buildings G1 to G3 against the „Embodied Carbon“ KPI established by SRE [1].

The LCA of the embodied emissions was carried out using the indicator Global Warming Potential (GWP-total), calculated as the sum of fossil and biogenic GWP, as well as GWP from land use and land use change (GWP-luluc). The evaluation of the LCA aimed to identify the most relevant GWP drivers both across the individual building elements and between the different construction methods. This facilitates the derivation of both construction-specific and material-specific recommendations for SRE as the client, aiming to further reduce the embodied emissions of future office properties and evaluate the effectiveness of the associated KPIs.

3.2 Definition of the scope of the LCA

3.2.1 Investigated building elements

The scope of investigation initially encompassed a comprehensive LCA of all building elements across the three buildings. However, limitations arose due to the availability of reliable data. To ensure valid results and a meaningful comparison between the buildings, the focus was placed on the structural building shell, with only selected interior fit-out elements directly connected to the primary structure. The LCA of mechanical, electrical, and plumbing systems (MEP) was omitted, as these were not directly related to the structural design of the compared buildings. Furthermore, it was necessary to ensure that the overall building comparison was not distorted by the MEP sector, which was at times only limitedly comparable.

For a detailed breakdown, the building elements were subdivided into eleven sub-elements that were consistently assessed across all buildings, including the structural floor slabs, floor build-ups, columns, walls and wall insulation, foundations, stairs, facade surfaces, windows, suspended ceilings, and roof build-ups. The structural floor slabs encompassed all load-bearing slabs, including associated beams or ribs, as well as the roof slab that form the upper boundary of the building envelope. Consequently, the roof build-up category included the waterproofing, insulation, and fill on top of this slab, as well as the steel-frame enclosures for roof-mounted MEP equipment. Under the foundations category, both isolated and strip foundations as well as floor slabs, including insulation against the ground, were accounted for. Wall insulation comprised all

vertically arranged insulation on or within wall cross-sections, including insulation in external thermal insulation composite systems (ETICS), the other components of which were subsumed under facade surfaces along with the aluminium panels. Since G2 utilizes timber frame walls where insulation is partially located within the wall cross-section, the direct assignment of additional external wall insulation to the facade was deemed inappropriate for the purpose of comparing construction methods. The floor finishes category included all screeds and floor coverings above the structural slabs or base plates.

3.2.2 Assumed service lives of building elements and life cycle stages

Due to the complexity of assessing multi-layered assemblies, a deliberate decision was made to omit the material-specific replacement cycles during the building life cycle. In line with the objective of this study, the focus was placed strictly on the construction methods of the new buildings and their associated embodied emissions. However, the overall LCA results may vary if component replacements are accounted for.

All LCA calculations regarding GWP-total were performed for each of the following assessment scenarios according to [15] for a reference service life of 50 years: Cradle to Site (life cycle stages A), Cradle to Grave (life cycle stages A-C), and Cradle to Cradle (life cycle stages A-D).

3.2.3 Used datasets

Generic datasets from “Ökobaumat (Version 2023)” were applied, particularly for the LCA of the structural materials like concrete, reinforcing steel, various timber products, and structural steel [16]. These generic datasets, which are derived from theoretical modelling rather than direct industry data, include safety margins between 10 % and 30 % for the GWP components GWP-fossil and GWP-luluc due to modelling uncertainty and varying levels of completeness [17]. Average and representative datasets were only utilized in cases where no alternatives were available. Specific manufacturer datasets were used partially only for interior fit-out materials and specific construction products installed for specialized functions, for example acoustic ceiling sails with cooling functions. For the comparison of construction methods across the three assessed buildings, it is essential to use datasets that are equally representative of widely used materials. Otherwise, the comparative analysis and the validity of the scientific evaluation could be compromised by manufacturer-specific datasets. The assessment of the windows was simplified by applying the manufacturer-specific dataset of the windows installed in G1 to the window areas of the other buildings, as no corresponding datasets were available for the other products. Given the relevance of concrete to the overall LCA results, it should be noted that the determined concrete volumes were differentiated solely based on the specified concrete compressive strength class. Further information regarding concrete mix designs, especially the types of cement used, or the application of recycled aggregate concrete (RC concrete) was not available. Due to a lack of availability in “Ökobaumat”, the datasets for concrete strength classes C35/45, C40/50, and C45/55 were derived through interpolation between the datasets of the other strength classes.

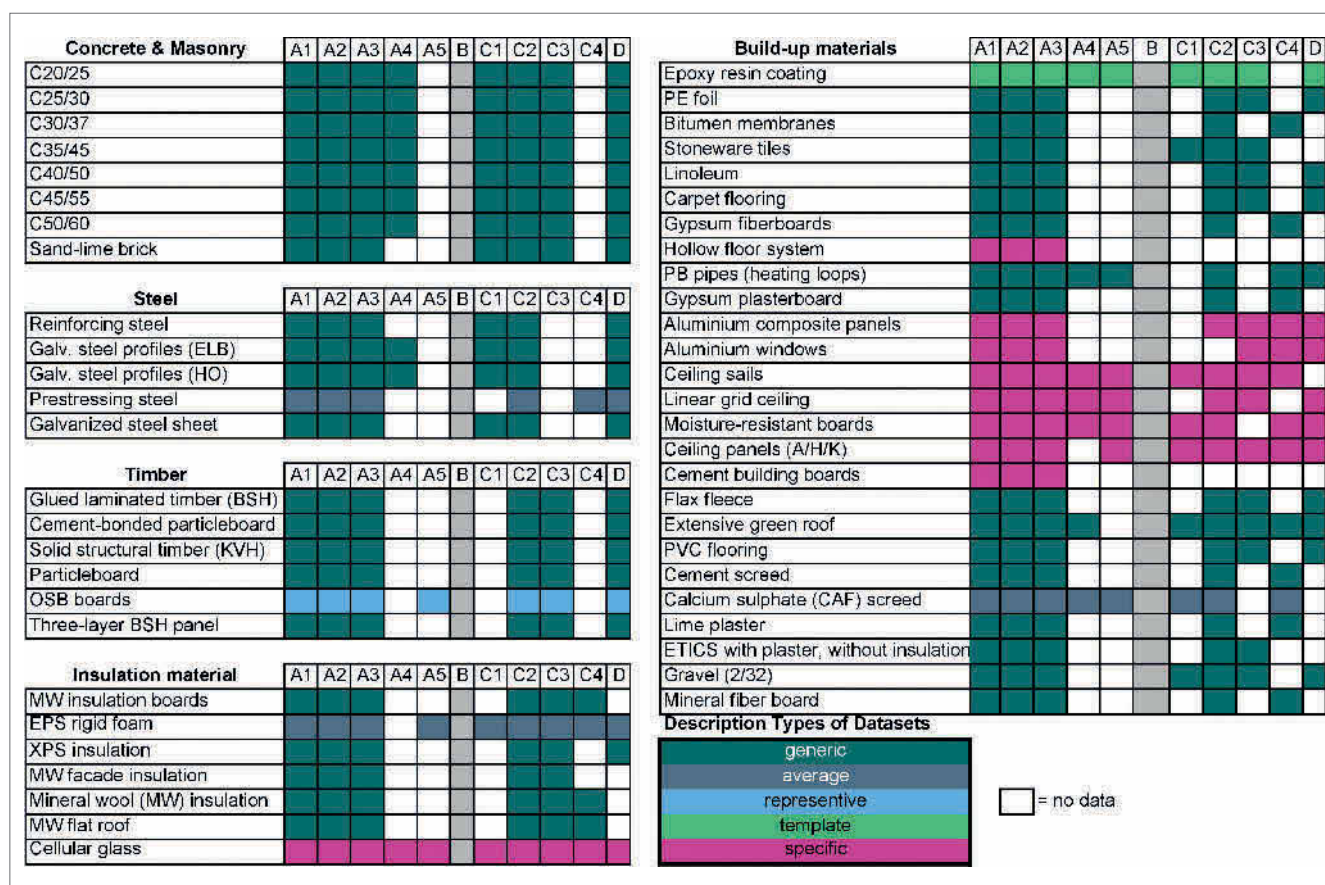


Fig. 3. Qualitative overview of the types of data sets used and the life cycle data contained Source: RPTU

Bild 3. Qualitative Übersicht der Typen verwendeter Datensätze und enthaltener Lebenszyklusdaten Grafik: RPTU

This accounts for the positive correlation between the cement content and the concrete compressive strength.

Since the generic datasets for “Ökobaudat” are commissioned by the BBSR and provided by the same supplier [18], a controlled and uniform quality of the datasets can be assumed as a basis for comparison. Furthermore, the generic datasets feature a consistent modular structure regarding the life cycle stages. However, data availability varies across the individual datasets with respect to the reported modules. Only the production modules A1–A3 are consistently available across all datasets. This variation, as well as the distribution of dataset types, is illustrated in **Figure 3**. Consequently, assessment scenario A possesses a higher degree of explanatory power compared to scenarios A-C and A-D.

3.3 LCA execution

In the interest of maximum transparency, both the LCA and the following investigations were meticulously carried out manually in MS Excel. Specialized LCA software was deliberately not used. This was intended to guarantee the complete traceability of all calculation steps and results. Furthermore, the available BIM models of the three assessed buildings differed significantly in their level of development and detail, and completeness of attribution (LOD), meaning that the LCA had to be performed manually while continuously aligning the system boundaries.

The primary basis for the quantity take-off consisted of the planning and design documents. Where BIM models exhibited

adequate data fidelity, they served to supplement the assessment through automated quantity take-off and the application of filters for structurally complex elements such as foundations. The determined masses were continuously verified for plausibility against the net floor area of the buildings through cross-building comparisons, and consultations with specialists from SRE. In isolated cases, well-founded assumptions had to be made regarding material grades, particularly concrete strength classes as well as design variants or planning stages.

When comparing masses or volumes, it must be noted that G3 has a 14 % larger net floor area due to a slightly differing gross ground area. In subsequent comparisons at the level of GWP per square meter, this difference is normalized relative to G1 and G2.

4 Results of the LCA

4.1 Building Comparison

The following results show the quantitative comparison of embodied emissions per square meter (m^2) of net floor area, based on the GWP-total indicator and considering the defined system boundaries. For this research project, the reference area was specified in accordance with the SRE guideline [1], which deviates from the DAfStb guideline [2]. The overall building comparison in **Figure 4** encompasses all assessed component groups and differentiates between the assessment scenarios Cradle to Site (A), Cradle to Grave (A-C), and Cradle to Cradle (A-D).

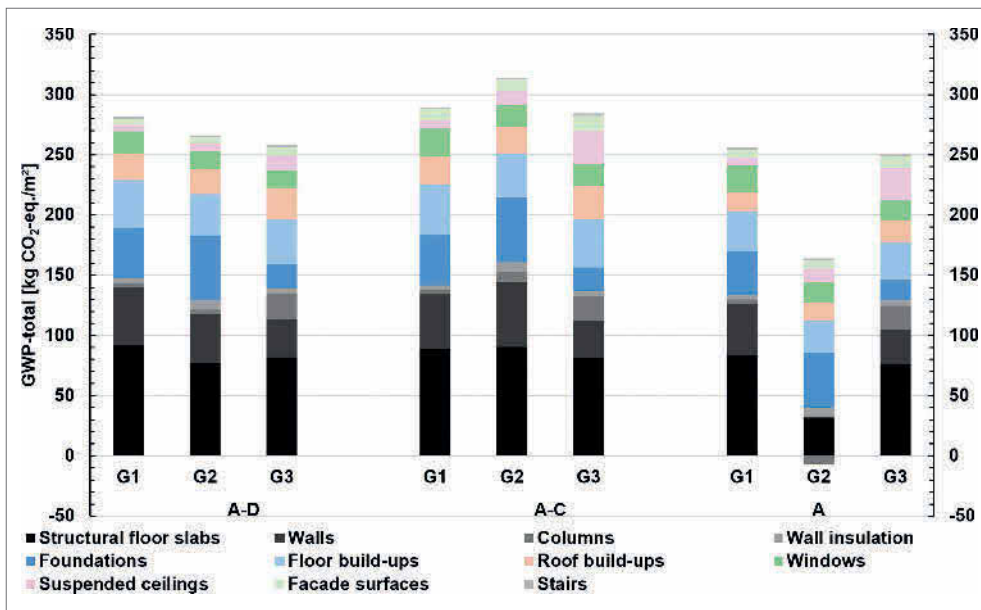


Fig. 4. GWP-total per m² of usable floor space in buildings G1 to G3, differentiated by scenarios and component groups *Source: RPTU*
 Bild 4. GWP-total pro m² Nutzfläche der Gebäude G1 bis G3, differenziert nach Bilanzierungsszenarien und Bauteilgruppen
 Grafik: RPTU

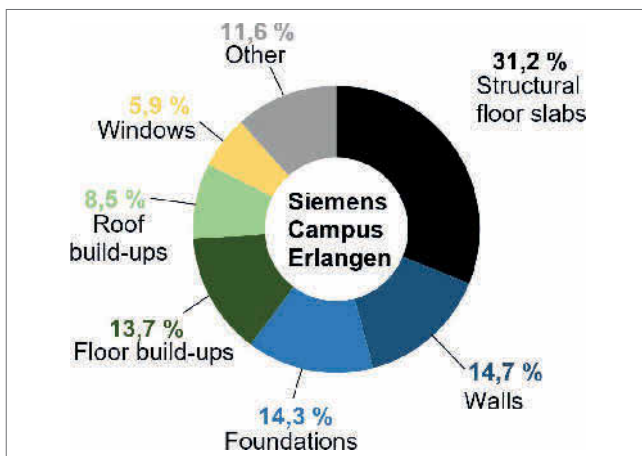


Fig 5. Proportion of life cycle phases (A-D) in total GWP per m² of usable floor space: Average values for buildings G1 to G3 *Source: RPTU*
 Bild 5. Anteile der Lebenszyklusphasen (A-D) am GWP-total pro m² Nutzfläche: Durchschnittswerte der Referenzgebäude G1 bis G3 *Grafik: RPTU*

In the overall building comparison for scenario A-D, it becomes evident that a total of 82 % to 93 % of the GWP-total is caused by the component groups: structural floor slabs, walls, foundations, floor finishes, roof build-up, and windows (**Figure 5**).

These six items can be identified as the most relevant GWP drivers across all construction methods within the investigated office properties. The structural floor slab alone accounts for approximately one third of the GWP-total (A-D). Furthermore, in all scenarios, G3 exhibits an increased share of column related emissions in the overall result, which is related to the primary use of structural steel.

In both scenarios A-D and A, G1 achieves the highest GWP-total of the three buildings, with 281,7 and 255,8 kg CO₂-eq./m². However, the GWP of G3, which yields the lowest overall result in these two scenarios, shows no significant reduction compared to G1, with a maximum difference of only up to 9 % (A-D). In scenario A-D, G2 ranks in the middle, whereas under the system boundaries of A-C, it results the highest absolute GWP value of

313,9 kg CO₂-eq./m². Conversely, if only the production phase (A) is considered, the GWP-total of G2 is halved to the lowest individual value overall.

This discrepancy is caused by the inconsistent tracking of biogenic carbon storage and disposal related release within wood-based products alongside varying approaches to accounting for energy benefits from recovery processes [8, 19].

4.2 Component Comparison

4.2.1 General

For a more detailed analysis, the embodied emissions of the individual component groups structural floor slabs, columns, and walls including wall insulation is presented for the reference assessment scenario A-D. As a corresponding intermediate result of the LCA, the absolute consumption of construction materials for the slab systems is reported. Based on these components, the impact on the embodied emissions of the various slab systems and the dependent vertical load-bearing structure emerges as the primary distinguishing feature of the three examined buildings.

As the only non-load-bearing component category, wall insulation is also included to evaluate construction-specific advantages and disadvantages, representing an envelope element whose design depends directly on the material composition of the load-bearing walls. In contrast, the other component categories, such as floor build-ups, windows, and roof build-ups, are designed largely independently of the chosen load-bearing structure and are not discussed separately, despite occasionally higher GWP results. The differences found in the foundations of the buildings resulted primarily from construction management considerations and show no direct dependency on the various total masses of the buildings. Consequently, these will not be addressed further in this publication, which focuses on construction and material specific differences between the buildings.

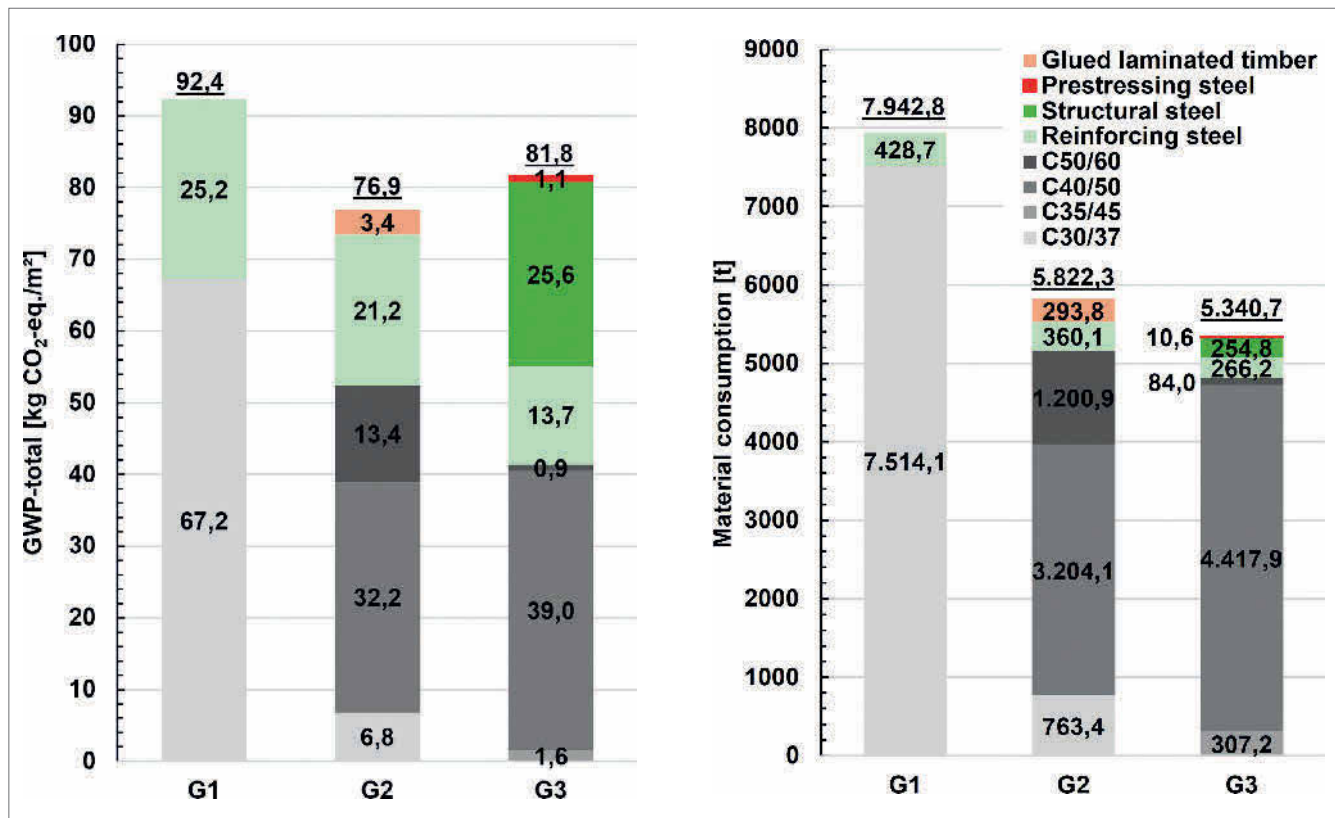


Fig. 6. GWP-total (left) and material consumption (right) for ceiling systems in buildings G1 to G3, scenario A-D Source: RPTU

Bild 6. GWP-total (links) und Materialverbrauch (rechts) der Deckensysteme in den Gebäuden G1 bis G3, Bilanzierungsszenario A-D Grafik: RPTU

4.2.2 Structural floor slabs

The comparison of mass and GWP-total of the slab systems in **Figure 6** illustrates the strong influence of emission-intensive materials. The slabs in G1, at nearly 8000 t, contribute significantly more mass than those in the other two buildings. However, due to the selection of a comparatively low concrete compressive strength class and consequently lower cement content, this gap narrows significantly when considering the GWP-total in **Figure 6**. In the slabs of G1, only concrete strength class C30/37 was used, whereas the other floor systems utilized higher strengths up to C50/60, partly due to the use of precast elements. However, the in-situ concrete flat slab in G1 achieves the highest GWP-total at 92,4 kg CO₂-eq./m².

Although G3 utilised the least mass in its slabs despite an increased net floor area, it generated a higher GWP-total than the heavier slabs in G2. Structural steel within the slabs of G3 is identified as a significant GWP driver here, while G2 benefits from the proportion of glued laminated timber in its timber-concrete composite floors. In a direct comparison with the timber, structural steel emits more than seven times of CO₂ equivalents for nearly identical masses.

4.2.3 Columns

The analysis of the embodied emissions of the columns (**Figure 7**) underlines the ecological relevance of material choice. Despite nearly identical masses of approximately 300 t each in all three buildings, serious differences occur in the LCA when steel columns are used. Due to the high steel content, the columns in

G3 cause approximately five times the embodied emissions compared to the other construction methods. The design of the columns using in-situ concrete or partial timber construction in G1 and G2 results in an overall negligible total for this component group at around 4,0 kg CO₂-eq./m², whereas the GWP-total of 21,9 kg CO₂-eq./m² caused by columns in G3 represents a significant portion even when considering the building as a whole. This comparison also highlights how decisive the choice of building materials is and how significantly it influences the LCA. It further demonstrates the significant carbon reduction potential inherent in the use of eco-concrete and “green steel”.

4.2.4 Walls and wall insulation

The vertical load-bearing structure, in addition to the columns, is completed by the representation of the embodied emissions of the walls in **Figure 8**. Despite a zoned construction approach, G1 records the maximum value here at 50,7 kg CO₂-eq./m² due to the use of high concrete compressive strengths. The walls in G2, which are predominantly designed as timber frame walls, rank in the middle at 48,4 kg CO₂-eq./m². In this case, reinforced concrete walls are primarily found around the stiffening building cores. In G3, relatively few reinforced concrete walls of only medium strength classes are used, resulting in the minimum value for these components at 35,7 kg CO₂-eq./m². It is possible that the extent of load-bearing walls in G3 can be reduced due to the high load-bearing capacities of the steel columns.

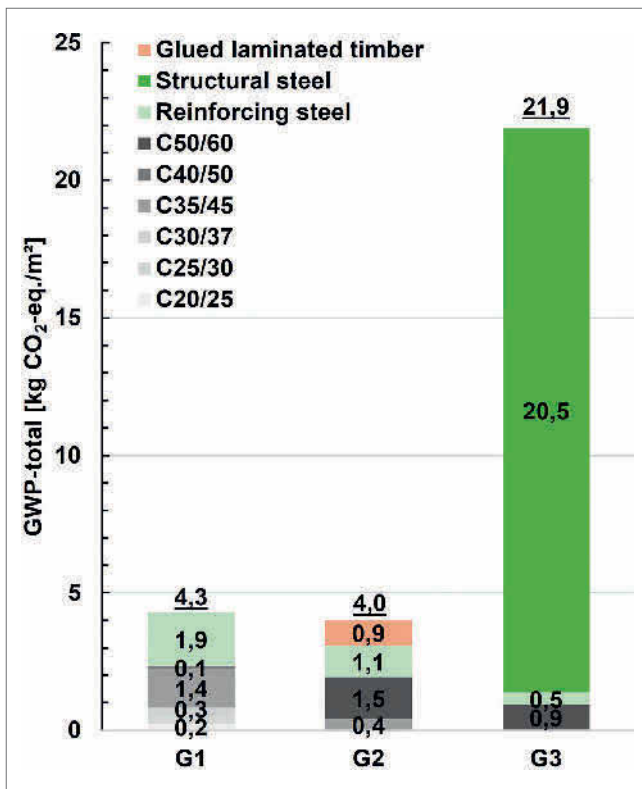


Fig. 7. GWP-total of columns in buildings G1 to G3, scenario A-D
 Source: RPTU
 Bild 7. GWP-total der Stützen in den Gebäuden G1 bis G3, Bilanzierungs-szenario A-D Grafik: RPTU

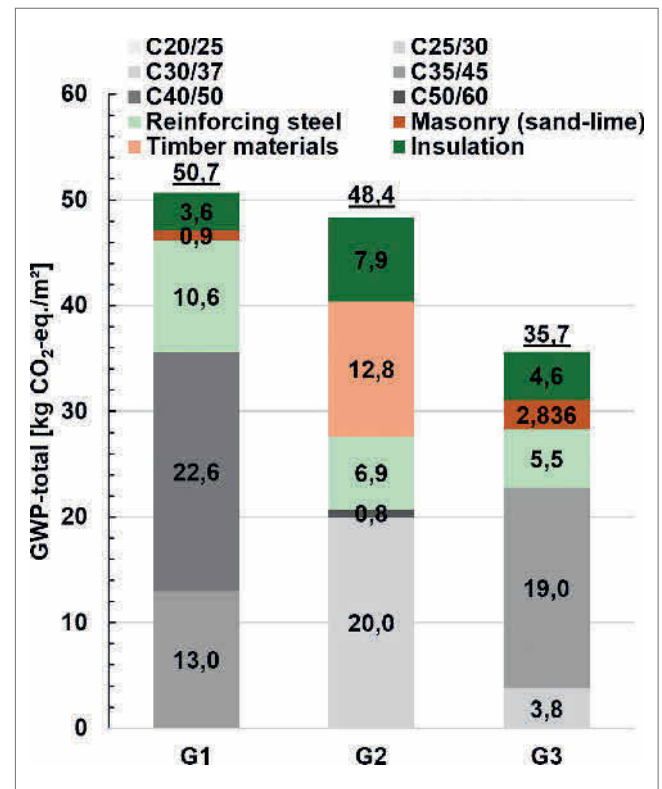


Fig. 8. GWP-total of walls incl. insulation in buildings G1 to G3, scenario A-D Source: RPTU
 Bild 8. GWP-total der Wände inkl. Dämmung in den Gebäuden G1 bis G3, Bilanzierungsszenario A-D Grafik: RPTU

The embodied emissions for wall insulation varies between 3,6 and 7,9 kg CO₂-eq./m². As **Figure 8** illustrates, G2 marks the upper limit here. The significant deviation of up to 211 % results primarily from the fundamentally different structural designs. While G1 and G3 utilize a conventional external thermal insulation composite system (ETICS) with purely external insulation, a timber frame construction is used in G2. In the latter, the cavity of the load-bearing structure was filled with insulation material in addition to the outer insulation layer. In combination with partially insulated interior areas, this leads to a significantly higher use of materials in G2, which is directly reflected in the LCA.

5 Evaluation and recommendations

5.1 Construction methods

The detailed analysis of the embodied emissions enables a well-founded assessment of the ecological advantages and disadvantages inherent in construction methods, focussing on the three investigated office buildings built as a reinforced concrete skeleton construction, a timber-concrete hybrid construction, and a systemized reinforced concrete construction. Figure 4 illustrates the differences within the scenario analysis.

It is remarkable that despite the differing construction methods, which are based on materials with fundamentally different global warming potentials, the total results at the building level in the scenario A-D deviate from one another by less than 10 %. Facing the encountered data and modelling uncertainties, the magnitude of these differences is to be classified

as very low. Consequently, within this evaluation scenario, no single construction method can be recommended over another. Rather, the decision depends on the specific material variants used for the respective construction method and the optimised planning and implementation of these systems. The selected materials as well as the structural design play a pivotal role in this regard. For instance, the use of eco-concretes with reduced embodied emissions or „green steel“ would influence the overall results more than the construction method itself. Therefore, future developments in the field of eco-concretes will also determine whether, it is more advantageous for the embodied emissions to manufacture slabs from cast-in-place concrete which tends to have lower strength or as precast concrete elements with early strength requirements. However, it should be noted that, due to the underlying data, the concretes in the study were differentiated only by compressive strength classes and not in greater detail by mix designs or manufacturing processes. The LCA results therefore cannot reflect this with finer differentiation.

5.2 Importance of the system boundaries according to the datasets

The greatest variances both within each individual building and across the different structures emerge when comparing the system boundaries for scenarios A and A-C. For example, timber products benefit significantly in the LCA from substantial credit due to assumed displacements of alternative energy sources in life cycle stage D, which results directly from questionable thermal

utilisation in stage C3. However, at the time of the LCA, statements regarding material recovery in the future disposal stage and its impacts on the energy sector can only represent pure forecasts, whereas a broad data basis is available for the already completed manufacturing stage. In contrast, the generic datasets used for the assessment of the concretes, for example, do not contain any negative GWP components to account for CO₂ uptake during carbonation.

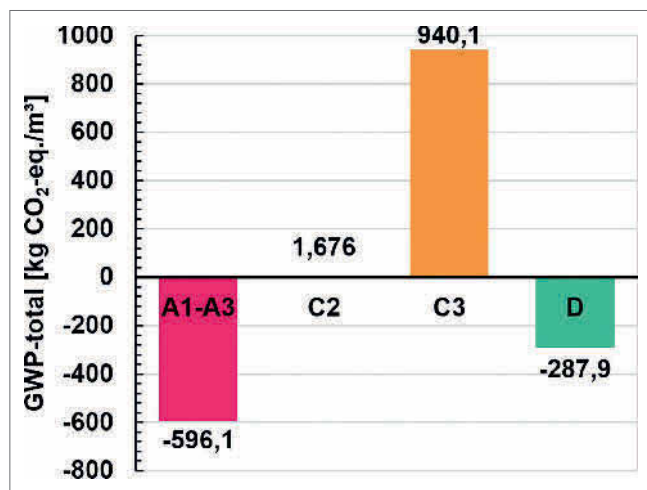


Fig. 9. Selected generic data set for laminated timber Source: [20]
Bild 9. Gewählter generischer Datensatz für Brettstichholz Grafik: [20]

Figure 9 illustrates that when summing up all available life cycle stages (A-D), only around 60 kg CO₂-eq./m³ occur for glued laminated timber because the biogenic carbon storage in A1-A3, the release of this carbon in the disposal stage C3, and the credit in stage D almost completely offset each other. If only A-C is considered and only the credit in D is neglected, this results in more than 340 kg CO₂-eq./m³, which is roughly equivalent to the GWP-total of one m³ of C50/60 concrete. However, around 95 % of the concrete's GWP originates from the manufacturing stage A1-A3, where glued laminated timber shows a negative value, meaning that even Cradle to Site does not represent an objective comparison scenario when these two materials are present.

The comparison of scenarios can also be influenced by the choice of the dataset for reinforcing steel. The generic dataset [21] assumes production in an electric arc furnace by melting steel scrap, so that a credit for recycling the raw material is already implicitly included in the manufacturing stage A1-A3, rather than only in stage D [22].

5.3 Influence of the datasets

Regarding the comparability of the results, the incompleteness of the datasets used must also be highlighted. Figure 3 illustrates this fragmentation. The fundamental issue with data gaps is that missing values must enter the overall LCA as zero, thereby underestimating the environmental impact and potentially leading to a flawed benchmark compliance assessment. Due to the diversity of the materials used and consequently the datasets applied for the different buildings and construction methods the incompleteness of the datasets for certain material groups can have an uneven impact. This is counteracted by primarily relying

on generic datasets, which are subject to quality control and must map the most relevant material flows. Regarding this type of dataset, it is worth noting that safety margins between 10 % and 30 % are applied in their generation. With respect to the indicator GWP-total, this affects the GWP-fossil and GWP-luluc components, but not the biogenic component of the GWP. This circumstance inhibits the comparability of the construction methods when using mineral, metallic, and timber building materials, whose GWP components are distributed fundamentally differently across these categories. Nevertheless, the uniform approach of generic datasets offers improved objectivity and increased transparency compared to selecting specific datasets, which contain a differing scope of life cycle data and could be influenced by manufacturers' interests in representation and market share. Furthermore, in the quantity calculation, it was not possible to assign the correct product to every structural element, and many products did not yet have valid environmental product declarations (EPD).

In conclusion, it should be noted that the approach of using generic datasets for the emission-driving construction materials concrete and steel chosen in the research project for the sake of comparability means that no positive impact from using more ecological material alternatives like „eco-concretes“ or „green steel“ can be reflected in the here presented LCA result. However, this is highly recommended. Therefore, the present results may deviate from the actual values of the analysed buildings if project-specific datasets were used. At the same time, the substantial amounts of concrete and structural or reinforcing steel in the overall results highlight levers for reducing embodied emissions through material optimization. These potentials should be leveraged and can have a greater impact than the minor differences achieved in this investigation focusing on the construction method.

5.4 Documentation requirements

As described in Section 3.3, the heterogeneity of the BIM models regarding the completeness of their attribution led to a limited application of corresponding LCA tools. Therefore, uniform documentation requirements should be established in the future as early as the tendering and awarding stage to ensure the seamless feasibility of the quantity calculation and the LCA. Information on the installed volumes, which must be available from the project costing, should be stored in a structured, complete manner and in accordance with the detailed design. Especially in the context of different concrete compressive strength classes which have a high impact on the LCA result with increasing cement contents. Therefore, BIM models must be completely and stringently attributed with the respective information. Reinforcement ratios of reinforced concrete components should be logged as a matter of priority, too.

Since the delineation of component groups varies depending on the project and the objective of the study and may deviate from the LCA categories used in this study, components in BIM models should additionally be assigned to functional component categories and cost groups. Through the applicability of filters, component schedules can be generated effectively and completely to be fed directly into the quantity calculation. Adding a unique component ID as well as attributing the corresponding plan number prevents misunderstandings and thus assessment errors.

However, it cannot be ruled out that attributions were present in the BIM models used that could not be fully retrieved. In this regard, it is essential to strengthen the use of Open BIM to improve the compatibility of the models with different software. Since compatibility issues became apparent after just a few years even between different versions of the same software, additional documentation of the essential properties of the most relevant component groups outside of the model files is recommended as explained in section 4.

5.5 Recommendations for tendering emission-efficient buildings

Comparing the various construction methods has shown that their impacts on the GWP-total of the entire building are minor within the Cradle-to-Cradle reference scenario. This implies that a performance-based tendering process, without prescribing a supposedly ecologically advantageous construction method, can be effective. The contractual specification of a GWP cap as implemented by SRE for „Module 8“ at the SCE motivates all designers and contractors to optimize embodied emissions while simultaneously considering cost-effectiveness. Inherent to the system, it also provides a transparent documentation of the installed masses and volumes suitable for LCA. Restricting requirements to a target value without prescribing specific construction methods leaves room for optimization in design and construction. These aspects should be considered and assessed holistically, leveraging the expertise of all specialized contractors.

6 Conclusion

This publication presents the methodology and results of a comparative LCA of the embodied emissions of three new office buildings utilizing different construction methods. The LCA covers various accounting scenarios and is based primarily on generic datasets from Ökobaumat. The LCA results are compared and scientifically evaluated at the overall building level and for selected, relevant component groups.

A key result of this comparative study is the demonstration that the three new office buildings which are nearly identical in external appearance do not exhibit significantly different embodied emissions in the A-D reference scenario, despite their different construction methods as a reinforced concrete skeleton construction, a timber-concrete hybrid construction, and a systemized reinforced concrete construction. Rather, the decisive factors are the quantities, types, and grades of materials used. Due to their large share of the total result across all three construction methods, concrete and structural or reinforcing steel represent the primary levers for reducing embodied emissions. This underlines the importance of resource-optimized structural design using efficient systems, as well as the further development of lower-emission, more ecological material recipes or manufacturing processes [23, 24]. To leverage the potential for reducing embodied emissions, functional competitions and tenders that specify GWP caps or targets for structural optimisation are preferable to prescribing specific construction methods. In this context, specific documentation requirements must be met to ensure transparent LCAs and verifications of embodied emissions.

In line with previous research and experience, the floor slab component group accounts for the absolute highest total GWP in all three analysed buildings, representing between 20 % and 33 % of the GWP-total. Notably, the floor build-up comprising screeds and hollow floor systems also accounts for a comparatively significant share of embodied emissions. In summary, it is evident that considerable potential for reducing embodied emissions can already be realized with currently available building materials and construction methods, provided that appropriate incentive mechanisms are established.

ACKNOWLEDGEMENTS

In conclusion, the authors would like to thank Siemens Real Estate for their interest and cooperation in the investigations, as well as for the financial support of this joint research project.

LITERATURE

- [1] Siemens Real Estate: Sustainability Standard – for Development, Construction & Major Renovation Projects. (Internes Dokument). Siemens AG, 2023.
- [2] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie Treibhausgas-reduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton. Ausgabe August 2024.
- [3] Krause, K.; Hartmann, C.; Hafner, A.: Eine Ökobilanz, viele Ergebnisse – Ergebnis und Vergleich der Ökobilanz desselben Einfamilienhauses durch verschiedene Bearbeitende. In: Bauingenieur 100 (2025), Heft 11, S. 326-336. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-11-56.
- [4] Zitterl, T.; Bauer, P.: Ökologische Optimierung von Tragwerken im Infrastrukturbau am Beispiel von Brücken und Portalkonstruktionen. In: Bauingenieur 99 (2024), Heft 10, S. 317-326. doi.org/10.37544/0005-6650-2024-10-53.
- [5] Hoppe, J.; Sanio, D.; Hormel, A. et al.: CO₂-Bilanzierung bei Straßenbrücken – Ein Bewertungsansatz für die Planungsphase von Baumaßnahmen. In: Bauingenieur 99 (2024), Heft 11, S. 354-365. doi.org/10.37544/0005-6650-2024-11-40.
- [6] Görtz, S.; Bardenhewer, E.K.; Volkenhoff, T. et al.: CO₂-Emissionen von Infrastrukturprojekten im Straßenbau. In: Bauingenieur 100 (2025), Heft 03, S. 62-72. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-03-56.
- [7] Siemens AG: Siemens Campus in Erlangen, 2025, <https://press.siemens.com/de/de/feature/siemens-campus-erlangen> [Zugriff am: 20.02.2026].
- [8] Weidner, S.; Mrzigod, A.; Bechmann, R. et al.: Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien. In: Beton- und Stahlbetonbau 116 (2021), Heft 12, S. 969-977. doi.org/10.1002/best.202100065.
- [9] Heckmann, M.; Glock, C.: Ökobilanz im Bauwesen – Treibhausgasemissionen praxisüblicher Deckensysteme. In: Beton- und Stahlbetonbau 118 (2023), Heft 2, S. 110-123. doi.org/10.1002/best.202200102.
- [10] Heckmann, M.; Glock, C.: Graue Emissionen von Hochbaudeckensystemen – Praxis-Umfrage und Hintergründe zur neuen DAfStb-Richtlinie. In: Beton- und Stahlbetonbau 120 (2025), Heft 1, S. 22-32. doi.org/10.1002/best.202400076.
- [11] Haist, M.; Glock, C.; Wiens, U. et al.: Die neue DAfStb-Richtlinie „Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton“ – Meilenstein für den Klimaschutz. In: Beton- und Stahlbetonbau 120 (2025), Heft 1, S. 55-59. doi.org/10.1002/best.202400090.
- [12] DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020. Ausgabe Februar 2021.
- [13] DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020. Ausgabe Februar 2021.

- [14] Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC Sixth Assessment Report – Chapter 7: The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021, www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-7/ [Zugriff am: 27.02.2026].
- [15] DIN EN 15804: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021. Ausgabe März 2022.
- [16] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Ökobaumat, www.oekobaumat.de/ [Zugriff am: 24.09.2024].
- [17] Figl, H.; Kusche, O.: Ökobaumat-Handbuch – Technisch/formale Informationen und Regeln zur Ökobaumat-Datenbank. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Berlin, Wien, Freiburg, 2.1 Ausgabe 2023.
- [18] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Ökobaumat Datenlieferanten, www.oekobaumat.de/anleitungen/datenlieferanten.html [Zugriff am: 20.02.2026].
- [19] Heckmann, M.: Entwicklung eines Benchmarksystems für die Grauen Emissionen von Deckensystemen, DIN Media GmbH; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Dissertation.
- [20] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Ökobaumat – Prozess-Datensatz: Brettschichtholz Nadelholz (generisch), https://oekobaumat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=c816b036-6bdf-48e5-8ef8-a76d7872f589&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de [Zugriff am: 26.02.2026].
- [21] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Ökobaumat – Prozess-Datensatz: Bewehrungsstahl (generisch), https://oekobaumat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=8565038f-5c21-48d7-94cb-958498ba9dd3&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de.
- [22] Bielak, J.; Ros, H.; Hiester, M.: Ressourceneffiziente Gebäudehülle durch nichtmetallisch bewehrte Sandwichfassaden – Von der Forschung zum Pilotprojekt. In: Bauingenieur 101 (2026), Heft 03, S. 41-51. doi.org/10.37544/0005-6650-2026-06.
- [23] Bayer, D.; Berns, K.; Carrigan, S. et al.: Building the Future – an interdisciplinary research initiative/Bauen der Zukunft – eine interdisziplinäre Forschungsinitiative. In: Bauingenieur 100 (2025), Heft 10, E 1-E 10. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-10-41.
- [24] Hegger, J.; Glock, C.; Curbach, M. et al.: Innovativer Betonbau – Tradition und Zukunft. In: Bauingenieur 100 (2025), 07-08, S. 181-195. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-07-08-15.

Rebecca Müller, M.Sc.

rebecca.mueller@rptu.de

Aaron Dernbach, M.Sc.

aaron.dernbach@rptu.de

Daniel Jochum, M.Sc.

daniel.jochum@rptu.de

Erik Wagner, M.Eng.

erik.wagner@rptu.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Christian Glock

christian.glock@rptu.de

Rheinland-Pfälzische Technische Universität
Kaiserslautern-Landau
Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion
Paul-Ehrlich-Straße 14, 67663 Kaiserslautern

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

Der dynamische Stromtarif – ein innovatives Strombeschaffungsmodell für Baustellen?

J. Otto, E. L. Fabek, F. Härtel

ZUSAMMENFASSUNG Die Stromversorgung auf Baustellen gewinnt im Zuge steigender Energieknappheit, der zunehmenden Elektrifizierung von Bauprozessen, signifikanter Stromkosten und der generellen Umstellung fossiler Ressourcen auf regenerative Energien immer mehr an Bedeutung. Unabhängig davon bieten neue Abrechnungsmodelle am Energiemarkt, wie zum Beispiel dynamische und kurzzeitbezogene Stromtarife, die Chancen für neue Strombeschaffungsmodelle. Es ist in diesem Zusammenhang zu prüfen, ob der dynamische Stromtarif, dessen dynamischer Arbeitspreisanteil an die Day-Ahead-Preise der Strombörse EPEX SPOT gekoppelt ist, eine wirtschaftliche Alternative zum konventionellen Baustromtarif darstellt. Dazu wurde von den Autoren auf Grundlage stündlich aufgelöster Verbrauchsdaten von realen Baustellen die Wirtschaftlichkeit von dynamischen Tarifen untersucht. Dynamische Tarife erweisen sich im Ergebnis grundsätzlich als wirtschaftlicher, sofern die Summe aus dem fixen Arbeitspreisanteil und dem durchschnittlich genutzten Spotmarktpreis unterhalb des Arbeitspreises des konventionellen Tarifs liegt. Zusätzlich wurde der Einsatz mobiler Speicher zur Kostenreduktion betrachtet, der jedoch als Mittel zur Kostensenkung nicht wirtschaftlich ist. Gleiches gilt für die meisten strompreisbezogenen Anpassungen des Bauablaufs an Zeiten mit niedrigen Strompreisen. Unabhängig davon war festzustellen, dass der dynamische Tarif das Potenzial bietet, die Sensibilisierung für den Stromverbrauch zu erhöhen und entsprechende Reduktionsmaßnahmen umzusetzen. In der Folge kann eine Senkung des Gesamtstromverbrauchs von Baustellen erreicht werden.

STICHWÖRTER

Baustrom, Dynamischer Stromtarif, EPEX SPOT, Machbarkeitsanalyse, Wirtschaftlichkeitsuntersuchung.

The dynamic electricity tariff – an innovative power procurement model for construction sites?

ABSTRACT The power supply on construction sites is becoming increasingly important in the context of growing energy scarcity, the ongoing electrification of construction processes, significant electricity costs, and the general transition from fossil resources to renewable energy sources. At the same time, new billing models on the energy market, such as dynamic and short-term electricity tariffs, open up opportunities for new electricity procurement strategies. In this context, it must be examined whether a dynamic electricity tariff, in which the variable energy price component is linked to the day-ahead prices of the EPEX SPOT electricity exchange, represents an economical alternative to conventional construction site electricity tariffs. For this purpose, the authors analyzed the economic efficiency of dynamic tariffs based on hourly resolved consumption data from real construction sites. The results show that dynamic tariffs are generally more economical, provided that the sum of the fixed price component and the average spot market price actually utilized remains below the energy price of the conventional tariff. In addition, the use of mobile storage systems for cost reduction was investigated; however, their application proved not to be economically viable as a cost-saving measure. The same applies to most construction schedule adjustments aimed at shifting electricity consumption to periods of low electricity prices. Nevertheless, it was observed that dynamic tariffs have the potential to increase awareness of electricity consumption and to promote the implementation of corresponding reduction measures. As a result, an overall reduction in electricity consumption on construction sites can be achieved.

1 Grundlagen

1.1 Das Modell „Dynamischer Stromtarif“

Der Baustromversorgung wurde aufgrund ihres vergleichsweise geringen Anteils an den Gesamtkosten eines Bauprojekts bislang lediglich eine untergeordnete Bedeutung beigemessen. Entsprechend wurden anderen Projektparametern und technologischen Entwicklungen deutlich höhere Optimierungs- und Einsparpotenziale zugeschrieben. [1-6] In den vergangenen Jahren ist jedoch eine deutlich zunehmende Volatilität der Strompreise zu beobachten, während der Stromverbrauch infolge der fortschreitenden Elektrifizierung von Bauprozessen weiter ansteigt. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob ein dynamischer

Stromtarif, der den Endverbraucher unmittelbar an der täglichen Preisentwicklung des Strommarkts partizipieren lässt, eine wirtschaftliche Alternative für die Strombeschaffung auf Baustellen darstellt.

Derzeit ist die Baustromversorgung überwiegend durch sogenannte Grundpreistarife, im weiteren als konventionelle Tarife bezeichnet, geprägt. [7] Bei diesen setzt sich das zu entrichtende Entgelt aus einem festen Grundpreis und einem verbrauchsabhängigen Arbeitspreis zusammen. Der Grundpreis ist ein monatlicher oder jährlicher Festbetrag, der unabhängig vom tatsächlichen Stromverbrauch anfällt. Der Arbeitspreis wird als fixer Betrag pro verbrauchter Kilowattstunde definiert und bleibt über die gesamte Vertragslaufzeit konstant. Auch bei dynamischen Tarifen wird ein



Bild 1. Durchschnittliche Zusammensetzung des Arbeitspreises, Stand 07/2025. Grafik: IBB-TUD, Datengrundlage [12-14]

Fig. 1. Average composition of the electricity work price, as of 07/2025. Source: IBB-TUD, data basis [12-14]

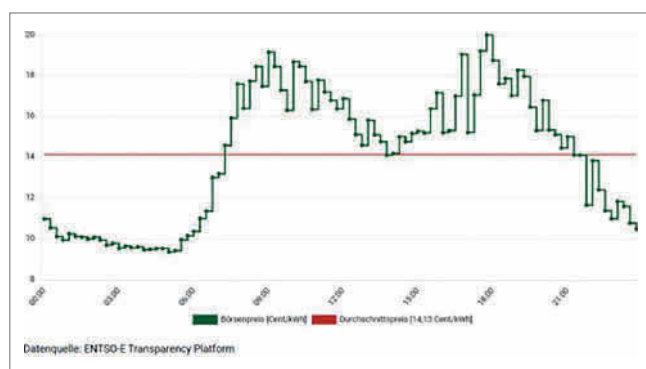


Bild 2. EPEX-Spot-Preise, exemplarisch für den 26.01.2026. Grafik: [16]

Fig. 2. EPEX Spot prices, exemplary for 26.01.2026. Source: [16]

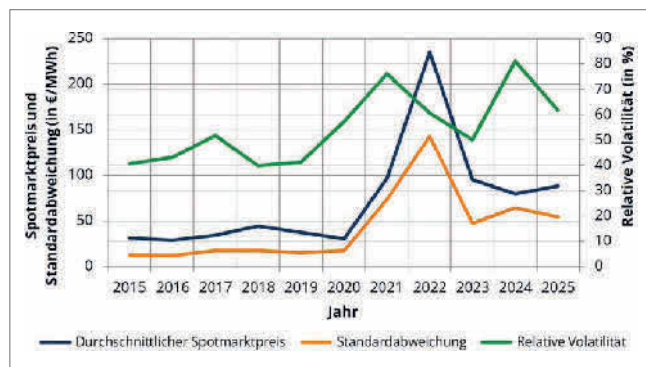


Bild 3. Entwicklung des Durchschnittspreises, der Standardabweichung und der relativen Volatilität an der EPEX SPOT von 2015 bis 2025. Grafik: IBB-TUD, Datengrundlage [17]

Fig. 3. Development of the average price, standard deviation, and relative volatility at EPEX SPOT from 2015 to 2025. Source: IBB-TUD, data basis [17]

verbrauchsunabhängiger Grundpreis erhoben. Der Arbeitspreis besteht hingegen aus einem fixen und einem variablen Kostenbestandteil. [8] Der fixe Anteil umfasst Servicegebühren, Netzentgelte, Abgaben und Steuern, während der variable Anteil unmittelbar an den Strompreis des Spotmarkts gekoppelt ist. Als Referenz dient der im Day-Ahead-Handel ermittelte Börsenpreis, der für jedes Viertelstundenintervall des Folgetages festgelegt wird. Der in diesem Intervall gemessene Stromverbrauch wird mit dem jeweils gültigen Börsenpreis verrechnet. Durch die Addition des festen und des dynamischen Arbeitspreisbestandteils je verbrauchter Kilowattstunde sowie des festen Grundpreises ergeben sich die monatlichen Stromkosten.

Dieses Abrechnungsmodell ermöglicht es Bauunternehmen, ohne zusätzlichen administrativen Aufwand oder die Erstellung komplexer Verbrauchsprognosen unmittelbar an der kurzfristigen Preisentwicklung des Stromgroßhandelsmarkts zu partizipieren. Gleichzeitig besteht allerdings ein Kostenrisiko, da keine Preisobergrenzen vorgesehen sind. Treten in Phasen hoher Stromnachfrage extreme Börsenpreise auf, können die Stromkosten erheblich ansteigen, insbesondere wenn in diesen Zeiträumen keine Möglichkeit zur Lastverlagerung besteht.

Für die spätere differenzierte Betrachtung der Wirtschaftlichkeit beider Tarife ist die Zusammensetzung des Arbeitspreises relevant. Der Arbeitspreis beider Tarife für eine Kilowattstunde setzt sich aus drei Bestandteilen zusammen: (1) den Kosten für Beschaffung und Vertrieb, (2) den Netz- und Messentgelten sowie (3) den Steuern, Abgaben und Umlagen (**Bild 1**). [9] Da letztere beiden Bestandteile bei dem konventionellen und dynamischen Tarif nahezu identisch sind, werden weitergehende Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen nur für den Anteil Beschaffung und Vertrieb durchgeführt. Unter Beschaffung und Vertrieb fallen sowohl die eigentlichen Kosten für die Beschaffung und Bereitstellung der Kilowattstunde Strom (= Beschaffung) als auch die Aufwendungen für Vermarktung, Vertrieb und Serviceleistungen des Stromversorgungsunternehmens (= Vertrieb). [10, 11] Aus Bild 1 ist abzuleiten, dass der Anteil für die Beschaffung des Stroms mit circa 10 ct/kWh nur circa 20 % des Arbeitspreises ausmacht. 80 % entfallen auf Netz- und Messentgelte sowie Steuern, Abgaben und Umlagen.

1.2 Day-Ahead-Markt als Grundlage dynamischer Stromtarife

Die Preisbildung des Arbeitspreisanteils für die Beschaffung dynamischer Stromtarife basiert auf den kurzfristigen Handelsmechanismen des Stromgroßhandelsmarkts. Eine zentrale Rolle im europäischen Stromhandel nimmt dabei die EEX-Group ein (EEX = European Energy Exchange), die mit der European Power Exchange in Paris den Spotmarkt (EPEX SPOT) betreibt. Der Spotmarkt dient dem kurzfristigen Ausgleich von Angebot und Nachfrage sowie der Strompreisfindung. Für die Preisgrundlage dynamischer Tarife ist der Day-Ahead-Handel maßgeblich. Im Day-Ahead-Handel geben die Marktteilnehmer ihre Gebote für Stromlieferungen des Folgetages bis 12 Uhr des Vortages ab. [15] Ein Beispiel für den Beschaffungspreisverlauf (EPEX-Spot-Preis) zeigt **Bild 2**. Der Preis entspricht in Bild 1 dem Preis für „Beschaffung“ ohne „Vertrieb“ (vgl. grünes Segment).

Die so ermittelten Preise bilden die Preisgrundlage dynamischer Stromtarife. Die Auswertung der Spotmarktpreise (**Bild 3**) für den Zeitraum von 2015 bis 2025 zeigt bis Ende 2020 ein weitgehend konstantes Preisniveau. In den Jahren 2021 und 2022 kommt es zu einem ausgeprägten Preisanstieg mit einem Höhepunkt im Jahr 2022. Seit 2023 ist ein Rückgang zu beobachten, wobei sich die Preise auf einem deutlich höheren Niveau als vor dem Anstieg stabilisieren. Parallel zur Entwicklung des Preisniveaus steigt die absolute Volatilität, gemessen über die Standardabweichung, deutlich an. Unter Volatilität wird im Stromhandel die starke, kurzfristige Preisschwankung des Strompreises verstanden. Zwischen Durchschnittspreis und absoluter Volatilität besteht eine ausgeprägte Korrelation. Darüber hinaus nimmt auch die relative Volatilität, definiert als Verhältnis von

Standardabweichung zu Durchschnittspreis, in den letzten Jahren zu. Dies deutet auf eine strukturelle Veränderung der Preisbildung am Spotmarkt hin. Als wesentliche Einflussfaktoren gelten pandemiebedingte Marktverwerfungen, gestiegene Großhandelspreise sowie geopolitische Ereignisse. Zusätzlich trägt der zunehmende Anteil erneuerbarer Energien, insbesondere wetterabhängiger Erzeugung, zur Erhöhung der relativen Volatilität bei. (Bild 3) Jüngste Entwicklungen im Kontext von Ressourcen- und Rohstoffknappheit (Q1 2026) zeigen erneut, in welchem Maße geopolitische Rahmenbedingungen massiven Einfluss auf den Spotmarktpreis haben. Entsprechend sollten Prognosen explizit als zeitgebunden und szenarienabhängig gekennzeichnet werden.

Die Entwicklung konventioneller Stromtarife wird anhand der durchschnittlichen Höhe regionaler Grundversorgungstarife betrachtet. Grundversorgungstarife repräsentieren in der Regel nicht den günstigen Tarif für den Bezug von Strom, stellen jedoch für die hier gegenständliche Untersuchung einen ausreichend repräsentativen Bezugswert für die Höhe des Strompreises konventioneller Stromtarife dar. Bis 2021 verläuft dessen Preisentwicklung moderat. In den Jahren 2022 und 2023 kommt es zu einem deutlichen Preisanstieg, der zeitlich verzögert auf die zuvor gestiegenen Spotmarktpreise folgt (Bild 4). Der Preisanstieg betrachtet dabei den Anstieg des Arbeitspreises, die Veränderung des Preises wird als „Arbeitspreisindex“ ausgewiesen (2025 = 100 %). Ursache hierfür ist der überwiegend mittelfristige Beschaffungscharakter der Stromversorgungsunternehmen. Der gleichzeitig stark steigende Preisanteil für Beschaffung und Vertrieb (Bild 1 und Bild 5) verdeutlicht, dass die Erhöhung der Endkundenpreise maßgeblich durch gestiegene Beschaffungskosten getrieben wird. Seit 2024 ist ein leichter Rückgang des Arbeitspreises erkennbar. Insgesamt folgt der Grundversorgungspreis strukturell der Spotmarktpreisentwicklung, jedoch mit zeitlicher Verzögerung und geringerer Ausprägung.

Die Untersuchung jahreszeitlicher Schwankungen zeigt, dass die Spotmarktpreise im Frühjahr regelmäßig die niedrigsten Tagesdurchschnittswerte aufweisen, während sie im Sommer, Winter und insbesondere im Herbst deutlich höher liegen. Das Preisniveau folgt somit ausgeprägten saisonalen Mustern. Die tageszeitliche Analyse offenbart zwei wiederkehrende Preisspitzen in den Morgen- und Abendstunden (ca. 6:00 bis 10:00 Uhr und 16:00 bis 21:00 Uhr) sowie ausgeprägte Preistäler zur Mittagszeit (ca. 11:00 bis 15:00 Uhr) und in den Nachtstunden (ca. 22:00 bis 5:00 Uhr). Die Ausprägung dieser Muster variiert in Abhängigkeit von der Jahreszeit. Insbesondere im Sommer verstärkt sich das Mittagstief deutlich, während im Winter das nächtliche Preistief dominiert. Insgesamt weisen Sommer und Herbst eine höhere tageszeitliche Volatilität auf als Frühjahr und Winter. (Bild 6) Günstige Preise innerhalb von 24 h sind demnach häufig in folgenden Zeiträumen vorhanden:

- Frühjahr → von circa 1:00 bis 4:00 Uhr und 12:00 bis 15:00 Uhr,
- Sommer → von circa 2:00 bis 5:00 Uhr und 11:00 bis 15:00 Uhr,
- Herbst → von circa 2:00 bis 5:00 Uhr und 13:00 bis 15:00 Uhr,
- Winter → von circa 1:00 bis 5:00 Uhr.

Im Vergleich sind die Preise im Frühjahr im Tagesdurchschnitt deutlich günstiger als in den anderen drei Jahreszeiten. Im Herbst und Winter sind die Preise üblicherweise am höchsten.

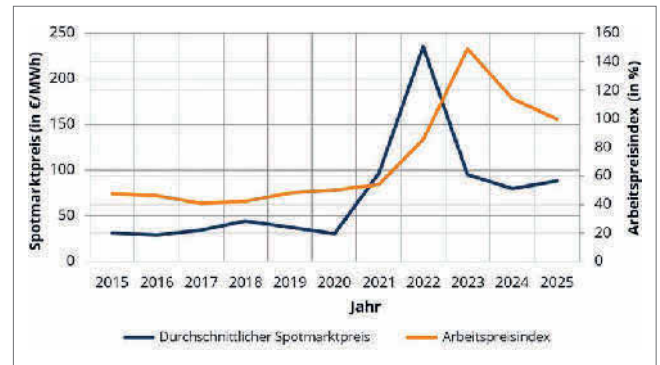


Bild 4. Vergleich des Verlaufs von durchschnittlichem Spotmarktpreis und Arbeitspreisindex von 2015 bis 2025. Grafik: IBB-TUD, Datengrundlage [17-20]
 Fig. 4. Comparison of the course of average spot market price and work price index from 2015 to 2025. Source: IBB-TUD, data basis [17-20]



Bild 5. Strompreisentwicklung von Grundversorgerpreisen in Deutschland von 2015 bis 2025. Grafik: IBB-TUD, Datengrundlage [20-22]
 Fig. 5. Development of electricity prices for standard supply rates in Germany from 2015 to 2025. Source: IBB-TUD, data basis [20-22]

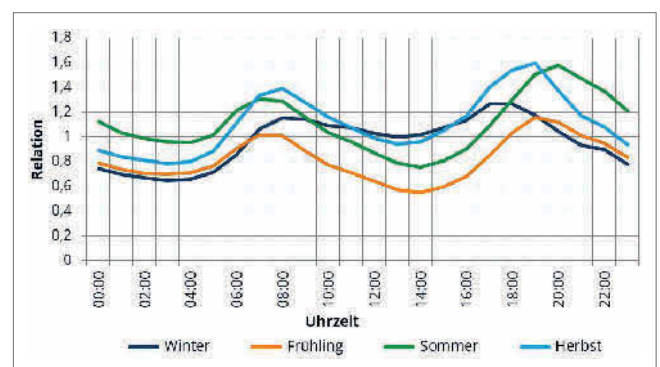


Bild 6. Tagespreiskurven in Abhängigkeit der Jahreszeit von 2015 bis 2024. Grafik: IBB-TUD, Datengrundlage [17]
 Fig. 6. Daily price curves depending on the season from 2015 to 2024. Source: IBB-TUD, data basis [17]

2 Vereinbarkeit von Bauablauf und Stromkosten

2.1 Smart Meter – Die Schlüsseltechnologie zum dynamischen Tarif

Für die Anwendung eines dynamischen Stromtarifs ohne Veränderung des Verbrauchsprofils ist zunächst keine umfassende Erweiterung der Elektroversorgung von Baustellen erforderlich.

Der wesentliche Unterschied zum konventionellen Netztarif besteht nur darin, dass ein „intelligenter“ Stromzähler („Smart Meter“) eingesetzt werden muss. [23] Dieser Smart Meter ermöglicht die automatische, digitale Aufzeichnung des Verbrauchsverhaltens in kurzen Intervallen und die sichere, automatisierte Übermittlung der Verbrauchsdaten ohne manuelles Ablesen. Die Übertragung des Stromverbrauchs erfolgt zeitnah, nach Bedarf in Echtzeit (z. B. $1 \times$ pro Sekunde) bis hin zu einmal aller 24 Stunden. Für die Einrichtung und Wartung des Zählers sowie die Datenübertragung und -bereitstellung ist der Messstellenbetreiber verantwortlich. Die Baustelle selbst muss lediglich den Zugang zum Anschluss- beziehungsweise Messpunkt ermöglichen. [24] Die Datenübertragung erfolgt über eine verschlüsselte Verbindung mittels Smart-Meter-Gateway (SMGW). Üblicherweise erfolgt die Bereitstellung der ausgelesenen Daten über ein Online-Portal oder entsprechende App. Auf diese Weise kann das Baustellenpersonal den auf der Baustelle verbrauchten Strom transparent und zeitnah überwachen.

2.2 Möglichkeiten der Verbrauchsveränderung

Durch die tageszeitlichen Preisschwankungen am Spotmarkt der EPEX SPOT hat die zeitliche Verlagerung von Verbräuchen einen unmittelbaren Einfluss auf die Höhe der Stromkosten. Der Stromverbrauch auf der Baustelle kann hierfür grundsätzlich auf drei Wegen beeinflusst werden: die Verschiebung von Bauprozessen, der Einsatz mobiler Stromspeicher und der Einsatz akkubetriebener Verbraucher.

2.2.1 Verschiebung von Bauprozessen

Da die meisten Bauprozesse in komplexen Abhängigkeiten zueinanderstehen, ist eine gezielte Verbrauchsverlagerung auf Baustellen nur eingeschränkt möglich. Voraussetzung ist daher zunächst eine Analyse der Flexibilitätspotenziale der eingesetzten Verbraucher, die sich in Anlehnung an etablierte Verbrauchergruppen in die Typen A, B und C einteilen lassen. [25] Typ A umfasst thermische und regulierbare Verbraucher, die bestimmte Betriebszustände dauerhaft aufrechterhalten müssen, und wird für das Bauwesen in zwei Unterkategorien differenziert. Typ A.1 bezeichnet Verbraucher wie Grundwasserpumpen, Entfeuchtungsgeräte oder Frostschutzheizungen, deren Leistungsaufnahme durch äußere bauphysikalische Bedingungen bestimmt wird und praktisch kein Flexibilitätspotenzial bietet, da Unterbrechungen zu Störungen im Bauablauf oder Bauschäden führen können. Typ A.2 – etwa Heizungen oder Klimaanlage in Baucontainern – erlaubt geringfügige zeitliche Anpassungen, doch erfordert eine preisabhängige Steuerung zusätzliche Mess-, Regel- und Überwachungstechnik. Der Schwerpunkt sollte daher weniger auf Lastverlagerung als auf allgemeinen Reduktionsmaßnahmen liegen [26], beispielsweise durch Absenkung der Heizleistung in arbeitsfreien Zeiten oder den Einsatz effizienterer Technologien. Typ B bezeichnet tätigkeitsgebundene Verbraucher – darunter Baumaschinen (HDI-Anlagen, Schweißaggregate, Sieb-/Brechanlagen, TDK), Baugeräte sowie technische Einrichtungen in Baucontainern –, deren Leistungsaufnahme unmittelbar an laufende Bauprozesse gekoppelt ist. Eine Reduktion ist ausschließlich durch zeitliche Verlagerung der Bauprozesse selbst möglich. Während die Anpassung der

allgemeinen Arbeitszeiten organisatorisch noch vergleichsweise einfach umsetzbar ist, sind weitergehende Verlagerungen einzelner Maschineneinsätze organisatorisch anspruchsvoll, stark projektspezifisch und mit Risiken für den Bauablauf verbunden; die begrenzte Prognosefähigkeit der Strompreise über mehrere Tage erschwert eine verlässliche Planung zusätzlich. Typ C schließlich umfasst hochgradig flexible Verbraucher wie Batteriespeicher und Ladevorgänge elektrisch betriebener Maschinen, bei denen der Leistungsbezug innerhalb definierter technischer Grenzen zeitlich weitgehend frei wählbar ist. Diese Verbraucher eignen sich grundsätzlich sehr gut für Lastverlagerungen, sofern der Ladeprozess zeitlich flexibel gestaltet werden kann und die Ladekapazität der jeweiligen Aggregate ausreichend groß ist.

2.2.2 Einsatz Mobiler Speicher

Der Einsatz Mobiler Speicher bietet verschiedene technische und wirtschaftliche Vorteile, darunter die Reduktion der erforderlichen Anschlussleistung, eine verbesserte Netzstabilität, erhöhte Versorgungssicherheit sowie die Umsetzung von Lastmanagementstrategien.

Technologisch existieren unterschiedliche Speicherformen mit stark variierenden Speicher- und Entladezeiträumen. [27] Für den Baustelleneinsatz sind insbesondere Akkumulatoren relevant [28], da sie eine hohe Energiedichte, geringe Selbstentladung und eine direkte elektrische Speicherung ermöglichen. Innerhalb dieser Technologie dominieren Lithium-Ionen-Batterien aufgrund ihres günstigen Verhältnisses von Energie- zu Leistungsdichte. [29]

Diese Systeme unterscheiden sich hinsichtlich Kapazität, Leistung, Bauform und Anschlussmöglichkeiten und sind typischerweise für eine Netzspannung von 230/400 V bei 50 Hz ausgelegt. Der Gesamtwirkungsgrad solcher Systeme liegt aufgrund innerer Verluste in der Praxis bei etwa 85 %. [30] Mittelgroße Stromspeicher haben eine Ladekapazität in Höhe von circa 250 kWh und benötigen für den Ladeprozess circa 1 bis 3 h.

2.2.3 Einsatz akkubetriebener Verbraucher

Die Ladeinfrastruktur für elektrisch betriebene Maschinen und Fahrzeuge auf Baustellen lässt sich entweder direkt in mobile Energiespeicher integrieren oder über separate, mobile Speichereinrichtungen realisieren, wobei die Wahl maßgeblich von der erforderlichen Ladeleistung und den verfügbaren Netzanschlussmöglichkeiten abhängt. Für den Baustelleneinsatz sind nach IEC 62196:2022 insbesondere die Lademodi 2 bis 4 relevant: Mode 2 ermöglicht das Laden über CEE-Steckdosen mit bis zu 22 kW, Mode 3 nutzt fest installierte Einrichtungen mit Kommunikationsschnittstelle für dreiphasige Leistungen bis 43,5 kW, und Mode 4 erlaubt als externe Gleichstromladung sehr hohe Leistungen bis in den Bereich mehrerer hundert Kilowatt. Im Kontext dynamischer Stromtarife ist die Flexibilität zur Lastverschiebung bei dieser Ladeinfrastruktur jedoch eingeschränkter als bei reinen Energiespeichern: Da Ladevorgänge in der Praxis an betriebliche Rahmenbedingungen gebunden sind und sich auf Pausen oder Zeiten außerhalb der aktiven Arbeitsphasen konzentrieren, ist eine vollständig freie zeitliche Verlagerung des Strombezugs nur bedingt umsetzbar.

3 Wirtschaftliche Bewertung

3.1 Methodisches Vorgehen

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde der stündliche Stromverbrauch acht realer Bauprojekte („A“ bis „H“) aus unterschiedlichen Ländern Europas zugrunde gelegt. Nachfolgende Übersicht stellt die acht Bauprojekte näher vor (Ort, Gesamtbauteit, Gesamtstromverbrauch Baustelle, Anschlussstromstärke):

- A: Hochbau in Bratislava, 01.12.2022-06.12.2023, 36 267 kWh gesamt, 125 A
- B: Hochbau in Bratislava, 01.03.2023-29.02.2024, 46 490 kWh, 140 A
- C: Hochbau in Bratislava, 01.01.2023-08.11.2023, 44 799 kWh, 240 A
- D: Hochbau in Magdeburg, 15.06.2023-15.06.2024, 205 627 kWh, 240 A
- E: Hochbau in Ljubljana, 01.11.2023-24.10.2024, 108 109 kWh, 350 A
- F: Schwimmbad in Oslo, 24.09.2020-30.03.2024, 5 322 159 kWh, 1 115 A
- G: Schwimmbad in Oslo, 16.06.2023-31.03.2024, 307 910 kWh, 800 A
- H: Bürogebäude in Oslo, 01.11.2023-31.03.2024, 443 442 kWh, 1 420 A

Die baustellenbezogenen Aufzeichnungen wurden für eine Bauzeit von circa einem Kalenderjahr ausgewertet. Da die meisten Projekte im Zeitraum 2022 bis 2024 ausgeführt wurden, erfolgen die Auswertungen nicht nur für den tatsächlichen Ausführungszeitraum, sondern zusätzlich auch für fiktiv verschobene Ausführungszeiträume. Die verwendeten Strompreise stammen aus den Tarifdaten des Grundversorgungstarifs und des dynamischen Tarifs der Stadtwerke Dresden GmbH („DREWAG“) aus dem Jahr 2025 und wurden mittels der allgemeinen Entwicklung des Index für Grundversorgungspreise für andere Jahre auf-/abgewertet. Für die Beschaffungskosten im Rahmen des dynamischen Tarifs wurden die Day-Ahead-Preise der Jahre 2015 bis 2025 an der EPEX SPOT zugrunde gelegt.

Die Auswertung der umfangreichen Datenmengen zu den erfassten Stromverbräuchen der acht Baustellen ($365 \text{ d} \times 24 \text{ h/d} \times 4 \text{ Daten/h} = \text{circa } 35\,000 \text{ Daten pro Baustelle und Jahr}$) erfolgte mit selbst programmierten Routinen (Programmiersprache Python). Je Szenario, Baustelle und Jahr werden folgende Kennwerte berechnet und Auswertungen durchgeführt:

1. Gesamtkostenvergleich zwischen dynamischem und konventionellem Tarif

Für jede Baustelle werden die gesamten Stromkosten für den Anteil Beschaffung und Vertrieb berechnet. Hierfür werden die stündlichen Verbräuche mit den stündlichen Spotmarktpreisen (dynamischer Tarif) beziehungsweise mit dem im jeweiligen Jahr gültigen Arbeitspreis (konventioneller Tarif) multipliziert. Durch anschließende Summierung aller stündlichen Stromkosten entstehen die Gesamtkosten für den jeweiligen Tarif für Beschaffung und Vertrieb, sodass unmittelbar sichtbar wird, welcher Tarif im betrachteten Zeitraum kostengünstiger ausfällt.

2. Bewertung der Korrelation zwischen Verbrauch und Spotmarktpreisen

Zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Verbrauchs- und Spotmarktpreis-Kurve (stündlich und täglich) werden die tatsächlichen Kosten aus stunden- und tagesgenauen Preisbe-

wertung den hypothetischen Kosten gegenübergestellt, die sich bei Nutzung des durchschnittlichen Tagespreises des dynamischen Tarifs ergeben. Konkret werden pro Tag im Jahr die stündlichen Verbräuche mit den stündlichen Preisen und der gesamte Tagesverbrauch mit dem durchschnittlichen Tagespreis multipliziert. Anschließend werden beide Werte über das jeweils betrachtete Kalenderjahr aufsummiert. Ist die Summe der stundengenauen Abrechnung geringer als die der durchschnittspreisbasierten Bewertung, liegt eine negative Korrelation vor. In diesem Fall erfolgt die Stromnutzung überwiegend während eines Preistiefs. Im Idealfall fallen Verbrauchsspitzen mit Preistiefs zusammen. Ist die stundengenaue Summe hingegen höher, besteht eine positive Korrelation, die einen Verbrauch eher während Preishochs anzeigt. Im ungünstigsten Fall treffen Verbrauchsspitzen mit Preisspitzen zusammen. Stimmen tatsächliche und durchschnittspreisbasierte Kosten überein, wird dies als neutrale Korrelation bezeichnet. Die so ermittelte durchschnittliche Korrelation kann in zukünftigen Projekten zur Abschätzung der tatsächlich genutzten Spotmarktpreise auf Grundlage des durchschnittlichen Tagespreises genutzt werden.

Aus den Betrachtungen des Abschnitt 2 ergeben sich vier auf ihre Wirtschaftlichkeit hin zu untersuchende Anwendungsszenarien:

- Szenario 1: Welche Auswirkung hat die Verwendung des dynamischen Tarifs im Vergleich zum konventionellen Tarif (ohne Veränderung des Verbrauchsprofils, ohne zentralen Stromspeicher, ohne akkubetriebene Verbraucher)?
- Szenario 2: wie Szenario 1, jedoch mit zeitlicher Verschiebung des Verbrauchsprofils,
- Szenario 3: wie Szenario 1, jedoch mit zentralem Stromspeicher,
- Szenario 4: wie Szenario 1, jedoch mit akkubetriebenen Verbrauchern.

3.2 Szenario 1

In Szenario 1 wird untersucht, welchen wirtschaftlichen Einfluss die Nutzung eines dynamischen im Vergleich zu einem konventionellen Tarif bei den jeweiligen Baustellen hat. Die Ergebnisse der **Tabelle 1** zeigen die prozentualen Unterschiede zwischen den relativen Gesamtstromkosten des dynamischen im Vergleich zum konventionellen Tarif (jeweils vom 1.1. bis 31.12.). Fett dargestellt sind die Jahre, in denen die Erfassung des Stromverbrauchs tatsächlich erfolgte. Rot markiert sind Jahre, in denen der konventionelle Tarif günstiger gewesen wäre als der dynamische Tarif. Schwarz sind Jahre markiert, in denen der dynamische Tarif günstiger war.

Tabelle 1 zeigt, dass der Einsatz eines dynamischen Stromtarifs bei allen Baustellen im tatsächlichen Ausführungszeitraum (fett markiert) um 22 bis 46 Prozent günstiger als der konventionelle Tarif war. Dies entspricht je nach Baustelle Einsparungen zwischen 3 000 und 226 000 Euro. Bei Verschiebung des Aufzeichnungsbeginns in andere Kalenderjahre fällt auf, dass der dynamische Tarif in den meisten Fällen günstiger als der konventionelle ist, durchschnittlich um 15,1 Prozent. Eine Ausnahme stellen die Ausführungszeiträume dar, in denen ein Großteil des Verbrauchs in die Jahre 2021 und 2022 fällt. In diesen Jahren lagen die Preise konventioneller Tarife aufgrund ihrer Trägheit deutlich unter den Spotmarktpreisen (Bild 3). Ab dem Jahr 2023 folgt ein Rebound-Effekt, bei dem die Spotmarktpreise deutlich unter den

Tabelle 1. Verhältnis der relativen Gesamtstromkosten des dynamischen im Vergleich zum konventionellen Tarif (Szenario 1, Betrachtungszeitraum 1.1. bis 31.12.)

Table 1. Ratio of the relative total electricity costs of the dynamic tariff compared to the conventional tariff (scenario 1, observation period: January 1 to December 31)

Jahr	Baustelle							
	A	B	C	D	E	F	G	H
2015	-42 %	-42 %	-38 %	-47 %	-46 %	-25 %	-36 %	-46 %
2016	-22 %	-29 %	-43 %	-24 %	-24 %	-32 %	-30 %	-19 %
2017	-20 %	-30 %	-23 %	-31 %	-26 %	-37 %	-25 %	-27 %
2018	-26 %	-16 %	-20 %	-19 %	-26 %	25 %	-3 %	20 %
2019	-43 %	-37 %	-29 %	-45 %	-47 %	37 %	-32 %	-44 %
2020	11 %	-35 %	-46 %	-27 %	-11 %	-22 %	-29 %	-24 %
2021	81 %	56 %	2 %	75 %	77 %	-29 %	78 %	87 %
2022	-23 %	41 %	61 %	3 %	-24 %	-	104 %	-3 %
2023	-41 %	-43 %	-36 %	-47 %	-46 %	-	-41 %	-45 %
2024	-	-27 %	-43 %	-20 %	-	-	-27 %	-11 %
Ø = -15,1 %	-14 %	-16 %	-22 %	-18 %	-19 %	-12 %	-4 %	-15 %

Tabelle 2. Prozentuale Abweichung der jährlichen Gesamtstromkosten bei dynamischem Tarif von stündlich abgerechneten Preisen gegenüber täglich abgerechneten Preisen (Szenario 1)

Table 2. Percentage difference in annual total electricity costs under a dynamic tariff with hourly billed prices compared to daily billed prices (scenario 1)

Jahr	Baustelle							
	A	B	C	D	E	F	G	H
2015	1,6 %	0,8 %	0,3 %	-0,5 %	2,1 %	0,8 %	6,2 %	4,7 %
2016	2,0 %	0,6 %	0,3 %	-0,8 %	2,3 %	0,8 %	5,0 %	4,3 %
2017	1,5 %	0,6 %	0,1 %	-0,4 %	2,1 %	0,7 %	5,4 %	4,3 %
2018	1,3 %	0,3 %	0,2 %	-0,4 %	1,6 %	0,4 %	4,3 %	3,4 %
2019	1,7 %	0,4 %	0,2 %	-0,5 %	1,2 %	0,3 %	4,2 %	4,2 %
2020	1,7 %	0,4 %	0,4 %	-0,2 %	1,5 %	0,4 %	4,4 %	3,3 %
2021	0,6 %	0,7 %	0,3 %	-0,4 %	0,6 %	0,0 %	3,5 %	3,4 %
2022	0,4 %	0,3 %	0,2 %	-0,6 %	1,0 %	-	1,9 %	4,3 %
2023	-0,7 %	-0,1 %	-0,1 %	-0,2 %	-0,4 %	-	1,3 %	3,6 %
2024	-	-0,7 %	-2,3 %	-0,3 %	-	-	-1,9 %	4,2 %
Ø = 1,3 %	1,1 %	0,3 %	0,0 %	-0,4 %	1,3 %	0,5 %	3,4 %	4,0 %

Preisen des konventionellen Tarifs liegen. Bei Betrachtung der Zeiträume vor 2021/2022 sind dynamische Tarife im Durchschnitt rund 30 Prozent günstiger. Aufgrund des Rebound-Effekts gestaltet sich eine Prognose für die Zukunft schwierig. Es erscheint jedoch realistisch, dass der dynamische Tarif auch in naher Zukunft 20 bis 30 Prozent günstiger als der konventionelle Tarif sein wird. Da die Ersparnis primär aus der Arbeitspreisdifferenz resultiert und diese bereits vor den „Krisenjahren“ ein stabiles Niveau aufwies, ist davon auszugehen, dass sich dieser Zustand erneut einstellt. Die prozentualen Einsparungen könnten künftig allerdings ebenso höher ausfallen, weil die Risikozuschlä-

ge der Stromversorgungsunternehmen aufgrund der steigenden relativen Volatilität des Spotmarktpreises infolge des wachsenden Anteils erneuerbarer Energien ebenfalls steigen könnten.

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse des Vergleiches der jährlichen Gesamtstromkosten bei dynamischem Tarif, die entstehen, wenn entweder stündlich oder täglich abgerechnet wird. Die Werte geben die prozentuale Abweichung in den Gesamtstromkosten der beiden Varianten wieder. Beispielsweise sind die Kosten der Baustelle A im Jahr 2015 bei stündlicher Abrechnung um 1,6 % höher als bei täglicher Abrechnung. Durchschnittlich liegen die stündlich abgerechneten Kosten 1,3 % über den täglich abgerech-

neten Kosten, die sich aus dem Tagesdurchschnittspreis am Spotmarkt ergeben würden. Lediglich Baustelle D zeigt in allen Jahren ein umgekehrtes Verhältnis.

Grundsätzlich variiert diese Korrelation je nach Jahreszeit: Im Winter ist sie überwiegend positiv (**Bild 7**), im Sommer überwiegend negativ (**Bild 8**). Die Gründe hierfür sind vielfältig, unter anderem können ein früheres morgendliches und späteres abendliches Preishoch, unterschiedliche tageszeitliche Temperaturverläufe mit daraus folgendem Einsatz von Heiz- und Klimageräten, Beleuchtung sowie Verschiebungen der Arbeitszeiten angeführt werden. Da der absolute Verbrauch im Winter höher ist als im Sommer, ergibt sich insgesamt eine geringe positive Korrelation (**Bild 7**, **Bild 8**).

Zusammenfassend zeigt sich, dass der Einsatz dynamischer Tarife gegenüber konventionellen Tarifen, ohne jegliche Veränderung des Verbrauchsverhaltens, meist zu Kosteneinsparungen im signifikanten zweistelligen Prozentbereich führt. Dabei resultiert die Kosteneinsparung primär aus der Arbeitspreisdifferenz (Beschaffung und Vertrieb) des dynamischen Tarifs. Folgendes Beispiel soll dies erläutern: Für Baustelle A im Ausführungszeitraum mit Startjahr 2015 betrug der durchschnittlich genutzte Arbeitspreis für Vertrieb im dynamischen Tarif 1,19 ct/kWh (2015) beziehungsweise 1,16 ct/kWh (2016). Zuzüglich des durchschnittlich genutzten Spotmarktpreises von 2,96 ct/kWh liegt der Arbeitspreisanteil für Beschaffung und Vertrieb im dynamischen Tarif insgesamt bei 4,14 ct/kWh. Im konventionellen wären es 7,48 ct/kWh (2015) beziehungsweise 7,27 ct/kWh (2016) gewesen.

Die stündliche Arbeitspreisdifferenz abzüglich des durchschnittlichen Spotmarktpreises kann in diesem Zusammenhang als Risikoprämie verstanden werden. Im Beispiel aus vorherigem Textabschnitt beträgt die Risikoprämie gut drei Cent pro Kilowattstunde (7,48 ct/kWh - 4,14 ct/kWh $\approx$ 3 ct/kWh). Diese wird im konventionellen Tarif zur Abdeckung des Preisschwankungsrisikos vom Endverbraucher an den Energieversorger gezahlt, während dieses Risiko beim dynamischen Tarif vom Anschlussnehmer selbst übernommen wird.

3.3 Szenario 2

Szenario 2 betrachtet die Auswirkungen, die bei einer geringfügigen zeitlichen Verschiebung des Bauablaufes in Zeiten geringer Stromkosten entstehen. Dabei wurde ausschließlich die Verschiebung von Vorgängen innerhalb eines Arbeitstages von einer Stunde betrachtet. Die Verschiebung über mehrere Tage wurde nicht betrachtet, da das Spotmarktpreisprofil je Werktag bis auf wenige Ausnahmen ähnlich ist. Die stromkostenbedingte Verschiebung von Bauleistungen auf Samstage oder Feiertage wird als nicht praxisnah eingeschätzt. Folgende Erkenntnis kann aus den Untersuchungen abgeleitet werden: Die Gegenüberstellung der Stromkosten im dynamischen Tarif bei einer einstündigen Verschiebung der Arbeitszeit nach hinten, im Vergleich zu Stromkosten aus Szenario 1 (dynamischer Tarif) zeigt, dass diese Verschiebung des Verbrauchsprofils keinen nennenswerten Einfluss auf die Höhe der Stromkosten hat. Die Auswirkungen bei den betrachteten acht Baustellen ergaben jeweils eine Veränderung von weniger als 2 % die gesamten Stromkosten (nur Anteil „Beschaffung“). Folgendes Beispiel soll dies weiterführend erläutern: Der verbindliche Spotmarktpreis wird in Anlehnung an die Darstellung in **Bild 2** an der Börse derzeit 24 Stunden im Voraus veröf-

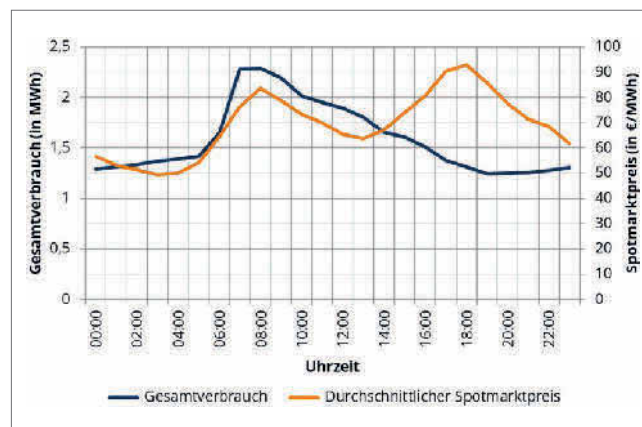


Bild 7. Verlauf des durchschnittlichen täglichen Gesamtverbrauchs und des Spotmarktpreises für den Winter 2024 der Baustelle E (Szenario 1).

Grafik: IBB-TUD, Datengrundlage [16]

Fig. 7. Course of average daily total consumption and spot market price for winter 2024 of construction site E (scenario 1).

Source: IBB-TUD, data basis [16]

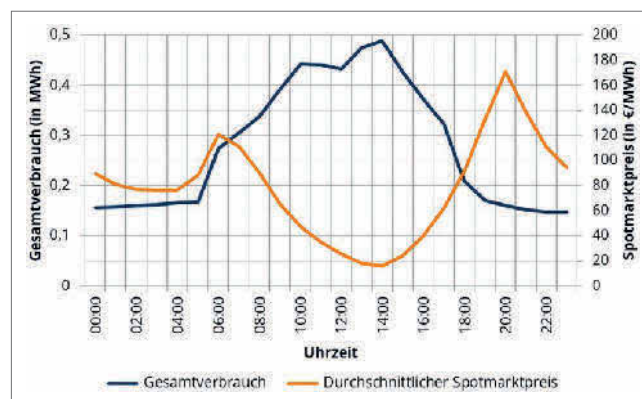


Bild 8. Verlauf des durchschnittlichen täglichen Gesamtverbrauchs und des Spotmarktpreises für den Sommer 2024 der Baustelle E (Szenario 1).

Grafik: IBB-TUD, Datengrundlage [16]

Fig. 8. Course of average daily total consumption and spot market price for summer 2024 of construction site E (scenario 1).

Source: IBB-TUD, data basis [16]

fentlicht. Demnach sind Preissprünge innerhalb von 2 Stunden üblicherweise von maximal circa 5 ct/kWh möglich. Bei einem beispielhaften stündlichen Stromverbrauch von 500 kWh ergibt dies Einsparungen in Höhe von 25,00 Euro/h. Dieser Wert steht in keinem Verhältnis zu dem Koordinations- und sonstigen Mehrkostenaufwand (Überstundenzuschläge usw.). Darüber hinaus gibt es für weiter in der Zukunft liegende Prognosen (> 24 h) ausschließlich einen Erwartungswert für den Strompreis, der in Anlehnung an **Bild 5** verläuft. Das „Warten“ auf günstige Strompreise stellt daher keine Alternative zur Reduzierung der Baukosten dar.

3.4 Szenario 3

Szenario 3 beinhaltet die Nutzung des dynamischen Stromtarifs ohne Anpassung des Bauablaufes an Zeiten mit niedrigen Strompreisen, jedoch mit Einsatz von signifikant dimensionierten Stromspeichern (mindestens 100 kWh). Dadurch soll der Bedarf an Strom vom tatsächlichen Netzbezug entkoppelt werden – in Zeiten mit niedrigen Strompreisen (z.B. in der Nacht) wird

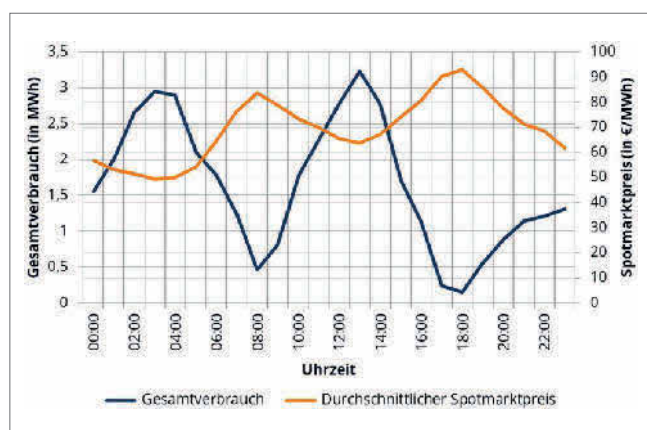


Bild 9. Verlauf des durchschnittlichen täglichen Gesamtverbrauchs (Bezugsmenge Baustelle) und des Spotmarktpreises für den Winter 2024 der Baustelle E (Szenario 3). Grafik: IBB-TUD, Datengrundlage [16]
Fig. 9. Course of average daily total consumption (reference quantity construction site) and spot market price for winter 2024 of construction site E (scenario 3). Source: IBB-TUD, data basis [16]

Strom bezogen und zu einem späteren Zeitpunkt (z. B. am nächsten Tag) verbraucht.

Aufgrund der Vielzahl technischer (z. B. Anschlussleistung, Speicherleistung, Speicherkapazität, Lade- und Entladekennlinien), organisatorischer (z. B. Anzahl der Speicher, Integration in das Baustellenetz, Arbeitszeiten) und wirtschaftlicher Randbedingungen (z. B. Tarif- und Verbrauchsgestaltung, Priorisierung zwischen Last- oder Preisspitzenkappung, Ladezyklusoptimierung) bringt der Einsatz mobiler Speicher jedoch mehrere Herausforderungen mit sich. Für eine realitätsnahe Optimierung ist die Interpretation und Auswertung als mathematische Funktion erforderlich, deren Komplexität Gegenstand separater wissenschaftlicher Arbeiten ist. [31-33] Stattdessen wird das Problem hier mit vereinfachten Annahmen approximiert. Grundlage sind tagspezifische Änderungen des Strombezugsprofils („kappen von Strombezugsspitzen“), bei denen der Strombezug aus Zeiten hoher Preise in Zeiten mit niedrigen Preisen verlagert wird. Dieses Vorgehen wird für 365 Tage im Jahr umgesetzt. Es werden die verfügbare Speicherkapazität, Speicherleistung und Anschlussleistung auf der Baustelle berücksichtigt. Folgende Vereinfachungen werden vorgenommen: Es wird eine Ladung/Entladung mit maximaler Leistung von 0 bis 100 Prozent Ladestand angenommen, konkrete Herstellerprodukte und technische Produkteigenschaften bleiben unberücksichtigt, die Optimierung erfolgt ausschließlich innerhalb eines Tages. Der Speicher ist zu Beginn und am Ende eines Zyklus vollständig leer und es wird eine starre Speichernutzungsstrategie angewendet. Die in diesem Szenario verwendete Methodik zur Modellierung des Speichereinsatzes basiert auf genannten vereinfachten Annahmen, die eine erste Abschätzung des wirtschaftlichen Potenzials ermöglichen, jedoch von einer vollständig optimierten beziehungsweise realistischen Speicherstrategie abweichen. Die Annahme linearer Lade- und Entladekennlinien ohne Berücksichtigung produktspezifischer Wirkungsgradverluste sowie die strikte Begrenzung der Optimierung auf 24-Stunden-Zyklen mit „Kappung von Strombezugsspitzen“ führen gegebenenfalls zu einer tendenziellen Überschätzung der erzielbaren Kostenreduktion. Die Ergebnisse sind daher als konservative Abschätzung des grundsätzlichen Potenzials zu verstehen.

Bild 9 zeigt am Beispiel der Baustelle E, dass mittels des Einsatzes mobiler Speicher eine deutliche Verlagerung der Verbräuche möglich ist. Der Gesamtverbrauch in Bild 8 (blaue Linie) ergibt sich aus dem Strombedarf der einzelnen Verbraucher auf der Baustelle (vgl. Bild 6) zuzüglich des zeitlich begrenzten Strombedarfs für das Laden des Stromspeichers. Erkennbar sind die Stromverbrauchsspitzen im Zeitraum 0:00 bis 6:00 Uhr und 10:00 bis 15:00 Uhr für das zweimalige Laden des Speichers pro Tag.

Als gemittelter Ergebnis über alle acht Baustellen konnte festgestellt werden, dass sich der in Szenario 1 berechnete Durchschnittswert von 1,3 % in Szenario 3 auf - 8,7 % verändert (Speichereinsatz reduziert die Korrelation zwischen Strombezugs- und Preisspitzen um ca. 10 %). Hintergrund ist der Strombezug in Zeiten überwiegend geringerer Preise. Im Vergleich zu Szenario 1 sind die dynamischen Stromkosten (nur für „Beschaffung“) um 4,1 % geringer. Damit ergibt sich eine signifikantere Vorteilhaftigkeit für dynamische Stromtarife.

Bei Umrechnung dieser Ersparnisse auf die Kilowattstunde Speicherkapazität pro Monat ergeben sich als Mittelwert über alle 8 Baustellen pro Jahr Kosteneinsparungen zwischen 0,19 Euro/kWh und 1,34 Euro/kWh Speicherkapazität und Monat.

Diese Einsparungen müssen den gemittelten Vorhaltekosten für den mobilen Stromspeicher gegenübergestellt werden. Diese betragen derzeit circa 25 bis 70 Euro/kWh pro Monat. Für einen 100-kWh-Speicher ergeben sich Vorhaltekosten in Höhe von circa (25 Euro/kWh · 100 kWh = 2 500 Euro/Monat). Damit ist erkennbar, dass die Vorhaltekosten für den mobilen Stromspeicher (25 bis 70 Euro/kWh pro Monat) deutlich über den einsparbaren Stromkosten (0,19 Euro/kWh bis 1,34 Euro/kWh pro Monat) liegen.

Fazit: Falls ein Stromspeicher aus anderen Gründen auf der Baustelle verfügbar ist, macht das Szenario 3 durchaus Sinn. Eine Bereitstellung ausschließlich aus Gründen der Stromkostenreduktion ist aus wirtschaftlichen Gründen nicht empfehlenswert.

3.5 Szenario 4

Das Szenario 4 beinhaltet die Festlegungen gemäß Szenario 3. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass eine Vielzahl an mittelgroßen Verbrauchern (z. B. Bagger und Rüttelplatten) mit elektrischem Antrieb und einem geräteintegrierten Kleinspeicher zum Einsatz kommen. Damit wird die Stromspeicherkapazität auf der Baustelle und der Entkopplungsgrad vom zeitkritischen Strombezug aus dem öffentlichen Netz erhöht.

Die Analyse der Baustellen F und G zeigt beispielsweise deutlich unterschiedliche Ergebnisse: Während auf Baustelle F der überwiegende Teil des Ladevorgangs nach Arbeitsende erfolgt, wird auf Baustelle G mehrmals täglich, insbesondere in Arbeitspausen, geladen. Während auf Baustelle G eine Reduktion von rund 5 % gegenüber dem Szenario 3 erreicht wird, fällt das Einsparpotenzial auf Baustelle F mit unter 2 % deutlich geringer aus. Auch die anderen Baustellen zeigen Einsparpotenziale in gleicher oder geringerer Höhe.

Insgesamt zeigt sich, dass ladeabhängige Verbraucher im Vergleich zu Energiespeichern ein begrenzteres Flexibilisierungspotenzial besitzen. Grund dafür ist die Tatsache, dass diese Geräte während ihrer Nutzung nicht geladen werden können und der Ladeprozess somit vom Einsatz des Gerätes abhängig ist. Dennoch können durch organisatorische Maßnahmen und zeitvaria-

bles Laden in Pausenzeit moderate Kostensenkungen erzielt werden. In diesem Zusammenhang macht es Sinn, die Steuerung der Ladeprozesse aller Verbraucher über eine separate Einheit zu automatisieren.

Wie bei Szenario 3 muss auch bei Szenario 4 festgestellt werden, dass die genannten Einsparpotenziale in Größenordnung unterhalb der Mehrkosten für die Anschaffung akkubetriebener Geräte liegen.

4 Fazit und Empfehlung für die Praxis

Die Analyse der acht untersuchten Baustellen zeigt, dass der Arbeitspreisanteil „Beschaffung“ eines dynamischen Stromtarifs im Vergleich zu einem konventionellen Tarif um durchschnittlich 15,1 % niedriger ausfällt. Da dieser Kostenbestandteil jedoch lediglich rund 20 % der gesamten Strombezugskosten ausmacht, relativiert sich dieser Vorteil erheblich. [5] Insgesamt liegen die Stromgesamtkosten des dynamischen Tarifs lediglich um 5,6 % unter denen des konventionellen Tarifs. Ob dieses exemplarisch ermittelte Einsparpotenzial einen signifikanten Einfluss auf den Gesamtverbrauch beziehungsweise die Gesamtkosten einer Baustelle hat, ist im Einzelfall projekt- und unternehmensspezifisch zu bewerten.

Die erzielten Ergebnisse basieren auf den aktuellen Preisrelationen zwischen den beiden Strombeschaffungsmodellen (dynamisch und konventionell). Infolge der Energiewende ist zu erwarten, dass der Preisunterschied zwischen den beiden Vertragsmodellen einer erheblichen Volatilität unterliegt. In diesem Fall ist die Vorteilhaftigkeit erneut zu bewerten. Nicht zuletzt orientiert sich der konventionelle Tarif an den Spotmarkt-Preisen und berücksichtigt deren Veränderung.

Eine zentrale Limitation der vorliegenden Untersuchung liegt in der begrenzten Anzahl analysierter Baustellen. Es ist daher hervorzuheben, dass die gewonnenen Ergebnisse nicht uneingeschränkt auf sämtliche Bauvorhaben übertragbar sind. Gleichwohl ermöglicht die differenzierte Betrachtung des zugrunde liegenden Fallspektrums eine grundsätzlich positive Einschätzung der Übertragbarkeit: Die einbezogenen Baustellen bilden eine große Bandbreite typischer Hochbaubaustellen ab, wie sie in der Praxis häufig anzutreffen sind. Durch die bewusste Berücksichtigung unterschiedlicher Projektgrößen, Bauweisen und organisatorischer Rahmenbedingungen erscheint eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf vergleichbare Hochbauprojekte grundsätzlich plausibel.

Die Analyse zeigt, dass sowohl die kurzfristige als auch die mittelfristige Anpassung von Bauprozessen an Phasen niedriger Strompreise keine signifikanten Kosteneinsparungen bewirkt und somit unter rein monetären Gesichtspunkten nicht zielführend ist. Gleiches gilt für die isolierte Anschaffung mobiler Stromspeicher mit dem primären Ziel der Kostensenkung. Sind entsprechende Stromspeicher jedoch bereits aus anderen Gründen auf der Baustelle vorhanden, kann deren Nutzung zur Entkopplung des gerätespezifischen Stromverbrauchs vom Netzbezug durchaus sinnvoll sein.

Das größte Einsparpotenzial liegt hingegen in der Sensibilisierung des Baustellenpersonals für einen bewussteren Umgang mit elektrischer Energie. Insbesondere die Bereitstellung tagesaktueller Preis- und Verbrauchsinformationen versetzt Bauleiter und Poliere in die Lage, durch vergleichsweise einfache Verhaltensanpassungen, wie eine Optimierung des Heiz- oder Gerätebetriebs, den Gesamtstromverbrauch signifikant zu reduzieren. Die hier-

durch erzielbaren Einsparungen übersteigen in vielen Fällen jene, die allein durch die Nutzung dynamischer Stromtarife realisiert werden können.

Es wird Marktakteuren daher empfohlen, versuchsweise bei einzelnen Bauvorhaben den Strombezug auf einen dynamischen Tarif umzustellen. Dadurch können mit wenig Risiko konkrete Erfahrungen gesammelt und die unternehmensindividuelle Vorteilhaftigkeit bewertet werden. Dieses Vorgehen macht umso mehr Sinn, wenn sowieso mobile Stromspeicher und größere Geräte mit integrierten Stromspeichern auf der Baustelle vorhanden sind.

Zukünftige Forschungsarbeiten sollten sich verstärkt mit der Entwicklung intelligenter Baustellenstromnetze, digitaler Steuerungs- und Optimierungslösungen sowie der Integration alternativer Energiequellen befassen, um sowohl die Wirtschaftlichkeit als auch die Netzdienlichkeit von Baustellen langfristig zu verbessern und einen übergeordneten gesamtwirtschaftlichen Nutzen zu erzielen.

LITERATUR

- [1] Tulke, J.; Eschenbruch, K.; Rimskaia-Korsakova, O. et al.: Automatisierte Baustelle – wie nah ist die Zukunft? In: Bauingenieur 100 (2025), Heft 11, S. 297-305. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-11-27.
- [2] Placzek, G.; Schwerdtner, P.: Vorüberlegungen bei der Anwendung robotischer Systeme – eine baubetriebliche Untersuchung für den Beton-3D-Druck. In: Bauingenieur 97 (2022), Heft 12, S. 423-433. doi.org/10.37544/0005-6650-2022-12-59.
- [3] Melzner, J.; Helbing, R.: Baubetrieb im Wandel: Strategien für das Bauen von morgen. In: Bauingenieur 100 (2025), Heft 7/8, S. 204-213. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-07-08-38.
- [4] Bernat, G.; Geppert, F.; Jocher, S. et al.: Ursachenanalyse von Kostensteigerungen bei kommunalen Hochbauprojekten. In: Bauingenieur 98 (2023), Heft 9, S. 296-303. doi.org/10.37544/0005-6650-2023-09-60.
- [5] Otto, J.; Jahn, A.; Wiel, R.: Lebenszyklusbezogene Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Bauteilen aus Carbonbeton. In: Bauingenieur 98 (2023), Heft 11, S. 361-367. doi.org/10.37544/0005-6650-2023-11-49.
- [6] Otto, J.; Maiwald, P.: Classification and automated quality assurance of 3D concrete printed surfaces. In: Automation in Construction, Vol. 164 (2024). doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105467.
- [7] Schach, R.; Otto, J.: Baustelleneinrichtung: Grundlagen – Planung – Praxishinweise – Vorschriften und Regeln. 4. überarbeitete Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2022.
- [8] Wattline: Was ist ein flexibler Stromtarif?, www.wattline.de/energie-wissen/flexibler-stromtarif/ [Zugriff am: 22.09.2025].
- [9] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: BDEW-Strompreisanalyse Juli 2025. www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/ [Zugriff am: 18.09.2025].
- [10] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Staatlich veranlasste Strompreisbestandteile. www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/strompreise-bestandteile-staatlich.html [Zugriff am: 21.09.2025].
- [11] E.ON: So setzt sich der Strompreis zusammen – einfach erklärt. www.eon.de/de/pk/strom/preisbildung-strom.html [Zugriff am: 21.09.2025].
- [12] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen: Bundesnetzagentur – Netzentgelte. www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/BK08/BK8_06_Netzentgelte/BK8_NetzE.html [Zugriff am: 18.09.2025].
- [13] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen: Aufschlag für besondere Netznutzung. www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/A_Z_Glossar/P/Par19_StromNEV_Umlage.html [Zugriff am: 18.09.2025].
- [14] Bundesfinanzministerium: Stromsteuer. www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Glossareintraege/S/stromsteuer.html [Zugriff am: 18.09.2025].
- [15] Netztransparenz: Spotmarktpreis nach § 3 Nr. 42a EEG. www.netztransparenz.de/de-de/Erneuerbare-Energien-und-Umlagen/EEG/Transparenzanforderungen/Marktprämie/Spotmarktpreis-nach-3-Nr-42a-EEG [Zugriff am: 18.09.2025].
- [16] EPEX Spot: Day-Ahead Preise & Viertelstundenauktion. www.emsys.de/epex-spot/ [Zugriff am: 26.01.2026].

- [17] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme: Börsenstrompreise | Energy-Charts. www.energy-charts.info/charts/price_spot_market/chart.htm?l=de&c=DE [Zugriff am: 05.11.2025].
- [18] Statistisches Bundesamt: Verbraucherpreisindex: Deutschland, Jahre., www-genesis.destatis.de/datenbank/online/statistic/61111/ta/61111-0001 [Zugriff am: 05.11.2025].
- [19] Statistisches Bundesamt: Verbraucherpreisindex: Deutschland, Monate. www-genesis.destatis.de/datenbank/online/table/61111-0002/table-toolbar [Zugriff am: 05.11.2025].
- [20] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen: Haushaltskundenpreise. www.smard.de/page/home/to-pic-article/211816/212170/haushaltskundenpreise [Zugriff am: 05.11.2025].
- [21] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen: Haushaltskundenpreise je Vertragsart. www.smard.de/page/home/topic-article/211816/212178/haushaltskundenpreise-je-vertragsart [Zugriff am: 05.11.2025].
- [22] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen: Haushaltskundenpreise je Vertragsart. www.smard.de/page/home/topic-article/211816/212178/haushaltskundenpreise-je-vertragsart [Zugriff am: 26.02.2026].
- [23] E.ON: Flexible Stromtarife. www.eon.de/de/eonerleben/flexible-stromtarife.html [Zugriff am: 18.09.2025].
- [24] Messstellenbetriebsgesetz (MsbG), §§ 34, 55, Fassung vom 2023.
- [25] Anjos, M. F.; Brotcorne, L.; Labbé, M. et al.: Load Scheduling for Residential Demand Response on Smart Grids, Boston, 2017.
- [26] Appl, C.: Reduktionspotential von Baustromverbrauch unter besonderer Berücksichtigung smarter Technologien. Wien, 2023.
- [27] Anvari-Moghaddam, A.; Abdi, H.; Mohammadi-Ivatloo, B. et al.: Microgrids: advances in operation, control and protection. Springer, Cham, 2021.
- [28] Saboori, H.; Jadid, S.: Mobile and self-powered battery energy storage system in distribution networks – Modeling, operation optimization, and comparison with stationary counterpart. In: Journal of Energy Storage, Vol. 42 (2021). doi.org/10.1016/j.est.2021.103068.
- [29] Böttcher, J.; Nagel, P.: Batteriespeicher: rechtliche, technische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen. De Gruyter, Berlin, Boston, 2018.
- [30] Cole, W.; Karmakar, A.: Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage: 2023 Update. In: Renewable Energy (2023).
- [31] Hu, R. L.; Skorupski, R.; Entriiken, R.; Ye, Y.: A Mathematical Programming Formulation for Optimal Load Shifting of Electricity Demand for

the Smart Grid. In: IEEE Transactions on Big Data, Vol. 6 (2020), Iss. 4, pp. 638-651.

- [32] Lee, S.-J.; Yoon, Y.: Electricity Cost Optimization in Energy Storage Systems by Combining a Genetic Algorithm with Dynamic Programming. In: Mathematics, Vol. 8 (2020), Iss. 9, p. 1526.

- [33] Baldick, R.; Chen, Y.; Huang, B.: Optimization Formulations for Storage Devices with Disjoint Operating Modes. In: Operations Research, Vol. 71 (2023), Iss. 6.

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Jens Otto

jens.otto@tu-dresden.de, 0351 463 34242

Dipl.-Ing. Florian Härtel

florian.haertel@tu-dresden.de, 0351 463 34242

Dipl.-Ing. Eric Leander Fabeck

baubetrieb@tu-dresden.de, 0351 463 34242

TU Dresden / Fakultät Bauingenieurwesen / Institut für Baubetriebswesen
George-Bähr-Str. 1, 01069 Dresden

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

Vorschau 9.2026



Die Widerlager der neuen Östricher Brücke wurden mit Mikropfählen in einem statisch optimierten Raster gegründet. Foto: FRIEDR. ISCHEBECK GmbH

Brückenbau

Die Östricher Brücke in Dorsten über den Wesel-Datteln-Kanal wird aufgrund schwerer Schäden ersetzt. Die neuen Widerlager werden mit Mikropfählen gegründet, die trotz eingeschränkter Logistik mit kleiner Gerätetechnik eingebaut werden konnten.

Schalen • Rüstern • Bewehren

Im Luxemburger Stadtteil Kirchberg entstand ein architektonisch anspruchsvoller Wasserturm. Runde Geometrien, große Höhen und enge Platzverhältnisse erforderten flexible Kletterschalungen, die präzises und sicheres Arbeiten bis 50 Metern Höhe ermöglichten.

Thermisch aktivierte Stahllösungen für die Energiewende

M. Kuhnhenne, V. Reger, B. Döring, H. Hachul

ZUSAMMENFASSUNG Die Transformation des Gebäudesektors hin zu klimaneutralen und perspektivisch klimapositiven Gebäuden erfordert neuartige integrale Lösungsansätze, welche Tragstruktur, Energieversorgung, thermische Speicherung und digitale Gebäudesimulation miteinander verbinden. Der vorliegende Beitrag untersucht das Potenzial energieaktivierter Stahlbausysteme zur Unterstützung der Wärme- und Energiewende im Bauwesen. Im Mittelpunkt stehen dabei Stahl-Energiepfähle als geothermisch aktivierte Gründungselemente, thermisch aktivierte Fassaden- und Hüllsysteme sowie Eisspeicher in Stahlleichtbauweise.

Neben konstruktiven und thermischen Optimierungsansätzen wird insbesondere die Entwicklung eines neuartigen thermischen Leistungsprüfstands für Stahl-Energiepfähle vorgestellt. Ergänzend werden hybride Fassadenlösungen mit integrierten photovoltaisch-thermischen Komponenten sowie modulare Eisspeichersysteme betrachtet.

Die Zusammenfassung aktueller Entwicklungen zeigt, dass Stahl aufgrund seiner hohen Wärmeleitfähigkeit, seiner industriellen Vorfertigungsmöglichkeiten sowie seiner Recyclingfähigkeit ein erhebliches Potenzial als Funktionswerkstoff für energieaktive Gebäude besitzt.

STICHWÖRTER

Stahl-Energiepfähle; Eisspeicher; PVT-Fassade; Energiewende

Thermally activated steel solutions for the energy transition

ABSTRACT The transformation of the building sector toward climate-neutral and, in the long term, climate-positive buildings requires innovative, integrated solutions that combine structural systems, energy supply, thermal storage, and digital building simulation. This paper examines the potential of energy-activated steel building systems to support the heat and energy transition in the construction industry. The focus is on steel energy piles as geothermally activated foundation elements, thermally activated facade and envelope systems, and ice storage systems in lightweight steel construction.

In addition to structural and thermal optimization approaches, the development of a novel thermal performance test bench for steel energy piles is presented in particular. In addition, hybrid facade solutions with integrated photovoltaic-thermal components and modular ice storage systems are examined. The results show that steel has considerable potential as a functional material for energy-active buildings due to its high thermal conductivity, its industrial prefabrication capabilities, and its recyclability.

1 Einleitung

Der Gebäudesektor zählt weltweit zu den ressourcen- und energieintensivsten Wirtschaftsbereichen [1]. Sowohl die Errichtung als auch der Betrieb von Gebäuden verursachen erhebliche Mengen an Treibhausgasemissionen und binden große Mengen mineralischer und energetischer Ressourcen [2]. Insbesondere die Wärmeversorgung von Gebäuden stellt weiterhin eine zentrale Herausforderung der Energiewende dar. Vor diesem Hintergrund gewinnen integrale Gebäudekonzepte zunehmend an Bedeutung, welche Energiegewinnung, -speicherung, -verteilung und -übergabe direkt in die Baukonstruktion integrieren [3].

Während im konventionellen Hochbau Tragstruktur und Gebäudetechnik häufig getrennt betrachtet werden, eröffnet die funktionale Aktivierung von Bauteilen neue Möglichkeiten für energieeffiziente und ressourcenschonende Gebäude [4]. Hierbei besitzt der Werkstoff Stahl aufgrund seiner hohen Wärmeleitfähigkeit, seiner guten Rezyklierbarkeit sowie seiner industriellen Fertigungsmöglichkeiten besondere Potenziale [5].

Insbesondere im Bereich geothermischer Gründungssysteme bieten Stahlbauteile die Möglichkeit, Tragfunktion und thermi-

sche Nutzung miteinander zu kombinieren [6, 7]. Gleichzeitig erlauben leichte Stahlkonstruktionen eine flexible Integration photovoltaischer und solarthermischer Systeme in Fassaden- und Dachflächen. Ergänzt durch thermische Speicherlösungen und digitale Simulationsmodelle entstehen hybride Gebäudesysteme [8], die sowohl energetisch als auch ökologisch optimiert werden können.

Der vorliegende Beitrag fasst aktuelle Entwicklungen energieaktivierter Stahlbausysteme im Rahmen von vier derzeit laufenden Forschungsprojekten zusammen und diskutiert deren Potenzial für klimapositive Gebäude. Neben neuartigen Stahl-Energiepfählen werden Eisspeicher in Stahlleichtbauweise, aktivierte Fassadensysteme sowie digitale Energiedemonstratoren betrachtet.

2 Stahl als Werkstoff für die Energiewende

Der Werkstoff Stahl wird traditionell vor allem unter tragwerksplanerischen Gesichtspunkten betrachtet. Im Zuge der Energiewende erweitert sich dieses Verständnis zunehmend hin zu einem multifunktionalen Werkstoff, der neben seiner tragen-



Bild 1. Stahl-Energiepfahl-Demonstrator für den Feldversuch (links: Sondenkopf nach dem Schweißen, rechts: Sondenfuß vor dem Schweißen, koaxiale Ausführung) Foto: RWTH Aachen
 Fig. 1. Steel Energy Pile Demonstrator for the field test (left: probe head after welding; right: probe base before welding, coaxial design)
 Source: RWTH Aachen

den Funktion zusätzlich energetische Aufgaben übernehmen kann [9].

Die hohe Wärmeleitfähigkeit von Stahl ermöglicht effiziente Wärmeübertragungsprozesse innerhalb aktivierter Bauteile. Gleichzeitig bietet die industrielle Vorfertigung günstige Voraussetzungen für die Integration hydraulischer, thermischer und sensorischer Komponenten in den Herstellungsprozess. Im Vergleich zu massiven mineralischen Baustoffen weisen Stahlbauteile zudem geringe Eigengewichte bei hohen Tragfähigkeiten auf, wodurch montagefreundliche und rückbaubare Konstruktionen ermöglicht werden [10].

Ein weiterer wesentlicher Vorteil liegt in der Kreislauffähigkeit des Werkstoffs. Stahl kann nahezu vollständig recycelt werden und besitzt bereits heute etablierte Stoffkreisläufe [11]. Insbesondere die schrottbasierte Elektrostahlproduktion ermöglicht deutliche Reduktionen der CO₂-Emissionen gegenüber konventionellen Hochofenprozessen. Mit zunehmender Nutzung erneuerbarer Energien und wasserstoffbasierter Direktreduktion wird zusätzlich eine weitere Verbesserung der Ökobilanz erwartet.

Durch die Kombination aus Tragfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, industrieller Fertigung und Recyclingfähigkeit eignet sich Stahl in besonderem Maße für energieaktive Gebäudekonzepte.

3 Thermisch aktivierte Stahlgründungen

3.1 Grundprinzip von Stahl-Energiepfählen

Stahl-Energiepfähle stellen eine Kombination aus Gründungselement und geothermischem Wärmetauscher dar [12]. Dabei wird das Erdreich als regenerative Wärme- beziehungsweise Kältequelle (präziser: Wärmesenke) genutzt. Innerhalb des Stahlpfahls zirkuliert ein Wärmeträgerfluid, welches thermische Energie mit dem umgebenden Boden austauscht. Im Gegensatz zu konventionellen Erdsonden können Energiepfähle die ohnehin erforderliche Gründung des Bauwerks nutzen. Dadurch entfällt ein wesentlicher Teil zusätzlicher Bohrmaßnahmen. Gleichzeitig er-

geben sich Vorteile hinsichtlich der Flächeneffizienz, da die geothermische Nutzung direkt unter dem Gebäude erfolgen kann. Die hohe Wärmeleitfähigkeit des Stahlmantels ermöglicht im Vergleich zu konventionellen Beton-Energiepfählen verbesserte Wärmeübergänge zwischen Sonde und Erdreich. Dies eröffnet Potenziale zur Steigerung der spezifischen Entzugsleistung.

3.2 Koaxial- und U-Sonden

Im Mittelpunkt aktueller Entwicklungen innerhalb des Forschungsprojektes „Optimierte Stahl-Energiepfähle für die Wärmewende“ stehen insbesondere koaxiale Stahl-Energiepfähle. Bei diesem System wird ein Innenrohr konzentrisch innerhalb des Stahlpfahls angeordnet. Der eigentliche rohrförmige Gründungspfahl wird dabei vom Wärmeträgerfluid durchströmt; es strömt im Ringspalt nach unten und im Innenrohr zurück zur Oberfläche (Bild 1).

Die thermische Leistungsfähigkeit solcher Systeme wird wesentlich durch die Geometrie des Ringspalts, die Strömungsführung sowie die Ausgestaltung von Sondenkopf und Sondenfuß beeinflusst [13]. Bisherige Untersuchungen innerhalb des Projektes zeigen, dass turbulenzfördernde Einbauten im Ringspalt den Wärmeübergang verbessern können. Hierzu zählen beispielsweise schraubenförmige Strukturen oder gezielte Umlenkungen im Bereich der Sondenanschlüsse (Bild 2).

Neben Koaxialsystemen werden weiterhin Single-U- und Doppel-U-Sonden [14] untersucht. Dabei steht insbesondere die Frage im Vordergrund, wie sich unterschiedliche Verfüllmaterialien des Ringspalts auf die thermische Leistungsfähigkeit auswirken. Neben Bentonit werden hierbei auch luft- und wassergefüllte Varianten betrachtet.

3.3 Konstruktion und Herstellung

Für Demonstratorbauwerke wurden Stahl-Energiepfähle mit unterschiedlichen Sondenkonfigurationen realisiert. Bisherige Systeme basieren in der Regel auf vorgefertigten Stahlrohrsegmenten, die erst auf der Baustelle mittels Muffen- oder Schweißverbindungen zusammengefügt werden. Diese modulare Bauweise ermöglicht flexible Pfahllängen sowie eine wasserdichte Ausbildung der Systeme, was insbesondere für die koaxiale, direkt durchströmte Ausführung von Bedeutung ist [15].

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts wurden alternativ vollständig vorgefertigte Stahl-Energiepfähle entwickelt und hergestellt [16]. Ziel dieses Ansatzes ist eine deutliche Reduktion des Montage- und Schweißaufwands auf der Baustelle sowie eine Vereinfachung und Beschleunigung der Installation.

Abhängig von den Baugrundverhältnissen erfolgt der Einbau entweder mittels konventioneller Rammverfahren oder in Kombination mit Vorbohrungen. Die Integration der Sondenkomponenten kann dabei sowohl während der Montage auf der Baustelle als auch bereits im Zuge der werkseitigen Vorfertigung erfolgen, wodurch kompakte und montageoptimierte Systeme realisiert werden können.

3.4 Rückbau und Kreislaufwirtschaft

Ein wesentlicher Vorteil von Stahl-Energiepfählen liegt in ihrer Rückbaubarkeit. Unter geeigneten Bedingungen können diese

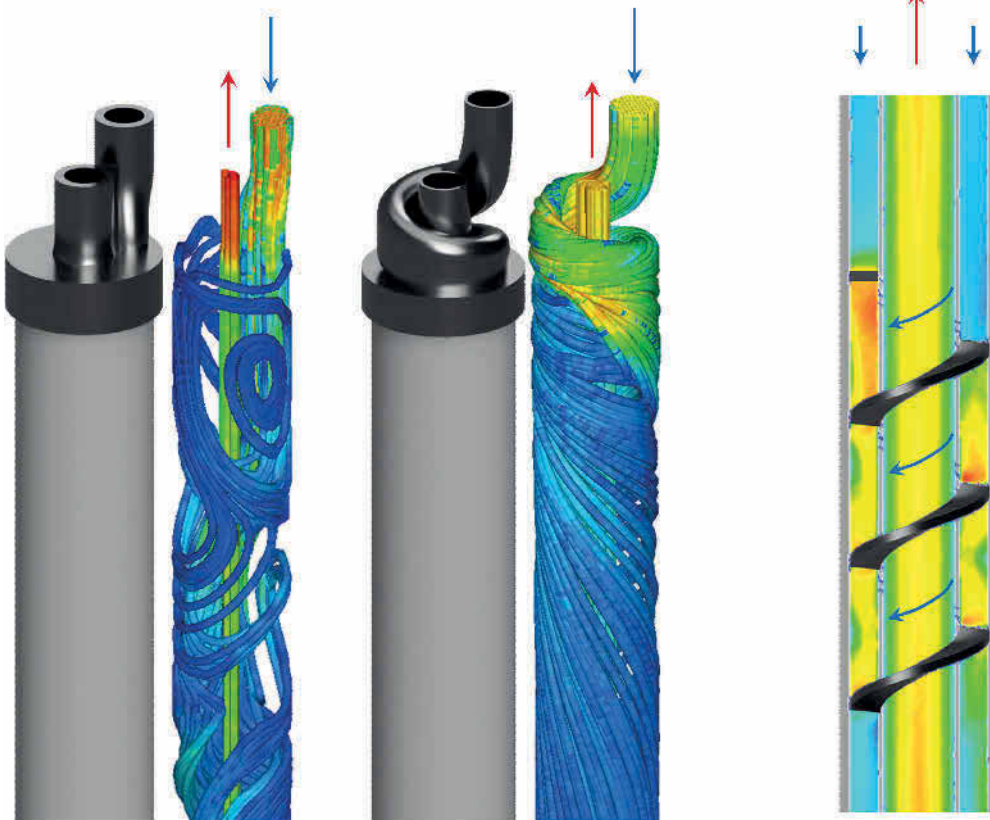


Bild 2. CFD-Simulationen (links: Sondenkopfvarianten, rechts: Schraubenvariante im Ringraum)
 Grafik: FH Aachen
 Fig. 2. CFD simulations (left: probe head variants; right: screw variant in the annular space)
 Source: FH Aachen

extrahiert und wiedergenutzt werden, wodurch Material- und Ressourceneinsatz reduziert werden können [17].

Untersucht wurden sowohl hydraulische Ziehverfahren als auch Verfahren des Freibohrens bestehender Pfähle (**Bild 3**). Die Versuche zeigen, dass ein nahezu rückstandsloser Rückbau möglich ist.

Durch die Wiederverwertung des zurückgebauten Stahls ergeben sich zusätzliche ökologische Vorteile. Gleichzeitig wird die spätere Nachnutzung von Grundstücken erleichtert. Die Rückbaubarkeit stellt damit einen wichtigen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft im Bauwesen dar.

4 Thermischer Leistungsprüfstand für Stahl-Energiepfähle

4.1 Motivation

Die experimentelle Untersuchung geothermischer Systeme als Feldversuch im Realmaßstab ist mit erheblichen technischen und genehmigungsrechtlichen Aufwendungen verbunden [18]. Gleichzeitig liefern Feldversuche häufig nur begrenzt vergleichbare Ergebnisse, da Bodenaufbau, Feuchtegehalt und Randbedingungen standortspezifisch variieren.

Vor diesem Hintergrund wurde innerhalb des beschriebenen Forschungsprojektes ein neuartiger thermischer Leistungsprüfstand entwickelt, der reproduzierbare Untersuchungen von Stahl-Energiepfählen unter kontrollierten Laborbedingungen im Maßstab 1:2 ermöglicht. Die Kenntnis von Temperatur und Aufbau des Bodens im Prüfstand erlaubt es, den Beitrag von Konstruktion und Betriebsweise der Sonde im Hinblick auf die thermischen Leistungsdaten von den Merkmalen des Erdreiches zu separieren und auch zu reproduzieren.

4.2 Aufbau des Prüfstands

Das Kernstück des Prüfstands bildet ein thermisch isolierter Versuchsbehälter, welcher mit definiertem Bodenmaterial befüllt wird. Der zu untersuchende Stahl-Energiepfahl wird zentrisch innerhalb des Behälters angeordnet (**Bild 4**).

Über einen sekundären Heizkreislauf können definierte Bodentemperaturen eingestellt werden, sowohl für stationäre als auch instationäre Lastfälle. Ergänzend erfolgt die kontinuierliche Erfassung thermischer und hydraulischer Betriebsgrößen. Hierzu



Bild 3. Rückbau mittels Freibohren (links: Bohrvorgang, rechts: Bergung)
 Foto: RWTH Aachen
 Fig. 3. Removal using open-hole drilling (left: drilling process, right: retrieval) Source: RWTH Aachen

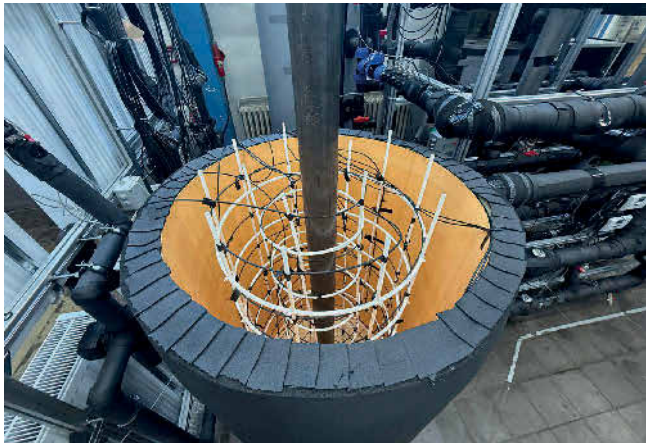


Bild 4. Versuchsbehälter des thermischen Leistungsprüfstands inkl. Stahl-Energiepfahl und DTS-System vor der Befüllung mit Bodenmaterial
Foto: FH Aachen

Fig. 4. Test cell of the thermal performance test bench, including steel energy pile and DTS system, prior to filling with soil Source: FH Aachen

zählen insbesondere Temperaturen, Volumenströme und Druckverluste.

Zur detaillierten Analyse der Temperaturverteilung im Boden kommt ein Distributed-Temperature-Sensing-System (DTS) zum Einsatz [19]. Die faseroptische Messtechnik erlaubt eine hochauflösende Temperaturerfassung innerhalb des Versuchskörpers.

Ein wesentliches Merkmal des Prüfstands ist die Einbindung eines Hardware-in-the-Loop-Systems. Dadurch können nicht physisch vorhandene Sondenabschnitte numerisch simuliert und in Echtzeit in den Versuchsbetrieb integriert werden [20]. Dies ermöglicht die realitätsnahe Untersuchung einzelner Sondenbereiche wie Sondenkopf oder Sondenfuß.

4.3 Untersuchungsziele

Mithilfe des Prüfstands sollen unterschiedliche Sondengeometrien, Strömungskonzepte und Betriebsweisen systematisch unter-

sucht werden. Dabei stehen insbesondere folgende Fragestellungen im Mittelpunkt:

- Einfluss von Innen- und Außendurchmessern coaxialer Systeme
- Optimierung von Sondenkopf und Sondenfuß
- Untersuchung turbulenzfördernder Einbauten
- Bewertung verschiedener Verfüllmaterialien
- Analyse transients Betriebszustände
- Entwicklung standardisierter Prüfverfahren

Die Kombination aus experimenteller Untersuchung und numerischer Simulation (**Bild 5**) eröffnet neue Möglichkeiten zur Optimierung geothermischer Gründungssysteme.

5 Hybride energieaktive Stahlbausysteme

5.1 Aktivierte Fassaden- und Hüllsysteme

Neben geothermischen Gründungssystemen besitzen auch Fassaden- und Dachflächen erhebliche Potenziale zur Energiegewinnung [21]. Insbesondere Industrie- und Gewerbebauten verfügen über große nutzbare Gebäudehüllen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Energetisch aktivierte Bauelemente aus Stahl zur flächigen Energieübertragung“ werden profilintegrierte Fassadenelemente aus Stahl untersucht, welche photovoltaische (PV) und solarthermische Funktionen kombinieren (PVT) sowie die Einbindung an weitere Technologien (z. B. Energiepfähle, Eisspeicher und Wärmepumpe) gewährleisten. Dabei kommen sowohl reine Luftkollektoren als auch photovoltaisch-thermische Hybridsysteme zum Einsatz (**Bild 6**).

Gekantete oder konvex geformte Stahlprofile ermöglichen eine optimierte Ausrichtung zur Sonneneinstrahlung sowie eine Reduzierung von Eigenverschattung. Gleichzeitig können Luft- oder Flüssigkeitskollektoren in die Fassadenkonstruktion integriert werden.

Besondere Potenziale ergeben sich durch die Verbindung von Stahlleichtbau und organischen PV-Systemen. Diese weisen geringe Flächengewichte und flexible Gestaltungsmöglichkeiten auf [22].

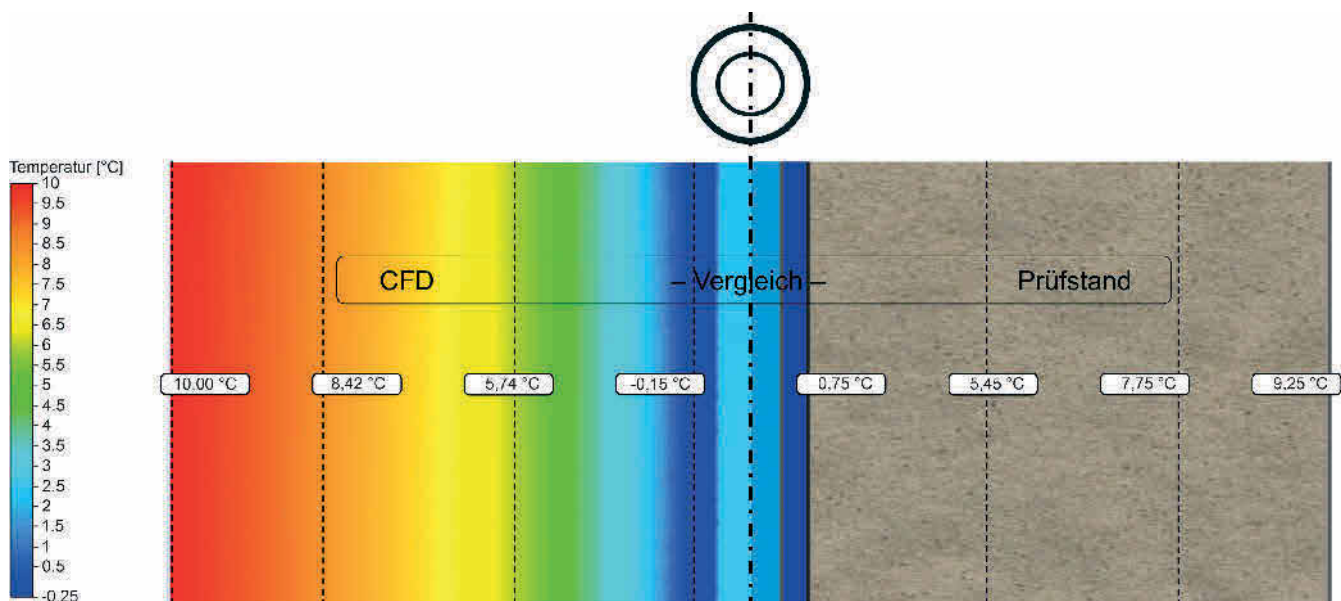


Bild 5. Exemplarische Kombination (links: CFD-Simulation, rechts: Messwerte aus dem Leistungsprüfstand) Grafik: FH Aachen

Fig. 5. Exemplary combination (left: CFD simulation, right: test bench measurements) Source: FH Aachen

5.2 Eisspeicher in Stahlleichtbauweise

Ergänzend zur Energiegewinnung gewinnen thermische Speicherlösungen zunehmend an Bedeutung. Eisspeicher nutzen die beim Phasenwechsel von Wasser freiwerdende Kristallisationsenergie und ermöglichen dadurch hohe Speicherkapazitäten bei vergleichsweise geringen Temperaturdifferenzen [23].

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Eisspeicher in Stahlleichtbauweise als Komponente für netzdienliche Gebäude“ werden Eisspeicher in Stahlleichtbauweise untersucht. Dabei dienen Stahl-Sandwichkonstruktionen als hochgedämmte Speicherhüllen mit tragender Funktion und zur Stabilisierung (Bild 7).

Zudem kommen modulare Speicherbehälter zum Einsatz, welche flexibel angeordnet und skaliert werden können. Diese sind mit gekapseltem Phasenwechselmaterial (PCM, in diesem Fall Eis) gefüllt [24]. Das PCM kann je nach Betriebsmodus gefroren oder aufgetaut werden.

Die Kombination aus Eisspeicher und regenerativer Energiegewinnung mithilfe einer Wärmepumpe, ermöglicht eine netzdienliche und lastflexible Betriebsweise von Gebäuden.

6 Digitaler Energiedemonstrator und BIM-Integration

Zur integralen Bewertung energieaktiver Gebäudekonzepte wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „Virtueller Energiedemonstrator zur Untersuchung und Bewertung von Stahllösungen für klimapositive Gebäude“ ein virtueller Energiedemonstrator entwickelt. Dieser verbindet die einzelnen Komponenten – Stahl-Energiepfähle, Fassadensysteme, Eisspeicher und Gebäudetechnik – innerhalb eines digitalen Gesamtmodells.

Grundlage bildet ein BIM-basiertes Gebäudemodell, welches geometrische, thermische, ökologische und wirtschaftliche Informationen verknüpft (Bild 8). Parametrische Modelle ermöglichen die automatisierte Untersuchung unterschiedlicher Varianten und Betriebsstrategien (Bild 9).

Durch standardisierte Datenschnittstellen können einzelne Komponenten flexibel ausgetauscht und miteinander verglichen werden. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für simulationsgestützte Planungs- und Optimierungsprozesse.

7 Potenziale für klimapositive Gebäude

Die vorgestellten Entwicklungen zeigen, dass energieaktive Stahlbausysteme einen wesentlichen Beitrag zur Dekarbonisierung des Gebäudesektors leisten können. Durch die Mehrfachnutzung tragender Bauteile entstehen synergetische Systeme, welche Energiegewinnung, Speicherung und Tragfunktion miteinander verbinden.

Besondere Potenziale ergeben sich bei Industrie- und Gewerbebauten mit großen Dach- und Fassadenflächen sowie hohem Wärme- und Kühlbedarf. Die Kombination geothermischer Systeme mit aktivierten Gebäudehüllen und thermischen Speichern ermöglicht eine deutliche Reduktion fossiler Energieverbräuche.

Darüber hinaus unterstützen digitale Simulations- und BIM-Methoden die ganzheitliche Optimierung solcher Systeme über den gesamten Lebenszyklus.

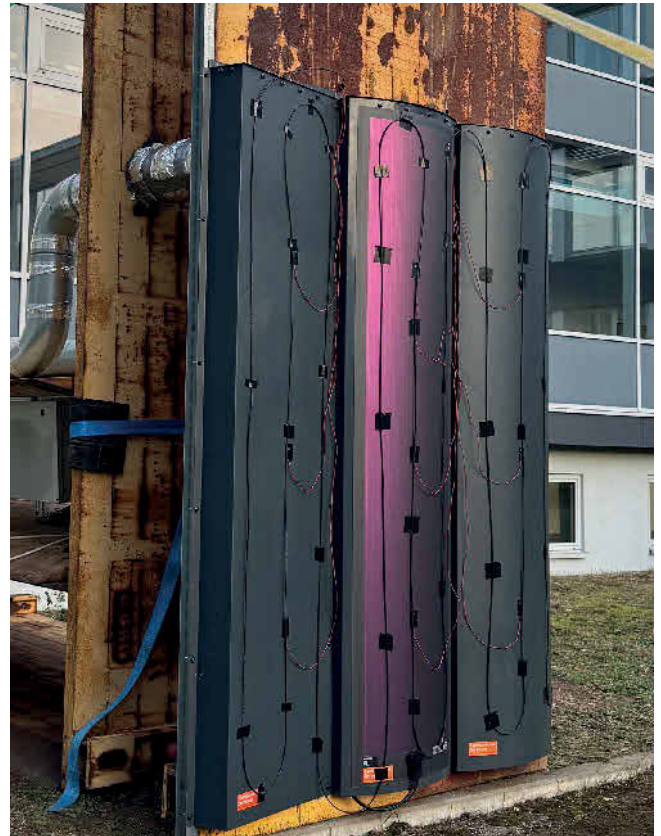


Bild 6. Aufbau des Versuchsstands zur Ermittlung des thermischen Ertrags (außen: Luftkollektoren aus Stahlprofilen, mitte: Hybridkollektor inklusive organischer PV) Foto: FH Aachen
 Fig. 6. Setup of the test rig for determining thermal output (outer section: air collectors made of steel profiles; center: hybrid collector including organic PV) Source: FH Aachen



Bild 7. Planungsskizze des Eisspeicher-Demonstrators Foto: RWTH Aachen
 Fig. 7. Conceptual sketch of the ice storage demonstrator
 Source: RWTH Aachen

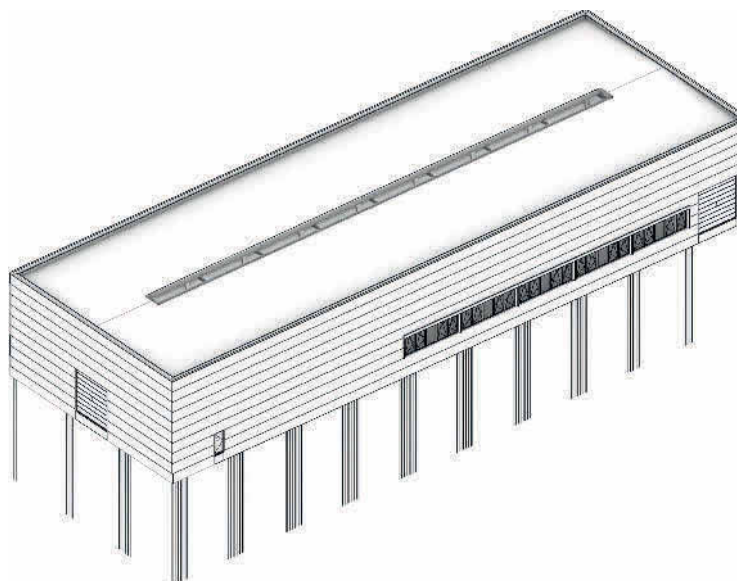


Bild 8. Virtueller Demonstrator
(Darstellung Hallen-Referenzbau
inklusive Stahl-Energiepfähle)
Grafik: RWTH Aachen
Fig. 8. Virtual demonstrator
(illustration of a reference
building, including steel energy
piles) Source: RWTH Aachen

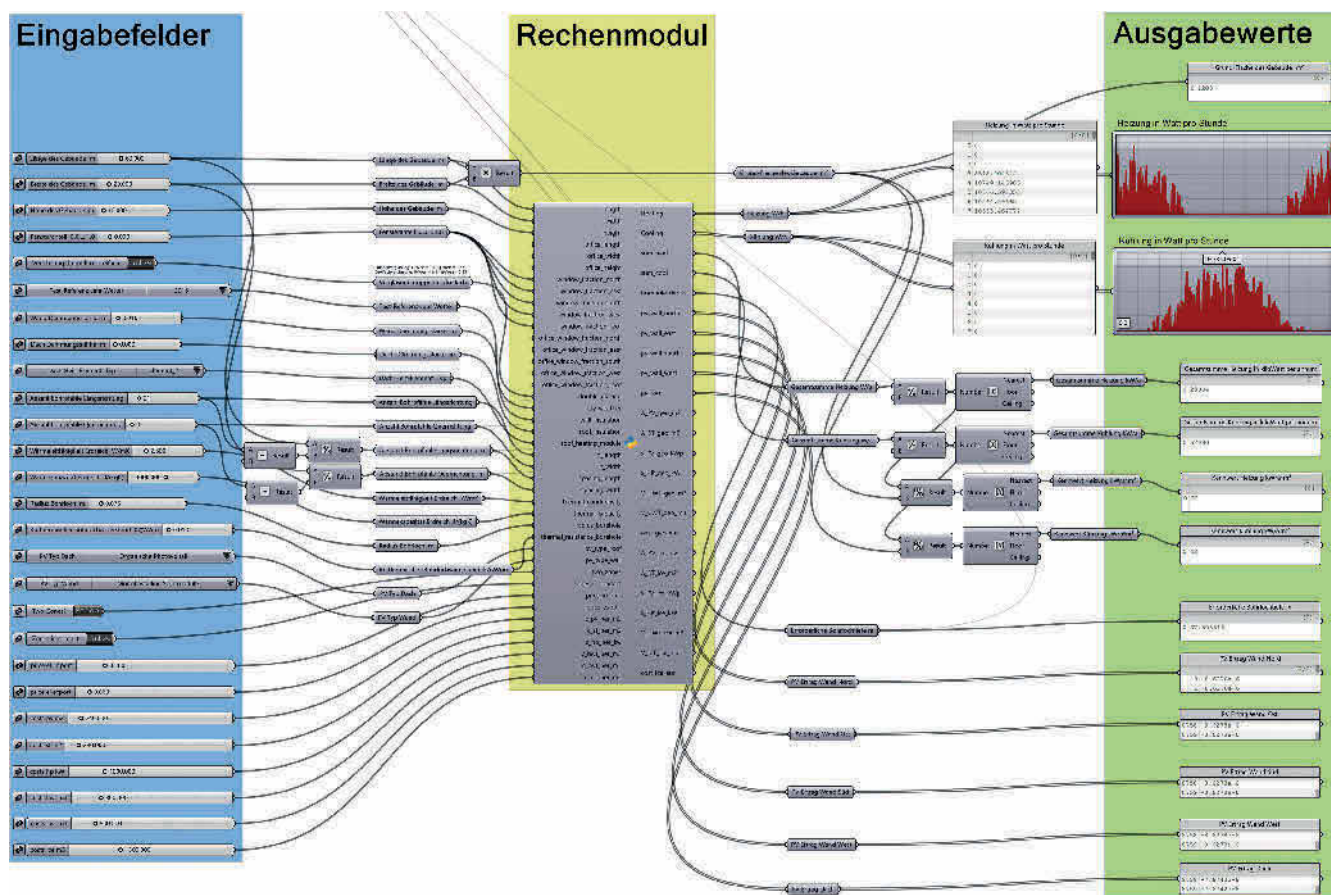


Bild 9. Virtueller Demonstrator (Ausschnitt) mit Eingabefeldern (blau), Rechenmodul (gelb) und Ausgabewerten (grün) Grafik: RWTH Aachen
Fig. 9. Virtual demonstrator (detail) with input fields (blue), calculation module (yellow), and output values (green) Source: RWTH Aachen

8 Zusammenfassung und Ausblick

Energieaktive Stahlbausysteme eröffnen neue Perspektiven für klimapositive Gebäude und die zukünftige Wärmeversorgung des Gebäudesektors. Insbesondere Stahl-Energiepfähle besitzen aufgrund ihrer Doppelfunktion als Trag- und Energiesystem erhebliche Potenziale.

Die Entwicklung eines neuartigen thermischen Leistungsprüfstands ermöglicht erstmals reproduzierbare Laboruntersuchungen unterschiedlicher Energiepfahlkonzepte unter realitätsnahen Bedingungen. Ergänzt durch aktivierte Fassaden, Eisspeicher und digitale Gebäudemodelle entstehen hybride Gebäudesysteme mit hoher energetischer Effizienz.

Zukünftige Forschungsarbeiten innerhalb der beschriebenen Projekte werden sich insbesondere auf die Standardisierung von Prüfverfahren, die Optimierung transienter Betriebsstrategien sowie die integrale Bewertung ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte konzentrieren.

Langfristig könnten energieaktive Stahlbausysteme einen wichtigen Baustein für klimapositive und kreislauffähige Gebäude darstellen.

DANKSAGUNG

Die IGF-Vorhaben 52-55 LN der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA) wurden über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert.

Die Autoren möchten sich bei allen unterstützenden Firmen im Rahmen von Sachspenden und Unterstützung im Projektausschuss bedanken.

LITERATUR

- [1] Huang, L.; Krigsvoll, G.; Johansen, F. et al.: Carbon emission of global construction sector. *In: Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81 (2018), pp. 1906-1916. doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.001.
- [2] Sartori, I.; Hestnes, A. G.: Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *In: Energy and Buildings*, Vol. 39 (2007), Iss. 3, pp. 249-257. doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.001.
- [3] Zhi, Y.; Sun, T.; Gao, D. et al.: Achieving net zero energy heating by integrating the building envelope as a thermal battery. *In: iScience*, Vol. 27 (2024), Iss. 6, p. 109892. doi.org/10.1016/j.isci.2024.109892.
- [4] Yousefi, M.; Pahn, M.: Case study on multifunctional building parts: Integration, simulation, and performance analysis in sustainable residential environments. *In: Journal of Building Engineering*, Vol. 100 (2025), p. 111807. doi.org/10.1016/j.job.2025.111807.
- [5] Soares, N.; Santos, P.; Gervásio, H. et al.: Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review. *In: Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 78 (2017), pp. 194-209. doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.066.
- [6] Chang, H.; Gan, Z.; Zhao, H. et al.: Thermo-mechanical behavior of steel pipe energy piles under thermal imbalance cycles. *In: Construction and Building Materials*, Vol. 447 (2024), p. 138026. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138026.
- [7] Adinolfi, M.; Rotta Loria, A. F.; Laloui, L. et al.: Experimental and numerical investigation of the thermo-mechanical behaviour of an energy sheet pile wall. *In: Geomechanics for Energy and the Environment*, Vol. 25 (2021), p. 100208. doi.org/10.1016/j.gete.2020.100208.
- [8] Syafaruddin; Arum Sari, Y.; Said, S. M.: A Review of Building Integrated Photovoltaic-Thermal (BIPV/T) Systems: Current and Potential Technology Development. *In: Journal of Engineering Science and Technology Review*, Vol. 14 (2021), Iss. 4, pp. 197-206. doi.org/10.25103/jestr.144.24.
- [9] Moynihan, M. C.; Allwood, J. M.: The flow of steel into the construction sector. *In: Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 68 (2012), pp. 88-95. doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.08.009.
- [10] Feldmann, M.; Bartsch, H.; Kuhnhenne, M. et al.: Wiederverwendung im Stahl- und Metallleichtbau. *In: Kuhlmann, U. (Hrsg.): 2023 Stahlbau Kalender*. Wiley, 2023, S. 651-684.
- [11] Bartsch, H.: Reuse of reclaimed steel components in construction: A systematic review of potential, challenges and future directions. *In: Structures*, Vol. 80 (2025), p. 110057. doi.org/10.1016/j.istruc.2025.110057.
- [12] Reger, V.; Kuhnhenne, M.; Döring, B. et al.: Stahl-Energiepfähle – aus der Erde ins Labor. *In: Stahlbau* 94 (2025), Heft 6, S. 334-342. doi.org/10.1002/stab.202500046.
- [13] Bakhshi, N.; Rashidi, S.; Rafee, R.: Vertical coaxial ground heat exchangers with teeth and grooves on their outer pipes; a hydrothermal investigation. *In: Applied Thermal Engineering*, Vol. 243 (2024), p. 122570. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122570.
- [14] Lee, S.-R.; Yoon, S.; Go, G.-H. et al.: Evaluation of Heat Exchange Rate for Different Types of Ground Heat Exchangers. *In: The Twenty-third International Offshore and Polar Engineering Conference* (2013).
- [15] Blanke, T.; Reger, V.; Döring, B. et al.: Koaxiale Stahlenergiepfähle. *In: Stahlbau* 90 (2021), Heft 6, S. 417-424. doi.org/10.1002/stab.202100028.
- [16] Reger, V.; Mehrrens, P.; Kuhnhenne, M. et al.: Energieaktivierte Stahllösungen für klimapositive Gebäude. *In: Stahlbau* 93 (2024), Heft 11, S. 717-726. doi.org/10.1002/stab.202400059.
- [17] Sangiuliano, T.; Staseff, D.; Chatterji, P. K. et al. (eds.): Reuse of Existing Steel Pile Foundations – Greenock Creek Bridge, Walkerton, Ontario, Canada. Zenodo, 2023.
- [18] Jiang, G.; Lin, C.; Shao, D. et al.: Thermo-mechanical behavior of driven energy piles from full-scale load tests. *In: Energy and Buildings*, Vol. 233 (2021), p. 110668. doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110668.
- [19] Liu, H.; Stumpf, A. J.; Lin, Y.-F. F. et al.: Distributed Thermal Response Multi-Source Modeling to Evaluate Heterogeneous Subsurface Properties. *In: Ground water*, Vol. 61 (2023), Iss. 2, pp. 224-236. doi.org/10.1111/gwat.13154.
- [20] Langerova, E.; Zavrel, V.; Matuska, T.: Hardware-in-the-loop testbed for evaluating heat pump energy flexibility control strategies: Design, evaluation, and experiment. *In: Applied Thermal Engineering*, Vol. 265 (2025), p. 125595. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125595.
- [21] Şirin, C.; Goggins, J.; Hajdukiewicz, M.: A review on building-integrated photovoltaic/thermal systems for green buildings. *In: Applied Thermal Engineering*, Vol. 229 (2023), pp. 120607. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120607.
- [22] Cui, J.: Research on the Application Potential of Flexible Photovoltaic Materials in Building Integration. *In: European Journal of Engineering and Technologies*, Vol. 1 (2025), Iss. 2, pp. 72-83. doi.org/10.71222/95xgy424.
- [23] Altuntas, M.; Erdemir, D.: An investigation on potential use of ice thermal energy storage system as energy source for heat pumps. *In: Journal of Energy Storage*, Vol. 55 (2022), pp. 105588. doi.org/10.1016/j.est.2022.105588.
- [24] Senobar, H.; Wahab, A.; Ahmadi, M. et al.: Phase change materials (PCMs) for thermal energy storage systems. *In: Materials Today Sustainability*, Vol. 34 (2026), pp. 101369. doi.org/10.1016/j.mtsust.2026.101369.

Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Markus Kuhnhenne

kuhnhenne@stb.rwth-aachen.de

Dr.-Ing. Vitali Reger

reger@stb.rwth-aachen.de

RWTH Aachen University
Institut für Stahlbau
Lehr- und Forschungsgebiet Nachhaltigkeit
im Metallleichtbau
Mies-van-der-Rohe-Str. 1, 52074 Aachen

Prof. Dr.-Ing. Bernd Döring

doering@fh-aachen.de
FH Aachen University of Applied Sciences
Lehrgebiet Gebäudetechnik
Bayernallee 9, 52066 Aachen

Prof. Dr.-Ing. Helmut Hachul

helmut.hachul@fh-dortmund.de
FH Dortmund
Lehr- und Forschungsgebiet Architektur und Metallbau
Emil-Figge-Straße 40, 44227 Dortmund

Nachruf

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer (1956–2026)

Am 7. März 2026 verstarb Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer im Alter von 69 Jahren nach schwerer Krankheit im Kreise seiner Familie. Mit ihm verliert das Bauingenieurwesen einen herausragenden Vertreter des Konstruktiven Ingenieurbaus, einen deutschlandweit anerkannten Brückenexperten, engagierten Hochschullehrer und geschätzten Kollegen.

Reinhard Maurer wurde am 17. März 1956 in Nordhessen geboren. Nach einem Studium an der Fachhochschule Gießen nahm er 1979 das Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Hochschule Darmstadt auf, das er 1984 erfolgreich als Diplom-Ingenieur abschloss. Bereits während des Studiums zeigte sich seine besondere Begabung für den Konstruktiven Ingenieurbau. So erinnert sich der damalige Assistent am Institut für Massivbau, Jürgen Schnell, dass Reinhard Maurer in der Klausur zum Hauptdiplom als einziger eine besonders anspruchsvolle Aufgabe zur Zwang- und Mindestbewehrung vollständig korrekt löste. Seine berufliche Laufbahn begann Reinhard Maurer in der Brückenbauabteilung des Ingenieurbüros König und Heunisch (heute KHP König und Heunisch Planungsgesellschaft). Hier arbeitete der junge Ingenieur an einem Forschungsvorhaben des Bundesministeriums für Forschung und Technologie zur Zuverlässigkeit von Spannbetonbrücken mit. Anhand von Bestandsaufnahmen zu 43 großen Tal- und Flussbrücken sollten die Auswirkungen von Rissen auf die Dauerhaftigkeit und Ermüdung von Spannbeton geklärt werden. Abweichend vom damaligen Kenntnisstand sind nach dieser Untersuchung auch bei Spannbetonbrücken Risse zulässig, wenn durch eine ausreichende Mindestbewehrung aus Betonstahl die Rissbreiten begrenzt werden. Die Erkenntnisse dieses Vorhabens fanden Eingang in das von der Fachwelt vielbeachtete Buch „Spannbeton: Bewehrung im Brückenbau“ der Autoren König, Maurer und Zichner. Spätestens mit diesem Projekt wurde bei Reinhard Maurer die große Leidenschaft für den Brückenbau geweckt, die seinen weiteren beruflichen Werdegang prägen sollte.

Im Jahr 1988 kehrte Reinhard Maurer als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Prof. Gert König an das Institut für Massivbau der Technischen Hochschule Darmstadt zurück. Neben Aufgaben in der Lehre befasste er sich dort intensiv mit dem Verbundbau, einer damals noch neuartigen Bauweise. Mit der Dissertation „Grundlagen zur Bemessung von Betongurten bei Verbundträgern“ wurde er 1992 erfolgreich zum Dr.-Ing. promoviert. Als nächster logischer Schritt für den frisch Promovierten folgte der Wechsel in die Bauindustrie. Bei der Hauptniederlassung der Philipp Holzmann AG in Berlin wurde er Leiter des Technischen Büros. Aus der Vielzahl der Projekte werden hier zwei Bauvorhaben genannt. Beim Wiederaufbau der denkmalgeschützten Oberbaumbrücke, einer 155 m langen Bogenbrücke über die Spree mit sieben Feldern und sechs Fahrspuren für den Straßenverkehr und die Hochbahn, wurden mehrere Sondervorschläge des Technischen Büros unter der Leitung von Reinhard Maurer umgesetzt. Auch beim Ring Center in Berlin Friedrichshain mit 40 000 m² Geschossfläche waren es seine Sondervorschläge zur Ausführung in Verbundbauweise, die zur Auftragsvergabe an Holzmann führten.

Nach dem Niedergang der Philipp Holzmann AG kehrte Reinhard Maurer im Jahr 2000 zu KHP zurück, um zusammen mit



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer (1956–2026)
Foto: R. Lückmann/Fotostudio Fotospaß Bochum

Nguyen Viet Tue die Niederlassung Leipzig als geschäftsführender Gesellschafter aufzubauen. Aufgrund seiner breiten Praxis im Konstruktiven Ingenieurbau erlangte er schon bald die Anerkennung als Prüfenieur in den Fachrichtungen Massivbau und Metallbau. Kurz danach erhielt Reinhard Maurer den Ruf auf die Universitätsprofessur für Betonbau an der Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dortmund, den er 2002 annahm. Nach mehreren Jahren des Pendelns zwischen Dortmund und Leipzig gründete er schließlich 2005 eine Niederlassung von KHP in Dortmund, die ihren Schwerpunkt im Brückenbau hat. Seit 2010 war Reinhard Maurer zudem als Prüfenieur für bautechnische Nachweise im Eisenbahnbau durch das Eisenbahn-Bundesamt anerkannt.

Die enge und kontinuierliche Verzahnung von universitärer Tätigkeit, Ingenieurpraxis und baustatischer Prüfung ist charakteristisch für das gesamte berufliche Wirken von Reinhard Maurer. Über mehr als zwei Jahrzehnte leitete er den Lehrstuhl Betonbau der Technischen Universität Dortmund und prägte ihn in Forschung und Lehre nachhaltig. Seine Lehrveranstaltungen zeichneten sich durch analytische Klarheit, konstruktives Verständnis und einen hohen Praxisbezug aus. Generationen von Studierenden vermittelte er nicht nur Bemessungsverfahren, sondern ein tiefes Verständnis für Tragmechanismen und ingenieurmäßige Verantwortung.

Einen besonderen Schwerpunkt seiner wissenschaftlichen und ingenieurpraktischen Tätigkeit bildete der Brückenbau, neben Rissbreitenbegrenzung und Mindestbewehrung war es insbeson-

dere die Tragfähigkeitsbewertung und Nachrechnung bestehender Beton- und Spannbetonbrücken. Reinhard Maurer war ein ausgewiesener und deutschlandweit geschätzter Experte für Fragen der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit älterer Spannbetonüberbauten. In zahlreichen, von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) geförderten Forschungsprojekten leistete er grundlegende Beiträge beispielsweise zur Weiterentwicklung der Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie). Sowohl seine Kollegen Konrad Zilch, Günter Rombach, Oliver Fischer und Josef Hegger als auch der Obmann Gero Marzahn schätzten im Ausschuss zur Nachrechnungsrichtlinie gleichermaßen seine hohe fachliche Kompetenz sowie vor allem seine freundliche und aufrichtige Art im Umgang mit anderen Menschen.

Ausgangspunkt seiner Arbeiten war die vielfach beobachtete Diskrepanz zwischen rechnerisch ermittelten Defiziten – insbesondere bei geringer Querkraftbewehrung – und dem tatsächlichen Tragverhalten zahlreicher, über Jahrzehnte bewährter Brückenbauwerke. Durch großmaßstäbliche Versuche an Spannbetondurchlaufträgern an der TU Dortmund sowie durch analytische und numerische Untersuchungen gelang es ihm und seinem Team, zusätzliche Betontraganteile infolge der Druckbogenwirkung systematisch zu erfassen. Das maßgeblich von ihm mitentwickelte Erweiterte Druckbogenmodell stellte dabei einen wichtigen Schritt zu einer realitätsnäheren und zugleich sicheren Erfassung der Querkrafttragfähigkeit dar. Seine Arbeiten zur kombinierten Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion (M+V+T), zur Anrechenbarkeit von Spanngliedern auf die Torsionslängsbewehrung sowie zur Anwendung wissenschaftlicher Verfahren in der Nachrechnungsstufe 4 haben die Bewertungspraxis im Bestand nachhaltig beeinflusst.

Ein weiteres Thema war die Ermüdungsfestigkeit von Spannbeton bei sehr hohen Lastwechselzahlen. In interdisziplinärer Zusammenarbeit mit der Fakultät Statistik der TU Dortmund untersuchte er einbetonierte Spannstähle experimentell bis 10^8 Lastzyklen und entwickelte statistisch fundierte Prognoseverfahren zur Abschätzung der Restlebensdauer. Diese Arbeiten sind von unmittelbarer Bedeutung für die Bewertung hoch beanspruchter Brücken im Bundesfernstraßennetz.

Die Ergebnisse seiner Forschung fanden breite Resonanz in nationalen und internationalen Fachzeitschriften sowie in Tagungsbänden und Fachbüchern. Sie flossen in Regelwerke wie die Nachrechnungsrichtlinie, den Nationalen Anhang zu DIN EN 1992-2 oder die BEM-ING Teil 2 ein und trugen dazu bei, die Erhaltungs- und Instandsetzungsplanung sowie den Neubau von Spannbetonbrücken wirtschaftlich und sicher zu gestalten. Neben seiner Forschungs- und Lehrtätigkeit engagierte sich Reinhard Maurer intensiv in der Normungsarbeit. Er wirkte in zahlreichen Gremien des NABau mit und war viele Jahre stellvertretender Obmann des NA 005-07-20 AA „Betonbrücken“. Seine wissenschaftliche Kompetenz und praktische Erfahrung brachte er zusätzlich auf europäischer Ebene insbesondere im Bereich des Brückenbaus ein. Sein Ziel war stets, fundierte ingenieurwissenschaftliche Erkenntnisse in praxistaugliche Regelwerke zu überführen.

Auch nach der Übergabe des Lehrstuhls blieb er diesem eng verbunden. In der Phase des Übergangs stand er – trotz bereits deutlich eingeschränkter Gesundheit – jederzeit hilfsbereit und kooperativ zur Seite. Seine große Bereitschaft, Erfahrungen weiterzugeben, Kontakte zu vermitteln und konstruktive Hinweise zu geben, war Ausdruck seiner außergewöhnlichen Kollegialität und seiner tiefen Verbundenheit mit „seinem“ Lehrstuhl.

Reinhard Maurer verband fachliche Exzellenz mit Integrität, Verlässlichkeit und menschlicher Zugewandtheit. Für seine Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter war er ein fordernder und zugleich fördernder akademischer Lehrer, für die Praxis ein geschätzter Partner, für viele ein Mentor und Ratgeber.

Mit seinem Tod verliert das Bauingenieurwesen eine prägende Persönlichkeit des Betonbrückenbaus und einen hochgeschätzten Kollegen. Sein Wirken in Forschung, Lehre, Normung und Prüfung wird fortbestehen – in seinen Veröffentlichungen, in den von ihm beeinflussten Regelwerken, in den zahlreichen von ihm begleiteten Projekten und nicht zuletzt in den vielen Ingenieurinnen und Ingenieuren, die durch ihn ausgebildet und geprägt wurden. Unser Mitgefühl gilt seiner Ehefrau Sabine und seiner Familie.

Josef Hegger, Aachen

Marcus Ricker, Dortmund

7. Brückenkolloquium

Das 7. Brückenkolloquium der Technische Akademie Esslingen greift die aktuellen Herausforderungen des Brückenbaus auf und bietet am 29. und 30. September 2026 eine zentrale Plattform für den fachlichen Austausch im Brückenbau. Die Veranstaltung findet vor Ort in Ostfildern sowie live-online statt.

Im Fokus stehen unter anderem die Erhaltung und Verlängerung der Restnutzungsdauer von Brückenbauwerken, der Ersatzneubau und moderne Bauprozesse, innovative Baustoffe und Ertüchtigungsverfahren sowie digitale Methoden wie BIM, digitale Zwillinge und KI-gestützte Bauwerksprüfung. Weitere Schwerpunkte bilden digitale Innovationen in Inspektion und Überwachung, Betreiberstrategien, Lebenszyklusmanagement sowie aktuelle Regelwerke und Nachweisverfahren.

Das Vortragsprogramm umfasst rund 70 Plenar- und Fachvorträge in parallelen Sessions. Thematisch reicht das Spektrum von Spannungs-

risskorrosion, faseroptischer Messtechnik und UHFB über digitale Planung, modulare Bauprozesse und Verkehrseinwirkungen bis hin zu Betreiberstrategien. Ergänzt wird das Programm durch einen parallel stattfindenden Workshop zur digitalen Bauwerksprüfung.

Die Tagung richtet sich an Ingenieurinnen und Ingenieure aus Planung, Entwurf und Ausführung, an Bauunternehmen, Verwaltungen, Behörden, Forschungseinrichtungen, Bauleiter, Sachverständige sowie Bauwerkseigentümer und -betreiber. Angesprochen sind zudem Anbieter von Lösungen in den Bereichen Bauwerksdiagnose, -überwachung, Instandsetzung, Ertüchtigung und Digitalisierung im Brückenbau.

Eine begleitende Fachausstellung bietet Raum für Marktübersicht und Austausch. Den Abschluss des ersten Veranstaltungstages bildet ein gemeinsamer Abendempfang, der zusätzliche Möglichkeiten zur Vernetzung eröffnet.

www.tae.de

IMPRESSUM

Bauingenieur

ISSN 0005-6650, 101. Jahrgang 2026

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Christian Glock (Sprecher)
 Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion,
 Rheinland-Pfälzische Technische Universität
 Kaiserslautern-Landau (RPTU)
 Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Dietmar Adam
 Institut für Geotechnik, TU Wien
 Prof. Dr.-Ing. habil. Sven Klinkel
 Lehrstuhl für Baustatik und Baudynamik
 RWTH Aachen
 Prof. Dr.-Ing. Jürgen Melzner
 Professur Baubetrieb und Bauverfahren,
 Bauhaus-Universität Weimar
 Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Hartmut Pasternak
 Lehrstuhl für Stahl- und Holzbau
 Brandenburgische Universität (BTU)

Alle Hauptaufsätze sind durch die
 Herausgeber begutachtet und rezensiert.

Organschaft

Der Bauingenieur ist offizielle Organzeitschrift
 der VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik.

Redaktion

Heike van Ooyen, Chefredakteurin
 Telefon: +49 211 6103-484
hvanooyen@vdi-fachmedien.de
 Dipl.-Phys.-Ing. Udo Schnell
 Redaktionsleitung VDI Fachmedien
 Telefon: +49 211 6103-104
uschnell@vdi-fachmedien.de
 Anne Katrin Sarrazin, Redaktionsassistentin
 Telefon: +49 211 6103-171
asarrazin@vdi-fachmedien.de
 Patricia Blömers, Redaktionsassistentin
 Telefon: +49 211 6103-172
pbloemers@vdi-fachmedien.de

Autorenhinweise/Veröffentlichungsgrundlagen:
www.bauingenieur.de

Pressemitteilungen bitte an

bauingenieur@vdi-fachmedien.de

Verlag

VDI Fachmedien GmbH & Co. KG
 Unternehmen für Fachinformationen
 VDI-Platz 1, 40468 Düsseldorf
 Postfach 10 10 22, 40001 Düsseldorf
 Commerzbank AG
 SWIFT/BIC-Code: DRES DE FF 300,
 IBAN: DE69 3008 0000 0212 1724 00

Geschäftsführung

Beatrice Gerner

Layout

Alexander Reiß

Leitung Media Sales

Petra Seelmann-Maedchen
 Telefon: +49 211 6188-191
pmaedchen@vdi-nachrichten.com

Anzeigenverkauf

Verlagsbüro Siegfried Pachinger
 Telefon: +49 521 977998-80
 Fax: +49 521 977998-90
sven.pachinger@verlagsbuero-pachinger.de

Es gilt der Anzeigentarif Nr. 55
 vom 1. Januar 2026.

Vertrieb und Leserservice

Leserservice VDI Fachmedien
 65341 Eltville
 Telefon: +49 6123 9238-202
 Fax: +49 6123 9238-244
vdi-fachmedien@vuserice.de

Bezugspreis

10 Ausgaben jährlich
 (davon 1/2 und 7/8 als Doppelausgabe)
 Jahresabonnement: € 573,- (E-Paper € 491,-)
 VDI-Mitglieder: € 515,70 (E-Paper € 441,90)
 nur für persönliche Mitglieder
 Studenten: € 142,- (E-Paper € 123,-)
 gegen Studienbescheinigungen
 Preise Inland inkl. MwSt., Ausland exkl. MwSt.
 zzgl. Versandkosten (Inland: € 18,-,
 Ausland: € 40,-, Luftpost auf Anfrage)
 Einzelheft: € 59,- inkl. MwSt. zzgl. Versandkosten

Die Mindestlaufzeit beträgt 12 Monate.
 Im Anschluss an die Mindestlaufzeit ist das
 Abonnement jeweils zum Monatsende
 kündbar.

Druck

Möller Pro Media GmbH
 Zeppelinstraße 6, 16356 Ahrensfelde

Copyright

Die Zeitschrift und alle in ihr enthaltenen
 Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich
 geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen
 Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne
 Zustimmung des Verlages unzulässig und
 strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen,
 Übersetzungen, Mikroverfilmungen
 und die Einspeicherung und Verarbeitung in
 elektronischen Systemen. Für unverlangt
 eingesandte Manuskripte kann keine Gewähr
 übernommen werden.

Weitere Informationen:
www.bauingenieur.de

Auflage IVW-geprüft



Alle
auch als
E-Paper



10 Ausgaben pro Jahr
Jahresabopreis: 573,00 EUR
zzgl. Versandkosten
E-Paper-Abo: 491,00 EUR



6 Ausgaben pro Jahr
Jahresabopreis: 517,00 EUR
zzgl. Versandkosten
E-Paper-Abo: 444,00 EUR



9 Ausgaben pro Jahr
Jahresabopreis: 271,00 EUR
zzgl. Versandkosten
E-Paper-Abo: 233,00 EUR



9 Ausgaben pro Jahr
Jahresabopreis: 612,00 EUR
zzgl. Versandkosten
E-Paper-Abo: 525,00 EUR



6 Ausgaben pro Jahr
Jahresabopreis: 299,00 EUR
zzgl. Versandkosten
E-Paper-Abo: 257,00 EUR

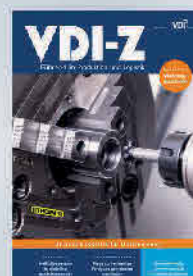
**Die erste
Adresse für
Technikwissen:
VDI Fachmedien**



6 Ausgaben pro Jahr
Jahresabopreis: 304,00 EUR
zzgl. Versandkosten
E-Paper-Abo: 261,00 EUR



6 Ausgaben pro Jahr
Jahresabopreis: 388,00 EUR
zzgl. Versandkosten
E-Paper-Abo: 334,00 EUR



9 Ausgaben pro Jahr
Jahresabopreis: 324,00 EUR
zzgl. Versandkosten
E-Paper-Abo: 279,00 EUR

Die VDI Fachmedien bieten Ihnen eine breite Palette renommierter Fachzeitschriften aus den Bereichen **Bau, Konstruktion/Produktion, Logistik, Energie und Umwelt**. In direkter Anbindung an den VDI, das größte technisch-wissenschaftliche Netzwerk für Ingenieur*innen Deutschlands. Unsere Autor*innen berichten über Innovationen und Hintergrundwissen in ihrem jeweiligen Fachgebiet. Und das jederzeit praxisorientiert, ohne den wissenschaftlichen Background aus dem Blick zu verlieren.



Technikwissen für Ingenieur*innen - jetzt auswählen und bestellen:

T +49 6123 9238-202

E vdi-fachmedien@vuservice.de

vdi-fachmedien.de

Inlandsbruttopreise – Ausland auf Anfrage

**Jetzt Bauingenieur
abonnieren:
20% Rabatt erhalten**

**10
Ausgaben
pro Jahr**



Sie wollen als Ingenieur oder Ingenieurin immer auf dem neuesten Stand sein, wenn es um zukunftsweisende und einzigartige Fachinformationen für die Planung und Ausführung aktueller Bauprojekte für das gesamte Bauingenieurwesen geht? Dann abonnieren Sie jetzt die Zeitschrift Bauingenieur, Organ des VDI-Fachbereichs Bautechnik. **Auf das Jahresabo erhalten Sie im ersten Jahr 20% Rabatt – statt 573,00 EUR zahlen Sie nur 458,40 EUR zzgl. 18,00 EUR Versandkosten innerhalb Deutschlands!**¹⁾



Technikwissen für Ingenieur*innen – jetzt abonnieren:

T +49 6123 9238-202
E vdi-fachmedien@vuservice.de
vdi-fachmedien.de

¹⁾ Angebot nur gültig für Neu-Abonnenten und Neu-Abonnentinnen.