

Ökobilanzen im Stahlbetonbau

Vergleichende Studie zwischen Halbfertigteildecken und Spannbeton-Fertigdecken am Beispiel eines gebauten Gebäudekomplexes

Prof. Dr.-Ing. Andreas Heuer, M. Sc. Nikolas Leber, M. Sc. Pascal Ottis, B. Sc. Frederic Sobek

Abstract

In this report, the Life Cycle Assessment (LCA) is examined in relation to the entire supporting structure of a building complex. A newly built student hostel, of which the ceilings are made of prestressed concrete parts is compared to the structure for the case, where the ceilings are made of conventional reinforced semi-precast parts.

It is shown that the supporting structure of a building with ceilings made of prestressed hollow core slabs has a significant better LCA-balance than this of a conventional construction.

Finally suggestions are made to improve the LCA-balance of steel concrete structures due to a better statical planning.

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag untersucht die Auswirkungen verschiedener Bauweisen auf die Ökobilanz eines Gebäudekomplexes. Im Mittelpunkt der Untersuchungen steht die Tragkonstruktion. Die Basis für die Untersuchungen bildet ein neu errichtetes Wohngebäude dessen Geschossdecken aus Spannbeton-Fertigteilen bestehen. Vergleichend wird die Ökobilanz des Tragwerkes bestimmt für den Fall, dass die Decken aus konventionellen schlaff bewehrten Halbfertigteilen erstellt sind.

Es wird gezeigt, dass das Tragwerk mit Decken aus Spannbetonhohldielen eine erheblich bessere Ökobilanz besitzt im Vergleich zur konventionellen Bauweise.

Am Ende werden Vorschläge erarbeitet, wie sich die Ökobilanz von Stahlbetonbauteilen deutlich verbessern lässt.

1 Einführung

Im Zusammenhang mit einem Forschungsprojekt zu Carbon-Beton-Decken wurde zu Beginn des Jahres 2021 ein Artikel des Forschungsteams unter Prof. Heuer veröffentlicht [1], der sich mit den CO₂-Einsparpotentialen von schlaff bewehrten Fertigteildecken befasst. Die darin aufgezeigten Einsparungen in Bezug auf das GWP waren für die Autoren selbst überraschend hoch im Vergleich mit Ortbetondecken bzw. Halbfertigteildecken. Bemerkenswert hierbei ist, dass das CO₂-Volumen, welches durch den Transport der Fertigteile – auch über große Lieferstrecken – verursacht wird, in einem nahezu vernachlässigbaren Rahmen liegt. Es konnte festgestellt werden, dass der größte Emissionsanteil einer Stahlbetondecke mit Abstand auf die eingebrachte Betonmasse zurückzuführen ist. Somit ist für Hohldielenelemente – ob vorgespannt

oder schlaff bewehrt - prinzipiell ein Vorteil im Hinblick auf die Emissionsbilanz zu erwarten.

Seitens des Bundesverband Spannbeton Fertigdecken e.V. wurde der Wunsch an die Autoren herangetragen, die Untersuchungen zu Rohstoffverbräuchen und zum GWP auf einen bestehenden Gebäudekomplex auszuweiten und herauszufinden, wie sich der Einbau von leichteren Spannbetondecken auf das Gesamttragwerk, auf den Ressourceneinsatz und auf die CO₂-Bilanz auswirken im Vergleich zur Ausführung mit schlaff bewehrten Halbfertigteilenelementen bzw. mit Decken aus Ortbeton.

Hintergrund des vertieften Interesses sind die zunehmende Verknappung der Ressourcen, die der Bauindustrie zur Verfügung stehen, sowie der große Einfluss der Zement- und Stahlbranche auf den Ausstoß von Treibhausgasen.

So werden durch den Gebäudesektor laut einem UN-Bericht aus dem Jahr 2019 38% der weltweiten Treibhausgasemissionen verursacht [2]. Einen großen Anteil bei Errichtung der Gebäude muss hierbei der Zementproduktion zugeschrieben werden, die eine der Voraussetzungen für die Betonherstellung darstellt.

Gerade die Bauindustrie verfügt mit ihrem enormen Ressourcenbedarf über ein gewaltiges Potential in Bezug auf die Einsparung von Treibhausgasen. Dieses Potential gilt es Schritt für Schritt herauszustellen und in der Wirtschaft zu etablieren. Klimaschutz im Bauwesen beginnt damit, über ressourcenschonende Bauweisen nachzudenken.

Aus langjährigen tragwerksplanerischen Erfahrungen kann gesagt werden, dass die CO₂-Thematik bei der Planung im Bauingenieurwesen zumindest in Deutschland bis vor wenigen Jahren praktisch keine Rolle gespielt hat. Zumeist standen und stehen die wirtschaftlichen Aspekte auf Seiten von Bauherren und Planern einer nachhaltigen Bauweise entgegen – obwohl Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit sich nicht von vornherein widersprechen müssen.

Nach Ansicht der Autoren sollten die Beiträge für einen wirksamen Klimaschutz aus allen Bereichen des gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Lebens kommen und dürfen nicht nur in den „ganz großen Innovationen“ der Zukunft gesehen werden. Deswegen werden gegen Ende des Artikels Möglichkeiten aufgezeigt, wie sich Stahlbetontragwerke nachhaltiger planen lassen, als in der derzeitigen Praxis üblich.

2 Grundlagen – Treibhausgase, Klimakrise, politischer Rahmen

Die Thematik der Nachhaltigkeit ist im 21. Jahrhundert inzwischen allgegenwärtig. Sie begleitet die Gesellschaft in nahezu allen Bereichen des Lebens und bestimmt die Zukunft, die der Mensch auf diesem Planeten hat. Auch die Bauwirtschaft muss sich verstärkt der Umsetzung des Nachhaltigkeitsgedankens widmen. Hinsichtlich des sich abzeichnenden Klimawandels und der fortschreitenden Ressourcenknappheit, ist das Bauwesen gefordert, durch Innovation an einem nachhaltigen Wandel mitzuwirken [3].

Nachhaltigkeit im Bauwesen

Nachhaltigkeit erfordert im Bauwesen, sämtliche Maßnahmen zu ergreifen, um Ressourcen zu schonen und den Energieverbrauch und die Emission von umwelt- und klimaschädlichen Produkten so gering wie möglich zu halten. Entsprechend dem Leitfaden Nachhaltiges Bauen [4] des BdMI wird Nachhaltigkeit in der Branche in drei Dimensionen unterteilt:

Ökonomie beinhaltet die Optimierung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses im kompletten Lebenszyklus eines Bauwerks. Dabei werden nicht nur Anschaffungs- und Errichtungskosten betrachtet, sondern insbesondere auch die Baufolgekosten, die während der Nutzungsphase des Bauwerks entstehen. Über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes können die Baufolgekosten die Errichtungskosten um ein Mehrfaches übersteigen. Mithilfe einer umfangreichen Lebenszyklus-Kosten-Analyse ist es möglich, Einsparpotenziale zu identifizieren und umzusetzen [3; 4].

Ökologie umfasst alle Ziele, um die Einflüsse auf die globale und lokale Umwelt so gering wie möglich zu halten. Im Vordergrund steht hier der optimierte Einsatz von Baustoffen und Baumaterialien, ein geringer Flächenverbrauch, die Erhaltung der biologischen Vielfalt und eine Minimierung des Energie- und Wasserverbrauchs. Betrachtet werden dabei sämtliche Energie- und Stoffströme, beginnend mit der Gewinnung von Ressourcen, über den Transport und Einbau, bis hin zum Rückbau sowie die Einwirkungen auf die lokale und globale Umwelt, die aus dem Energieverbrauch bei der Herstellung der Baustoffe und der zukünftigen Gebäudenutzung resultieren [4].

Der **Soziokultur** „werden Schutzziele zugeordnet, die sowohl die soziale und kulturelle Identität als auch das Wertempfinden des Menschen beeinflussen.“ [4] Beim Bau von Gebäuden muss dafür Sorge getragen sein, dass Funktionalität und Nutzerzufriedenheit des Gebäudes sichergestellt und eventuelle kulturelle Werte wiedergespiegelt werden, um die Zweckmäßigkeit des Gebäudes über den gesamten Nutzungszeitraum zu gewährleisten. Zu den Schutzzielen gehören somit immaterielle Werte, wie die Bewahrung von Sicherheit und Behaglichkeit sowie die ästhetische und kulturelle Bedeutung des Gebäudes im Stadtbild [4].

Im Rahmen des Forschungsprojektes, über das hier berichtet wird, wurden vor allem der ökologische Aspekt der Nachhaltigkeit und die Möglichkeiten des ressourcenschonenden Bauens, sowie des Einsparens von Treibhausgasen betrachtet.

CO₂-Ausstoß in der Baubranche

Einen großen Anteil am Klimawandel hat die Emission von Treibhausgasen, wobei in erster Linie das Kohlenstoffdioxid genannt wird. Nicht zu unterschätzen sind die Einflüsse weiterer klimaschädlicher Gase wie beispielsweise Methan und Lachgas, die zusammen mit fluorierten Gasen zum Kohlenäquivalent zusammengefasst werden.

Einen wesentlichen Faktor im Bauwesen stellt die Verwendung von Beton als Grundbaustoff dar. Sein Einfluss auf die CO₂-Bilanz ist auch im bewehrten Beton bedeutend größer als der Beitrag des Betonstahls, wie weiter hinten gezeigt wird.

Tabelle 2-1 zeigt beispielhaft das CO₂-Äquivalent verschiedener Betongüten auf. Bei Betrachtung der Zusammensetzung verschiedener Betone ist festzuhalten, dass das Treibhausgaspotential nahezu vollständig mit dem Zementgehalt korreliert. Die Auswahl einer höheren Betonfestigkeitsklasse erhöht das CO₂-Aufkommen etwa um 10-15 %.

Das Global-Warming-Potential eines Bewehrungsstahls erscheint – bezogen auf das Gewicht - auf den ersten Blick wesentlich höher (Tabelle 2-2). Bedenkt man jedoch, dass der Gesamtbewehrungsgehalt von Stahlbetonbauteilen in vielen Fällen deutlich unter 5% liegt, dann relativieren sich diese Zahlen stark. Anzumerken ist, dass es sich bei der hier ausgewählten EPD für den Bewehrungsstahl um eine Produktdeklaration mit ausgesprochen geringem CO₂-Äquivalent handelt.

	Herstellungsphase		Errichtungsphase		Nutzungsphase	Entsorgungsphase			Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen	Summe
	A1-A3	A4	A5	B1	C1	C2	C3	D		
Beton										
C 20/25	178	3,9	1,08	-10	3,1	12	6,01	-21	173,09	
C 25/30	197	3,9	1,08	-10	3,1	12	6,01	-21	192,09	
C 30/37	219	4,5	1,08	-10	3,1	12	6,01	-21	214,69	
C 35/45	244	9,1	1,08	-10	3,1	12	6,01	-21	244,29	
C 45/55	286	29,1	1,08	-10	3,1	12	6,01	-21	306,29	
C 50/60	300	28,8	1,08	-10	3,1	12	6,01	-21	319,99	

Tabelle 2-1: Treibhausgaspotentiale (GWP) in kg CO₂ je m³ Beton für verschiedene Durchschnittsbetone nach den Angaben aus [5]

	Herstellungsphase		Errichtungsphase		Nutzungsphase	Entsorgungsphase			Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen	Summe
	A1-A3	A4	A5	B1	C1	C2	C3	D		
Betonstahl										
	240	16,3	-	-	-	3,23	-	-	259,53	

Tabelle 2-2: Treibhausgaspotential (GWP) in kg CO₂ je t Betonstahl nach [6]

Der Herstellung von Zement fällt ein erheblicher Anteil an CO₂-Emissionen zu: 587 kg Kohlenstoffdioxid werden bei der Produktion einer Tonne eines durchschnittlichen Zementes freigesetzt [7]. Davon entstammen zwei Drittel der Emissionen aus rohstoffbedingten Prozessen. Das verbleibende Drittel der Emissionen wird durch die Energie verursacht, die zugeführt werden muss, um die erforderliche Temperatur von 1450 °C im Drehrohrofen erzeugen. Bei der Zementherstellung wird zunächst Calciumcarbonat (CaCO₃) aus dem Kalkstein zu Branntkalk (CaO) umgewandelt [8]. Dabei wird aus jedem Molekül CaCO₃ ein Molekül Kohlenstoffdioxid emittiert. Durch den hohen Bedarf an Zement fallen global somit circa 7 % der durch den Menschen verursachten Treibhausgase auf die Zementproduktion zurück [9], [10]. Allein in Deutschland werden über 27 Millionen Tonnen CO₂-Emissionen bei der Produktion von Zement erzeugt, was 2% der deutschen Treibhausgasemissionen entspricht. Schätzungen zufolge könnte der Zementbedarf infolge der Verstärkung des Umlands in Zukunft weiter steigen [11]. Der Global Status Report for Buildings and Construction aus dem Jahre 2019 [2] hat aufgezeigt, dass unter Einbeziehung der erforderlichen Energie für beispielsweise Heizung und Warmwasser während der Nutzungsphase von Gebäuden der Anteil des Gebäudesektors am gesamten CO₂-Ausstoß insgesamt 38 %

einnimmt. Aus diesen Zahlen lässt sich ablesen, dass neben der Zementherstellung, vor allem die Gebäudenutzung und der damit verbundene Energieaufwand für Beleuchtung, Heizung und Warmwasser den größten Anteil an den Treibhausgasemissionen aufweist.

Die Bundesregierung bilanzierte, dass von 22 Millionen Gebäuden in Deutschland etwa 12,5 Millionen ein großes Energieeinsparpotenzial aufweisen, da diese vor der ersten Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden im Jahre 1977 gebaut wurden [12]. Durch eine energetische Sanierung vieler Bauten könnte somit der Gesamtenergiebedarf während der Nutzungsphase reduziert werden, was ein enormes Einsparpotenzial an Treibhausgasemissionen mit sich bringt. Zudem sollte zukünftig sichergestellt werden, dass die Energieversorgung während dieser Lebenszyklusphase zunehmend aus emissionsarmer und erneuerbarer Energie stammt, um eine signifikante Reduktion der Emission klimaschädlicher Gase infolge der Nutzung von Gebäuden zu reduzieren [13].

Sollte dies gelingen, liegt der größte Anteil an Emissionen nicht mehr in der Lebenszyklusphase der Gebäudenutzung, sondern verschiebt sich in den Bereich der Herstellung und Errichtung von Gebäuden. Dieser Prozess umfasst den Rohstoffabbau, die Gewinnung von Energieträgern und mineralischen Rohstoffen, die notwendigen Zulieferungen, die Herstellung von Baustoffen wie beispielsweise Beton und Stahl bis hin zu den Abläufen auf der Baustelle bei der Errichtung des Bauwerks [13].

Seit 1990 konnte die Zementindustrie die CO₂-Emissionen pro Tonne Zement um etwa 22 % vermindern. Maßnahmen, um diese Reduktion zu erreichen, waren unter anderem eine Steigerung der thermischen und elektrischen Energieeffizienz der Zementwerke. Ermöglicht wurde dies durch verfahrenstechnische Innovationen und Substitution von Brennstoffen durch Alternativen mit geringerem CO₂-Potential bzw. dem Einsatz bereits kalzinierter Rohstoffe [8].

Konventionelle Minderungsmaßnahmen in der Zementproduktion werden jedoch zunehmend an ihre Grenzen stoßen, da der thermische und elektrische Effizienzgrad endlich ist [8]. Um eine volle Klimaneutralität des Betons zu erreichen, wäre ein neuer Weg der Herstellung von Zement sowie seiner Anwendung im Beton erforderlich. Auch das Abscheiden von CO₂ und dessen Umwandlung in andere Stoffe und Produkte wäre ein denkbarer Lösungsansatz [14].

Als wichtige Maßnahme zur Reduktion klimaschädlicher Emissionen ist zusätzlich noch die Verwendung alternativer Baustoffe und -methoden zu nennen und – um im Kontext des Stahlbetonbaus zu bleiben – weniger materialintensive Bauweisen zu verwenden, wie beispielsweise das Bauen mit Vollfertigteilen, welches im Rahmen des beschriebenen Forschungsprojektes näher untersucht wird.

Als Alternative zur Planung und Errichtung von Bauwerken im Hochbau in rein konventioneller Stahlbetonbauweise, wird eine Ausführung mit vorgefertigten Spannbetondeckenelementen betrachtet. Hinsichtlich ihres Ressourcenaufwandes und des CO₂-Ausstoßes werden beide Bauweisen bilanziert, um Einsparpotentiale zu ermitteln und gegenüberzustellen.

3 Motivation, Beschreibung und Ziele des Projektes

Der Marktanteil von Spannbeton-Fertigdecken wird in Deutschland auf lediglich 3-4% geschätzt [15], daher sind die Produzenten von Spannbetonhohldielen natürlich motiviert, ihren Einfluss im Rohbausektor zu erhöhen. Wobei in Bezug auf das Projekt die Interessen der Spannbetonproduzenten der fachlichen Einschätzung der Autoren nicht entgegenstehen, denn die Vorteile der Spannbetonbauweise, gerade mit Blick auf den Klimaschutz sind unübersehbar. Allein bei Betrachtung des Querschnitts einer Spannbetonplatte (Bild 3-1) wird schnell klar, dass bei Einsatz dieser Bauweise erheblich Betonmassen eingespart werden können – bei einigen Deckentypen bis zu 49%. Dabei sind weitere Vorteile wie das Erreichen größerer Spannweiten gegenüber herkömmlichen Decken, sowie die leichtere Ausführung der übrigen tragenden Konstruktion, aufgrund des geringeren Deckengewichtes noch nicht berücksichtigt. Hinzu kommt ein sehr niedriger Bewehrungsgehalt der Spannbetonelemente, sodass hier weitere Einspareffekte zu erwarten sind.

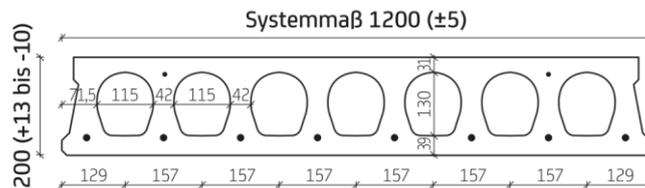


Bild 3-1: repräsentativer Querschnitt eines Spannbetonfertigteils [16]

Werden die Auswirkungen auf das gesamte Tragwerk eingerechnet, so sollte zu erwarten sein, dass in dieser Bauweise ein enormes Einsparpotential in Bezug auf die Klimaziele der Europäischen Union und des im Jahr 2021 vom Bundesverfassungsgericht gesprochenen Urteils zum Klimaschutzgesetz [17] liegt.

Bei dem untersuchten Gebäudekomplex handelt es sich um ein neu errichtetes Studentenwohnheim, welches aus 3 L-förmigen Bauten mit 4 bzw. 5 Vollgeschossen besteht.

Die Decken wurden aus Spannbeton-Fertigdecken, Typ BRESPA von DW Systembau, erstellt und auf Verbundträgern, Typ DeltaBeam® von Peikko Deutschland, gelagert. Die Deckenspannweiten betragen in den Gebäuden A2-C2 5.95 m-7.60 m (einachsig tragende Durchlaufdecke) und in den Gebäuden A1-C1 7.38 m (Einfelddecke) (Bild 3-4). Die nichttragenden Außenwände bzw. Fassaden wurden aus Holz gefertigt und nachträglich eingehängt.

Tragende Wände, Stützen, Treppen, sowie die Fundamente bestehen aus schlaff bewehrtem Stahlbeton. Das Gesamttragwerk wird über die Spannbetondecken, die als horizontale Scheiben ausgebildet sind, und über die Stahlbetonwände ausgesteift, sodass es sich hier um ein unverschiebliches Tragsystem in Bezug auf die Ermittlung der Knicklängen der Stützen handelt.



Bild 3-2: Untersuchtes Gebäude im Rohbau und nach der Fertigstellung

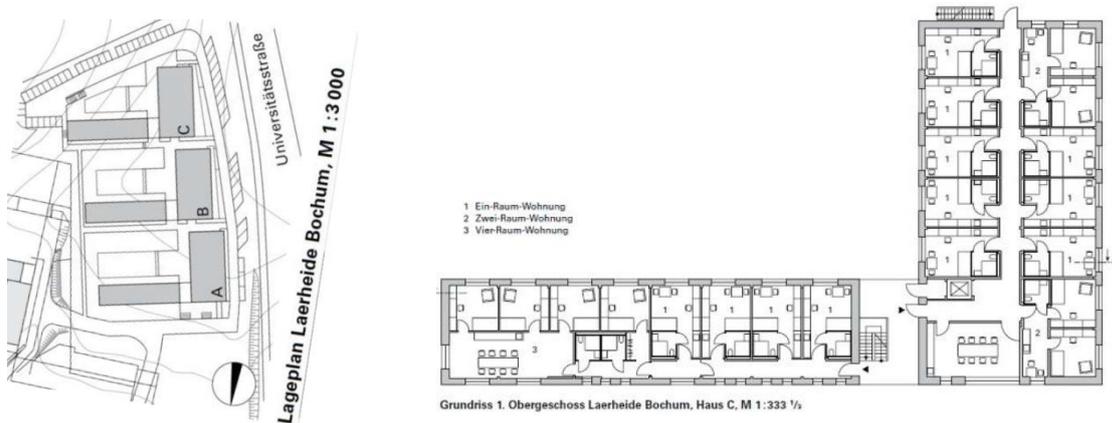


Bild 3-3: untersuchter Gebäudekomplex, Architektengrundriss Gebäude A

Für die anstehenden Untersuchungen wurden die Genehmigungsstatik, sowie die Schal- und Bewehrungspläne durch DW Systembau GmbH zur Verfügung gestellt.

Stb-Decke über 1. Obergeschoss
C30/37; XC1, W0

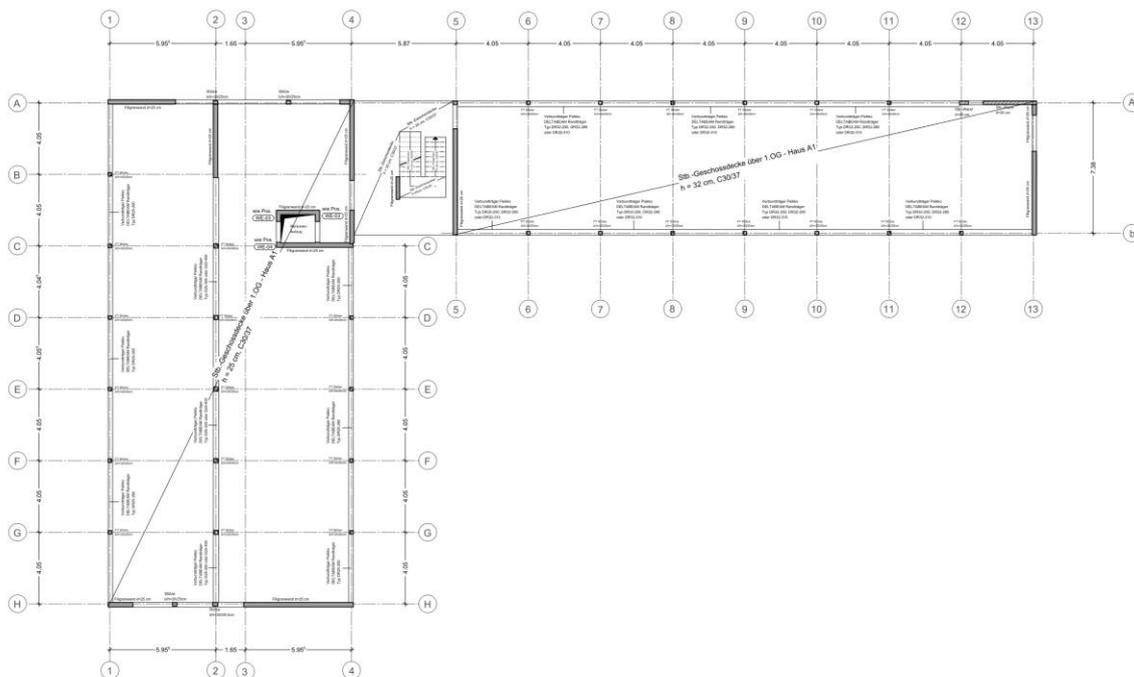


Bild 3-4: Positionsplan 1. OG aus [18]

Im Rahmen des Projektes war zunächst die Ökobilanz des realen Gebäudekomplexes zu bestimmen und unter Verwendung verschiedener Bauweisen der Deckentragwerke (schlaff bewehrt, vorgespannt) auszuwerten. Dazu mussten die verschiedenen Deckenkonstruktionen als schlaff bewehrte Bauteile neu konzipiert werden. Alsdann wurden die lastabtragenden Bauteile bis hin zu den Fundamenten, neu berechnet, konstruktiv durchgebildet und deren Auswirkungen auf das Gesamttragwerk und dessen Ökobilanz einschließlich des CO₂-Äquivalents untersucht.

Ziel der hier vorgestellten Analysen war es, mögliche Einsparpotentiale zur Erreichung der Klimaziele zu quantifizieren, die Praxis der Tragwerksplanung im Hinblick auf die anstehenden Probleme zu sensibilisieren und einen Beitrag zu liefern, innovative und nachhaltigere Bauweisen zu entwickeln.

4 Vorgehensweise im Projekt, Bauteildimensionen

4.1 Allgemeine Anmerkungen

Die Bearbeitung der vorgenannten Aufgabenstellung erfolgte im Rahmen eines FNK-Projektes¹ der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin.

Im Mittelpunkt des Vorhabens stand, wie bereits erwähnt, die Frage: welche quantitativen Auswirkungen in Bezug auf den Klimaschutz hat die Verwendung von Spannbetondecken bei einem mehrgeschossigen Skelettbau gegenüber der konservativen Bauweise mit schlaff bewehrten Ortbeton- oder Halbfertigteildecken.

Für diesen Zweck wurden in einem ersten Schritt die Planungsunterlagen eines neu gebauten Gebäudekomplexes, dessen Deckenkonstruktion aus Spannbetonfertigteilen besteht, im Hinblick auf die CO₂-Bilanz ausgewertet. Hierzu war eine detaillierte Analyse der Materialverteilung, des Materialbedarfs und eine Bewertung des GWP in Anlehnung an die Lebenszyklusphasen der Gebäudeherstellung nach DIN EN 15804 [19] erforderlich.

Parallel hierzu erfolgte eine Neudimensionierung des Gesamtgebäudes unter Zugrundelegung konventioneller Stahlbetondecken einschließlich notwendiger Unterzüge und Stürze, über die Stützen und Wände bis zu den Fundamenten. Für eine realistische Massenberechnung wurden neben der statischen Analyse, Schalpläne und ausführliche Konstruktionsskizzen und Zeichnungen angefertigt. In einem nächsten Schritt erfolgte eine detaillierte Bestimmung der Materialmengen in Beton und Stahl, sowie eine Bewertung der Ökobilanz.

Dieses schließt eine Bewertung der Tragstrukturen hinsichtlich der Schadstoffemissionskategorien entsprechend den Anforderungen an eine DGNB-Zertifizierung (Abbau der Ozonschicht, Eutrophierungspotential, Sommersmog, saurer Regen, Überdüngungspotential) mit ein.

¹ FNK-Projekt: hierbei handelt es sich um ein durch die **F**orschungs-**N**achwuchs-**K**ommission gefördertes Projekt, bei dem Studierende unter der Leitung eines Professors ein Forschungsvorhaben bearbeiten

Studentische Mitarbeiter beschäftigten sich vorrangig mit der Auswertung der durch DW Systembau zur Verfügung gestellten Pläne in Bezug auf das GWP. Im Zusammenhang mit dem Projekt wurden insgesamt 6 Studienabschlussarbeiten erstellt [18; 20–24].

Die Arbeiten befassen sich neben allgemeinen Betrachtungen zum GWP im Bauwesen mit detaillierten statisch-konstruktiven Überlegungen zu den einzelnen Bauteilen infolge der Deckenauslegung mit schlaff bewehrtem Beton. Zu diesem Zweck erfolgte zunächst eine Vordimensionierung und daraus abgeleitet eine statische Berechnung der Decken als schlaff bewehrte Bauteile in Ortbeton auf Niveau Genehmigungsplanung [18].

4.2 Gebäudevariante mit schlaff bewehrten Decken

Maßgebend für die Deckenstärken, welche aus der Vordimensionierung hervorgingen, war hier, wie in der überwiegenden Zahl der praktischen Anwendungsfälle, der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit – speziell das Durchbiegungskriterium.

Die Deckendicken wurden unter Einhaltung der Vorgaben aus DIN EN 1992-1-1 [25–27] bestimmt. Als wesentliches Durchbiegungskriterium wurde hier gefordert, dass mit Rücksicht auf die Aufstellung nichttragender, risseempfindlicher Trennwände, die Durchbiegungszunahme mit dem Einbringen der Ausbaulasten und dem quasiständigen Anteil der Nutzlasten auf $L/500$, jedoch auf maximal 1 cm begrenzt bleibt. Das Sichtkriterium einer maximalen Durchbiegung von $l/250$ in der gesamten quasiständigen Bemessungssituation wurde dabei beachtet, war jedoch nicht maßgebend.

Die Deckendicken betragen in der schlaff bewehrten Variante 25 cm bzw. 32 cm (im Einfeldbereich).

Eine Neubemessung der Unterzüge (DELTABEAM[®]-Verbundträger) durch die Fa. Peikko ergab trotz höherer Schnittlasten die gleichen Abmessungen wie in der Spannbetonvariante. Die Trägerdimensionen blieben trotz größerer Deckenstärke gegenüber der Spannbetonvariante unverändert, weil eine bessere Ausnutzung der effektiven Breiten bei der Kombination der Träger mit einer massiven, ohne Hohlkörper geschwächten Decke möglich war und diverse ausführungstechnische Gegebenheiten zu beachten waren.

In einer weiteren Studienarbeit [22] wurden die Stützen dimensioniert. Als Grundlage zur Ermittlung der Querschnittsabmessungen wurde ein Längsbewehrungsgehalt von maximal 4% in den Bereichen ohne Übergreifungsstöße angestrebt. Ein derart vordimensionierter Stützenquerschnitt stellt sich i.A. als sehr wirtschaftlich dar, bietet gute Einbaubedingungen und lässt weitere Lasterhöhungen unter heutigen zeitlich begrenzten Planungsbedingungen zu bei moderater Vergrößerung des Bewehrungsquerschnitts.

Die Querschnittsabmessungen der Stützen wurden anschließend aus baupraktischen und ästhetischen Erwägungen geschossweise vergleichmäßig.

Auch hier erfolgte eine Nachweisführung auf Niveau Genehmigungsplanung, dies schließt eine Brandbemessung (Heißbemessung bzw. vereinfachtes Verfahren nach DIN EN 1992-1-2) der Stützen mit ein.

Bei den Rand- und Eckstützen wurde eine gesonderte Ermittlung der Einspannmomente aus den Decken vorgenommen.

Die Wände wurden in der Gebäudevariante mit konventionellen Decken [24] überwiegend mit den gleichen Dicken dimensioniert, wie die Wände in der Spannbetonvariante, obwohl die vertikalen Wandlasten in letzterer Variante deutlich geringer sind. Ausschlaggebend für die Inkaufnahme einer Überbemessung war die Ausführbarkeit.

Für die Fundamentbemessung [20] waren im Wesentlichen die bodentechnischen Kennwerte ausschlaggebend. Dementsprechend führten die höheren Beanspruchungen zur Vergrößerung in den Fundamentbreiten.

Eine repräsentative Gegenüberstellung der Bauteildimensionen lässt sich Bild 4-1 und Bild 4-2 entnehmen.

4.3 Gebäudevariante mit Decken aus Spannbeton

Aus den durch DW Systembau zur Verfügung gestellten Planungsunterlagen konnten neben der geprüften statischen Berechnung die detaillierten Schal-, Bewehrungs- und Montagepläne entnommen werden.

Die Deckenstärke beträgt in nahezu allen Geschossbereichen 20 cm bei Ausführung mit Spannbetonhohldielen (C45/55).

Unterzüge sind deckengleich als DELTABEAM®-Verbundträger der Fa. Peikko ausgeführt. Die Fertigteilstützen haben in den Innenbereichen Abmessungen von 24/24 und in den Randbereichen 20/20 bzw. 20/24.

Die tragenden Wände, die vorrangig zur Aussteifung herangezogen werden und besitzen eine Stärke von 25 cm. Ihr Anteil an der Gesamtmasse des Gebäudes ist gering. Sie wurden mit Rücksicht auf eine einfache Ausführbarkeit moderat überbemessen.

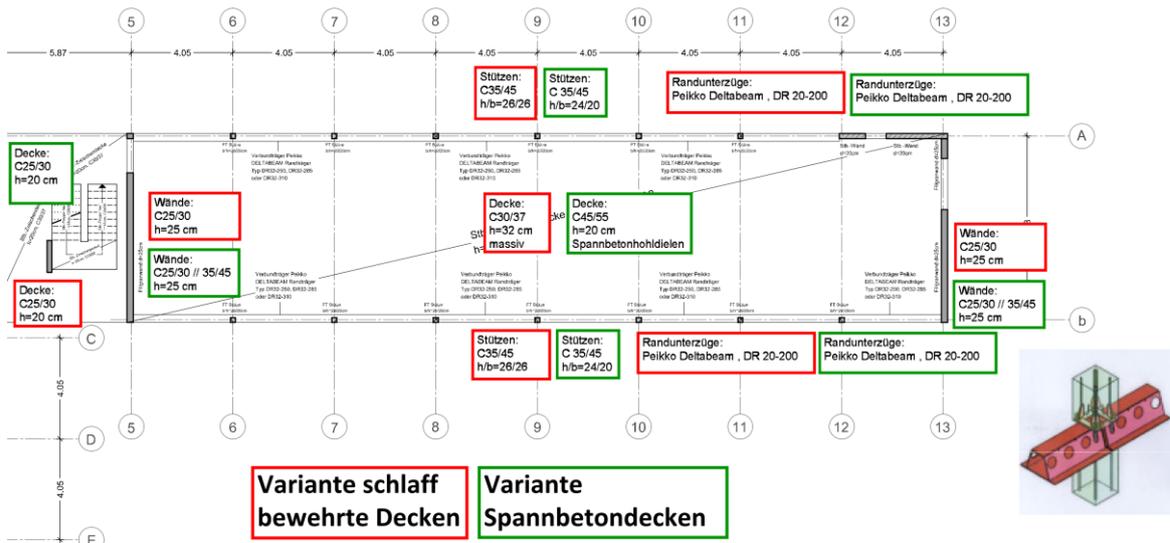


Bild 4-1: Bauteildimensionen (hier: EG, Decke über EG – horizontaler Flügel)

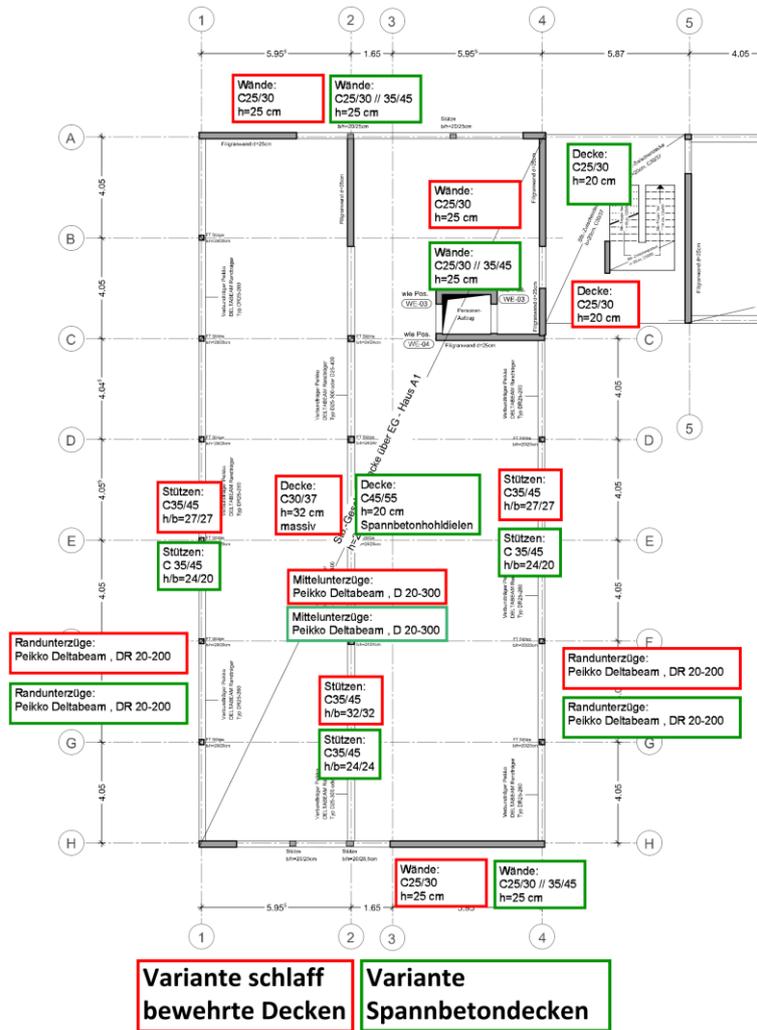


Bild 4-2: Bauteildimensionen (hier: EG, Decke über EG – vertikaler Flügel)

Die Fundamente wurden in der statischen Berechnung seinerzeit sehr großzügig dimensioniert. Es ist anzunehmen, dass dies dem üblicherweise vorgezogenen Lastabtrag geschuldet ist. Aus diesem Grund und um eine bessere Vergleichbarkeit zur schlaff bewehrten Deckenvariante herzustellen, erfolgte für die Gründungsbauteile eine Neudimensionierung, bei der die gleiche Vorgehensweise und dieselbe Modellierung verwendet wurde, wie für die Fundamente der schlaff bewehrten Deckenvariante.

4.4 Massenermittlung

Die Bestimmung der Bauteilmassen liefert erste übersichtliche Ergebnisse auf dem Weg zur Erstellung der Ökobilanz. Unabhängig von den Materialgütern werden in der folgenden Tabelle die Massen gegenübergestellt.

Hierbei zeigt sich, dass durch die Verwendung der leichteren Spannbeton-Fertigdecken deutliche Einsparungen an Ressourcen erzielt werden können. Die Einsparungen erstrecken sich in erster Linie auf die Gründung und die Geschosdecken.

Decken schlaff bewehrt mit Halbfertigteilen		Decken in Spannbetonhohldielen		Einspar-effekt
Decken		Decken		
Beton	817,5 m ³	Beton 1)	370,9 m ³	55%
Betonstahl	57935 kg	Betonstahl / Spann Stahl	7732 kg	87%
		1) einschl. Vergussbeton		
Stützen		Stützen		
Beton	27,8 m ³	Beton	15,2 m ³	45%
Betonstahl	6620 kg	Betonstahl	5445 kg	18%
Wände		Wände		
Beton	161,8 m ³	Beton	161,8 m ³	0%
Betonstahl	15920 kg	Betonstahl	15920 kg	0%
Gründung		Gründung		
Beton	306,0 m ³	Beton	229,4 m ³	25%
Betonstahl	28988 kg	Betonstahl	13125 kg	55%

Tabelle 4-1: Massenbilanz im Vergleich der betrachteten Rohbauvarianten

Die Stahlträger sind hier aus der Bilanzierung ausgeklammert worden.

5 Detaillierte Beschreibung der Bestimmung der vergleichenden CO₂-Bilanzen

5.1 Systemgrenzen

Ökobilanzen werden erstellt, indem ein Produktsystem modelliert wird, das die wesentlichen Elemente des physischen Systems beschreibt. Mit der Systemgrenze wird festgelegt, welche Prozesse Teil des Systemmodells sind.

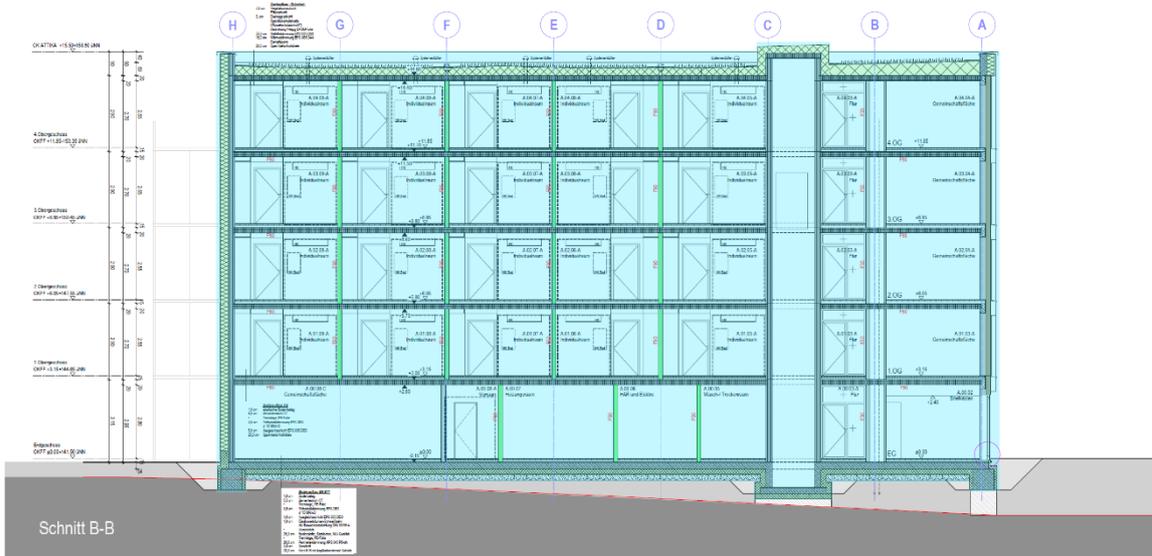


Bild 5-1: Systemgrenzen im Schnitt B-B, Haus A

Die Analyse zur Ökobilanzierung erfolgt für die Lebenszyklusstadien der Herstellung,

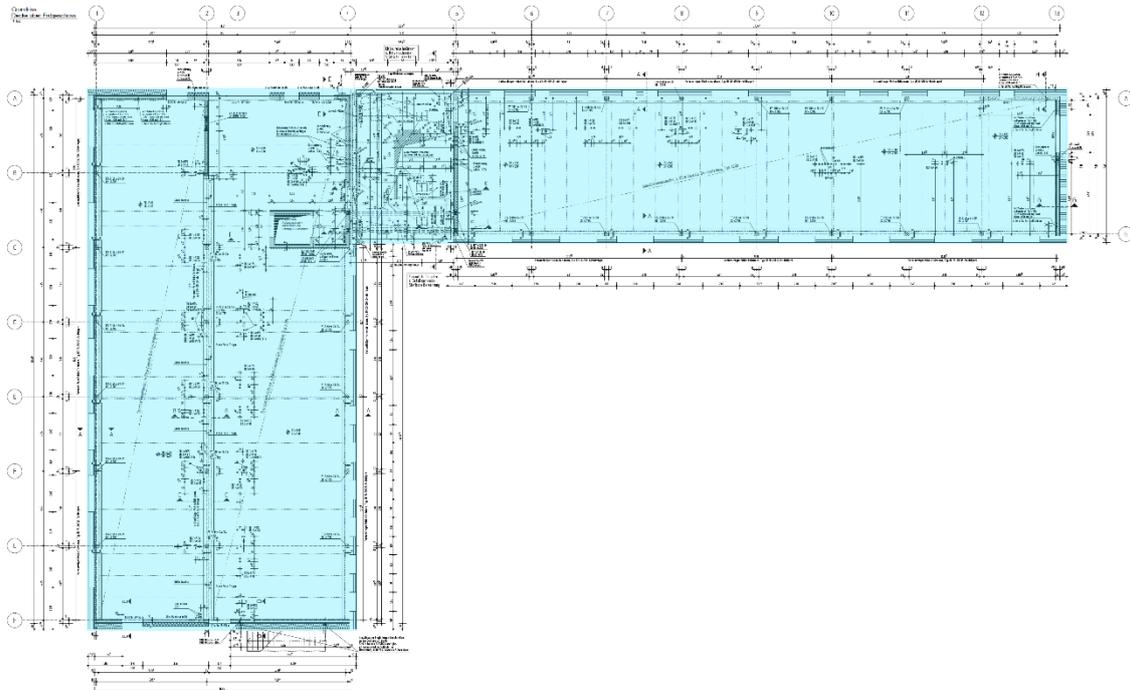


Bild 5-2: Systemgrenzen im Grundriss EG, Haus

Dieser Abschnitt spezifiziert die Grenzen des untersuchten Produktsystems und insbesondere die Grenzen zu jeglichen vorangehenden oder folgenden Produktsystemen während der Lebensdauer eines Gebäudes. Es spezifiziert auch die Prozesse, die in jeder Phase des Lebenszyklus zu berücksichtigen sind.

Die hier erstellte Ökobilanz beschränkt sich auf den Bereich der Gebäudesubstanz, vernachlässigt eventuelle Außenanlagen und den Gebäudeausbau. Grundsätzlich werden die Bestandteile der Kostengliederungspunkte KG300 – Baukonstruktion – entsprechend [28] berücksichtigt. Die folgenden zwei Grafiken in Bild 5-1 und Bild 5-2 verdeutlichen die Systemgrenzen für das Gebäude.

Einen detaillierten Überblick über die Lebenszyklusphasen gemäß [19] gestattet die nachstehende Abbildung.

Herstellungsphase			Errichtungs- phase		Nutzungsphase							Entsorgungsphase				Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
Rohstoffgewinnung und Verarbeitung	Transport	Herstellung	Transport	Einbau	Nutzung	Inspektion/ Wartung/ Reinigung	Reparatur	Austausch/ Ersatz	Verbesserung/ Modernisierung	betrieblicher Energieeinsatz	betrieblicher Wasseereinsatz	Rückbau/ Abriss	Transport	Wiederverwendung/ Recycling	Beseitigung	Wiederverwendungs- Rückgewinnungs- Recyclingpotential

Bild 5-3: Lebenszyklusphasen eines Bauwerks nach [19], aus [21]

Die Stadien werden für die Kostengruppen 300 (Baukonstruktion) gemäß DIN 276 bilanziert.

Das Bestandsgebäude mit dem Deckentragwerk aus Spannbetonfertigteilenelementen wird in folgende Bauteile untergliedert:

- Spannbeton-Fertigdecken (DW Systembau)
- Fertigteilstützen
- Stahlbetonwände / Aussteifungssystem
- DELTABEAM®-Verbundträger als Unterzüge (Peikko)
- Gründung (Bodenplatte, Streifenfundamente)

Bei der Umdimensionierung (Tragwerk mit schlaff bewehrten Halbfertigteilecken) werden folgende Bauteilgruppen gebildet:

- Umbemessung der Deckensysteme [18]
- Umbemessung Fertigteilstützen [22]
- Umbemessung des Aussteifungssystems [24]
- Umbemessung Unterzüge (Statische Berechnung Peikko)

- Umbemessung der Gründung [20]

Für die folgenden Systembestandteile des Tragwerkes liegen für die Ökobilanzierungen EPD-Dokumente (Environmental Product Declaration) vor:

- Spannbeton-Fertigteildecken DW SYSTEMBAU GMBH [29]
- DELTABEAM Composite Beam, Painted Peikko GmbH [30]

Die anderen Tragwerkselemente werden mithilfe der Datensätze der Plattform ÖKOBAUDAT [31] bilanziert.

5.2 Ausgewertete Kriterien zur Nachhaltigkeit

Bei der hier vorliegenden Ökobilanz werden folgende Indikatoren berücksichtigt:

Treibhausgaspotential, GWP (Global Warming Potential)

Das wohl wichtigste Element der Ökobilanz dient als Richtgröße für das Schädigungspotential eines in der Atmosphäre enthaltenen Gases in Bezug auf die Erwärmung der bodennahen Luftschichten. Es wird als CO₂-Äquivalent angegeben in kg CO₂/Einheit eines Stoffes. Neben dem Kohlendioxid sind die wichtigsten klimaschädigenden Gase Methan (Hauptbestandteil von Erdgas), welches etwa die 25-fache Wirkung von Kohlendioxid entfaltet, Lachgas und verschiedene Fluoride.

Ozonabbaupotential, ODP (Ozone Depletion Potential)

Es handelt sich hierbei um das Ozon in den mittleren Schichten der Erdatmosphäre. Ozon ist in der Lage kurzwellige Strahlung zu absorbieren und sie als langwellige Strahlung wieder abzugeben. Es ist nur in geringer Konzentration vorhanden. Die Ozonschicht schützt uns vor der UVA- und UVB-Strahlung. Gemessen wird das ODP als sog. R11-Äquivalent (Trichlorfluormethan-Äquivalent). Ozonschädliche Gase sind u.a. in vielen Kältemitteln für Klimaanlage und Wärmepumpen enthalten. Auswirkungen des Abbaus der Ozonschicht auf Lebewesen sind u.a. die Auslösung von Tumoren und Störungen der Photosynthese der Pflanzen. [32; 33]

Versauerungspotential, AP (Acidification Potential)

Insbesondere das Waldsterben wird mit dem sauren Regen in Verbindung gebracht.

Die Reaktion von Schwefeldioxid, Stickstoffverbindungen und auch Kohlendioxid führt bei Hinzutritt von Wasser zur Bildung der zugehörigen Säuren (Schwefelsäure, Salpetersäure, Kohlensäure) und somit zur Versauerung des Regens.

Die Versauerung führt zu einem schnellen Aufschluss der Nährstoffe im Boden und hernach zur Verarmung und Auswaschung des Bodens. In Extremfällen können durch Versauerung in Gewässern Fischsterben ausgelöst werden.

Zudem werden Gebäude, vornehmlich solche mit Kalksandsteinfassaden, stark durch sauren Regen geschädigt.

Überdüngungspotential, EP (Eutrophication Potential)

Phosphor- und Stickstoffverbindungen, die vornehmlich durch Verbrennungsemissionen (Verkehr) und bei der Herstellung von Bauprodukten entstehen, führen zu einem sogenannten eutrophen Zustand (Nährstoffüberschuss), wenn sie in größeren Mengen in Gewässer gelangen. Zumeist äußert sich dies in übermäßigem Algenwachstum und mitunter in verstärktem Fischsterben. Das EP wird als Phosphat-Äquivalent ausgewiesen [34].

Bodennahe Ozonbildungspotential, POCP (Photochemical Ozone Creation Potential)

Das Phänomen übermäßiger Ozonbildung in den bodennahen Schichten der Atmosphäre ist als sogenannter Sommersmog bekannt. Starke UV-Strahlung führt bei Einwirkung auf Stickoxide (NO_x), die gewöhnlich aus Autoabgasen stammen, zur Bildung des stark reaktiven Ozons (O₃). Verstärkt wird dieser Effekt durch in der Luft vorhandene Kohlenwasserstoffe [35]. Das bodennahe Ozon kann zur Schädigung der Atmungsorgane bei Mensch und Tier führen, zudem zu Kopfschmerzen und Husten, bei Vorhandensein hoher Konzentrationen kann es Augenreizungen auslösen.

Primärenergieverbrauch nach Energieträgern

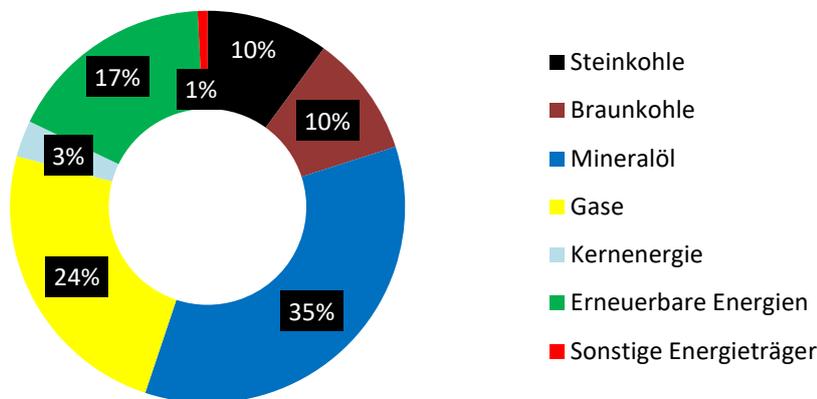


Bild 5-4: Aufteilung des Energiebedarfs in Deutschland (2022) nach [36]

Erneuerbare Primärenergie als Energieträger, PERE (Primary Energy Renewable, Energy)

Bilanziert werden hier erneuerbare Primärenergien, also aus nicht fossilen Quellen. Dazu zählen u.a. Energiequellen wie Wasserkraft, Wind, Biomasse, Solarthermie, Photovoltaik etc..

Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger, PENRE (Primary Energy Nonrenewable, Energy)

Energien aus nicht-erneuerbaren Quellen - wie Kohle, Gas, sowie Kernenergie (Einordnung z.Z. umstritten) - bezogene Energie. Das Bild 5-4 zeigt die Aufteilung des Primärenergieverbrauchs in Deutschland nach Energieträgern (Stand 03/2023).

5.3 Ergebnisse der Ökobilanzierung

In den nachfolgenden Tabellen sind die Ergebnisse der Bilanzen gegenübergestellt.

Besonders hinsichtlich des GWP, des Versauerungspotentials, der Eutrophierung, aber auch des Primärenergiebedarfs zeigen sich sehr deutliche Einspareffekte zum Vorteil für die Deckentragwerke mit Spannbetonelementen.

Variante Spannbeton-Fertigdecken - gesamte Ökobilanz							
Stadium	GWP [kgCO ₂ -eqv]	ODP [kg CF11-eqv]	AP [kg SO ₂ -eqv]	EP [kg PO ₄₃ -eqv]	POCP [kg C ₂ H ₄ -eqv]	PERE [MJ]	PENRE [MJ]
A1-A3	1021458,8	1,6E-02	1940,6	305,6	11019,8	1344798,8	7970021,4
C3-C4	23071,9	1,4E-03	124,4	19,1	1808,5	42134,0	332785,5
D	-158990,1	-3,7E-03	-467,8	-66,3	-4712,8	-171660,2	-1424647,3
Gesamt	8,855E+05	1,406E-02	1,597E+03	2,584E+02	8,115E+03	1,215E+06	6,878E+06

Tabelle 5-1: Ergebnisse Ökobilanz Bestandsbauwerk

Variante Halbfertigteile - gesamte Ökobilanz							
Stadium	GWP [kgCO ₂ -eqv]	ODP [kg CF11-eqv]	AP [kg SO ₂ -eqv]	EP [kg PO ₄₃ -eqv]	POCP [kg C ₂ H ₄ -eqv]	PERE [MJ]	PENRE [MJ]
A1-A3	1303957,9	1,7E-02	2510,7	426,9	11082,9	2284211,0	9800465,8
C3-C4	30340,1	1,4E-03	104,5	14,0	1806,0	84062,5	402742,1
D	-185866,7	-3,7E-03	-537,9	-87,6	-4702,1	-371173,7	-1922512,8
Gesamt	1,148E+06	1,426E-02	2,077E+03	3,532E+02	8,187E+03	1,997E+06	8,281E+06

Tabelle 5-2 Ergebnisse Ökobilanz Umbemessung

Differenz Variante Spannbeton – Halbfertigteile							
Stadium	GWP [kgCO ₂ -eqv]	ODP [kg CF11-eqv]	AP [kg SO ₂ -eqv]	EP [kg PO ₄₃ -eqv]	POCP [kg C ₂ H ₄ -eqv]	PERE [MJ]	PENRE [MJ]
A1-A3	-282499,1	-2,1E-04	-570,2	-121,3	-63,1	-939412,2	-1830444,4
C3-C4	-7268,2	-4,6E-08	19,9	5,1	2,5	-41928,5	-69956,6
D	26876,5	3,5E-07	70,1	21,3	-10,6	199513,5	497865,5
Gesamt	-2,63E+05	-2,07E-04	-4,80E+02	-9,48E+01	-7,12E+01	-7,82E+05	-1,40E+06
Prozentual	-22,89%	-1,45%	-23,11%	-26,85%	-0,87%	-39,15%	-16,94%

Tabelle 5-3: Differenzen in der Ökobilanz (Spannbeton-Fertigdeckenvariante – Stahlbetonvariante)

5.4 Detaillierte Auswertung der Treibhausgasbilanz (GWP)

Das Bild 5-5 stellt die Treibhausgaspotentiale der einzelnen Bauteile des Bestandes (Gebäude mit Fertigteildecken aus Spannbeton) und der Umbemessung (Deckenvariante mit schlaff bewehrten Halbfertigteilen) im Direktvergleich für den gesamten Gebäudekomplex dar.

Die Gegenüberstellung der beiden Gebäudevarianten zeigt, dass der Anteil der Decken an der CO₂-Bilanz im Vergleich mit den anderen Bauteilen den größten Raum einnimmt. Auch verbirgt sich in den Decken das höchste Einsparpotential.

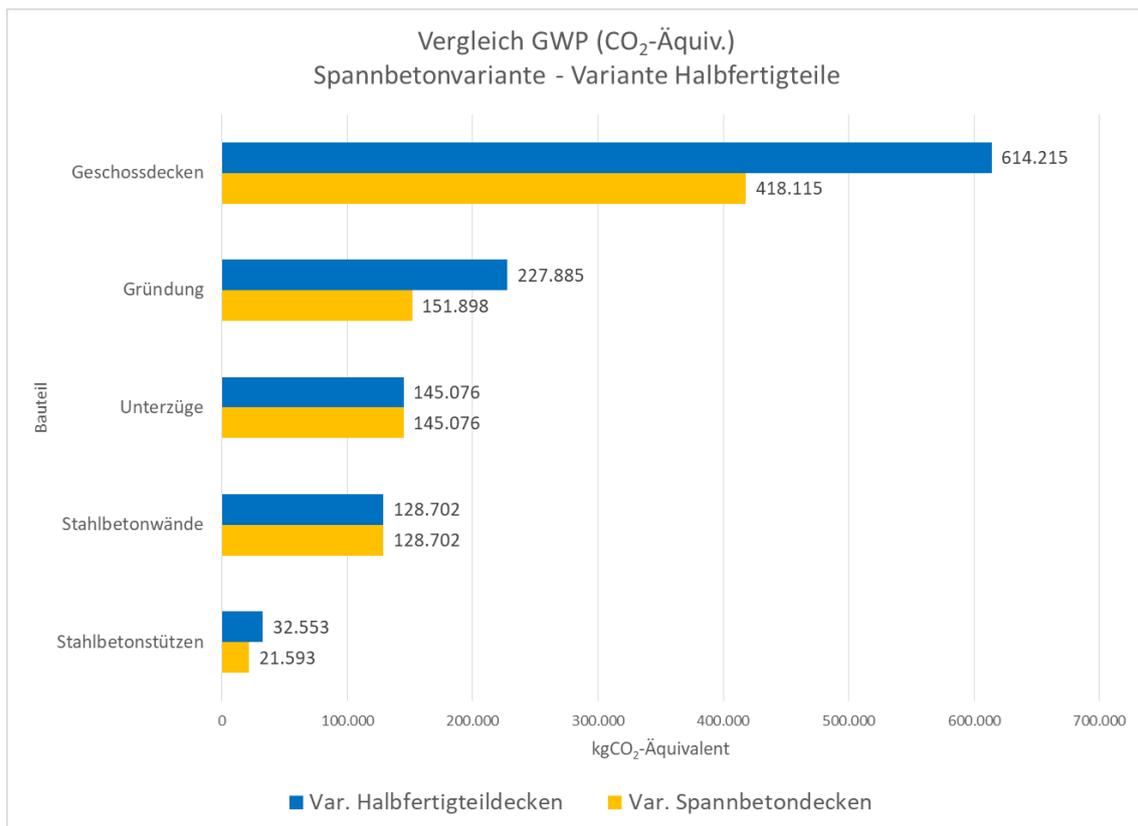


Bild 5-5: Vergleich GWP Bestand und Umbemessung (Haus A - C)

Der Einspareffekt ist vorrangig auf die geringeren Deckendicken in Kombination mit den dem geringeren Betonanteil aufgrund der Hohlkammergeometrie, sowie den geringeren Anteil an Stahl, hier im Wesentlichen Spannstahl, zurückzuführen. Die deutlich höheren Betongüten der Spannbetonelemente (C45/55) und die damit verbundenen größeren Kohlendioxidäquivalente gegenüber den schlaff bewehrten Decken (C30/37) können über den geringeren Betonanteil mehr als ausgeglichen werden.

Es sollte angemerkt werden, dass auch bei den schlaff bewehrten Decken der Anteil der Bewehrung mit weniger als 20% beim GWP geringer ist, als gemeinhin erwartet wurde.

Weiterhin ergeben sich deutliche Unterschiede im GWP hinsichtlich der Gründung und der Stützen. Dieses Ergebnis entspricht tendenziell den Erwartungen, weil das Gesamtgewicht des Bauwerkes aufgrund der leichteren Decken deutlich günstiger ist.

Bei den Unterzügen und bei den Wänden finden sich bei diesen Gebäuden keine Unterschiede. Dies ist beim DELTABEAM®-Verbundträger, wie in Abs. 4.2 erläutert, technologisch bedingt.

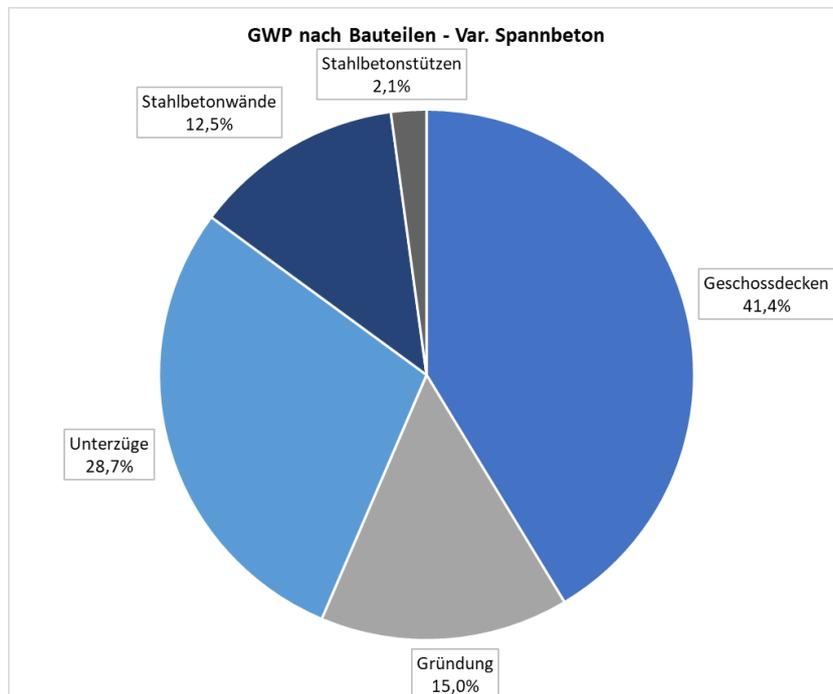


Bild 5-6: GWP für die Gebäudevariante mit Spannbeton-Fertigdecken – Anteile der einzelnen Bauteile

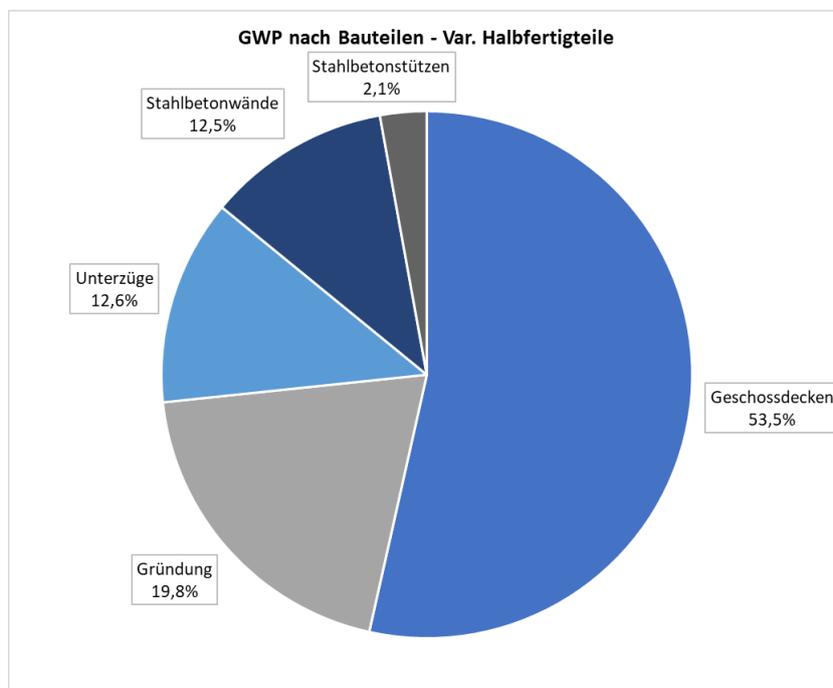


Bild 5-7: GWP für die Gebäudevariante mit schlaff bewehrten Decken – Anteile der einzelnen Bauteile

Die Wände sind in den meisten Bereichen mit einer Dicke von 25 cm in der Gebäudevariante aus Spannbeton-Fertigdecken etwas überdimensioniert. Der Grund hierfür liegt in der Herstellung aus Fertigteilhohlwandelementen. Mit Rücksicht auf eine einfachere Montage erfolgte eine großzügige Auslegung der Wandstärke. Somit war es nicht notwendig, größere Wanddicken in der Gebäudevariante mit schlaff bewehrten Decken vorzusehen.

In den überwiegenden Wandbereichen war i.Ü. eine Mindestbewehrung ausreichend.

Das eingesparte Global Warming Potential entspricht i.Ü. den jährlichen CO₂-Emissionen von 282 Mittelklassewagen bei einer Fahrleistung von 10.000 km (vgl. [37]).

6 Zusätzliche Betrachtungen

6.1 Geändertes Tragwerk durch Verkürzung der Spannweiten

Bei Betrachtung der Grundrisse beider Gebäudeflügel fällt auf, dass die Spannweite des horizontalen Flügels mit 7.38 m als Einfelddecke recht groß ist und für die Ausführung in schlaff bewehrtem Stahlbeton grenzwertig erscheint.

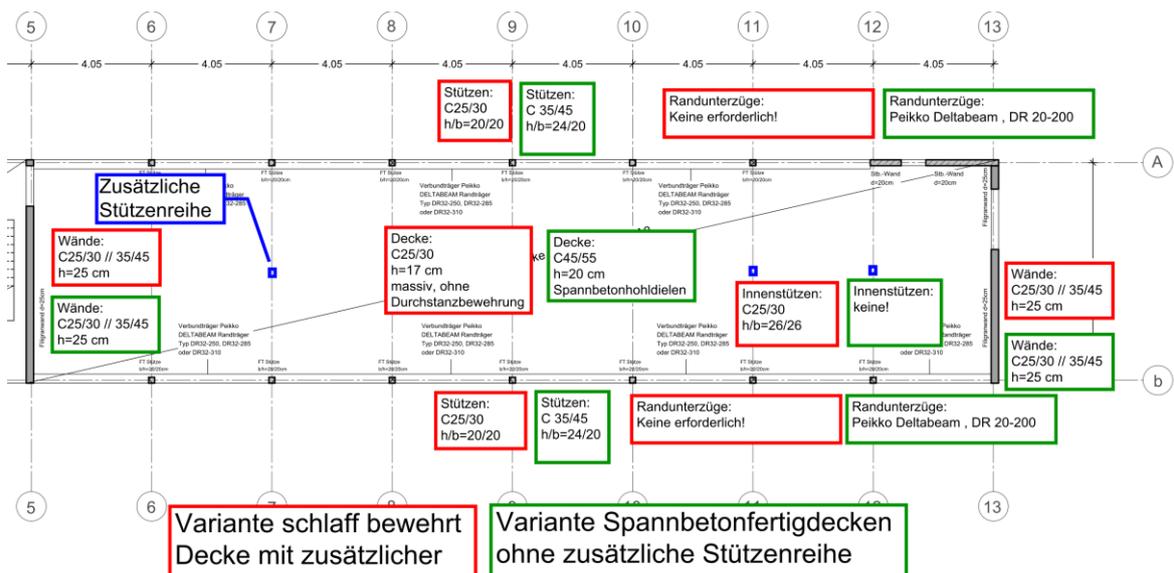


Bild 6-1: Bauteildimensionen im Vergleich bei Herstellung der schlaff bewehrten Decke über EG mit einer zusätzlichen Unterstützung

Aus diesem Grund wurde eine weitere Untersuchung eingeschoben, bei der im horizontalen Gebäudeflügel mittig eine zusätzliche Stützenreihe eingefügt wurde (Bild 6-1). Dadurch wäre es möglich, die Geschossdecken im horizontalen Flügel als klassische Flachdecken ohne Unterzüge auszuführen.

Die Decke wäre aus der Durchbiegungsanforderung heraus mit sehr geringer Dicke herstellbar. Die Deckenstärke wird jedoch allein aus Gründen des Schallschutzes und –

konstruktiv – durch den Verzicht auf Durchstanzbewehrung nach unten hin auf 17 cm begrenzt².

Letztlich ergibt sich schon allein für die Decken im horizontalen Flügel bei einer Ausführung unter Einsatz einer zusätzlichen Stützenreihe keine bessere Auswirkung hinsichtlich des Treibhausgaspotentials als in der Spannbetonvariante **ohne** mittlere Stützenreihe.

In der Gesamtbilanz wäre noch immer die Bestandsvariante mit Spannbeton-Fertigdecken die klimafreundlichste Ausführung mit Blick auf die Stahlbetonbauteile. Ungeachtet dessen ist die Deckenvariante mit einer Mittelstützenreihe mit erheblichen Einbußen in der Raumaufteilung behaftet.

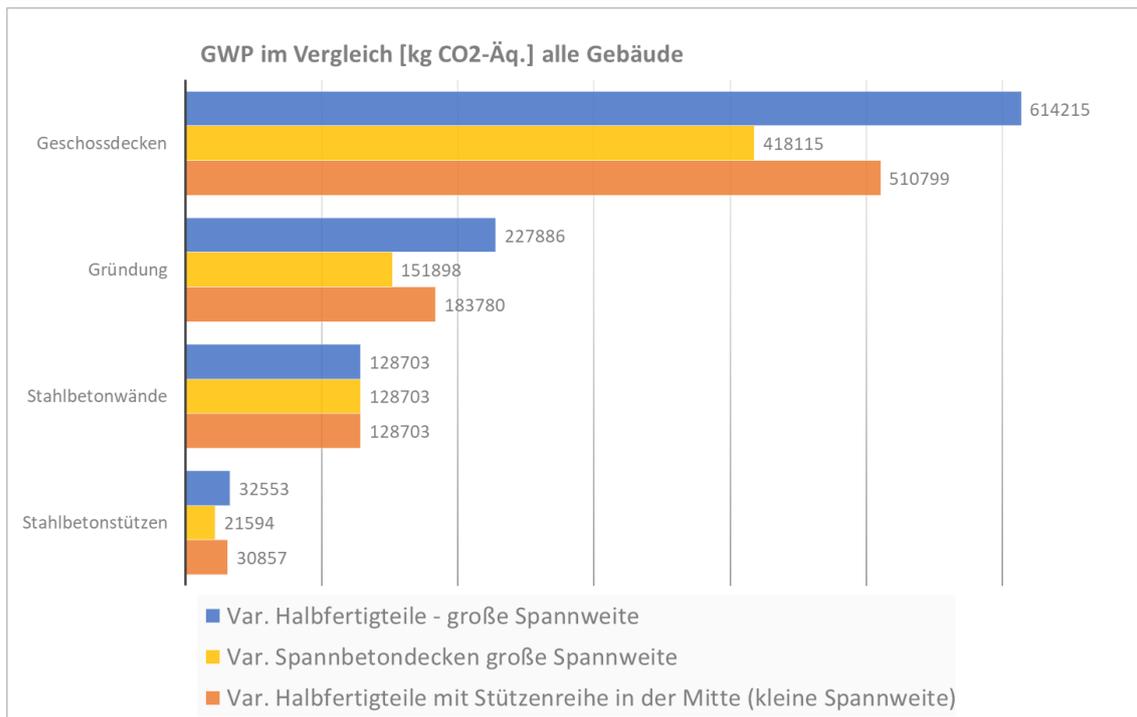


Bild 6-2: Vergleich GWP für die Betonbauteile

6.2 Folgerungen im Hinblick auf eine nachhaltige Tragwerksplanung

Aus den hier durchgeführten Untersuchungen haben sich einige für die Autoren interessante Erkenntnisse im Hinblick auf die Nachhaltigkeit in der Tragwerksplanung ergeben.

So hat sich bei der Bearbeitung des Projektes gezeigt, dass sich deutliche Reduktionen des CO₂-Aufkommens durch sehr einfache Überlegungen erzielen lassen, ohne dass hierfür gleich völlig neue Innovationen eingeführt werden müssen.

Zum einen lässt sich feststellen, dass die Betonmasse mit Abstand den größten Anteil am GWP eines Stahlbeton- bzw. Spannbetontragwerks besitzt. Einsparungen lassen

² Nach DIN EN 1992-1-1 Abs. 9.3.2 (1) sind Decken, die eine Durchstanzbewehrung erhalten mit mindestens 20 cm Dicke auszuführen.

sich dabei in erster Linie durch eine Bauweise mit Fertigteilen als Hohldielelemente erzielen. So können überschlägig gerechnet schon 20%-25% CO₂-Ausstoß bei den meisten Deckentragwerken vermieden werden. Sicherlich sind in dieser Kategorie die sog. Bubble-Decken mit zu erwähnen.

Weitere Vorteile diesbezüglich bildet die Spannbetonfertigbauweise, bei der das sonst begrenzende Durchbiegungskriterium zur Festlegung der Deckenstärke praktisch kaum noch von Bedeutung ist.

Im Projekt hat sich weiterhin die Erfahrung langjähriger Tragwerksplanung bestätigt, wonach Fundamente oftmals sehr großzügig ausgelegt werden. Dies liegt zum einen am Zeitdruck, der jedem Bauprojekt anhaftet. Demnach werden viele Gründungen über eine vorgezogene Lastermittlung dimensioniert, wobei zuweilen große Sicherheiten eingerechnet werden.

Desweiteren hat es sich in der Praxis etabliert, nahezu jedes Streifenfundament als bewehrtes Bauteil auszulegen, obwohl der EC2 genügend etablierte Regelungen zur Verfügung stellt, um Fundamente unbewehrt zu planen. Dies hat gleich zweierlei Einspareffekte in Bezug auf die Ökobilanz. Einerseits kann viel Bewehrung eingespart werden (vor allem Bügel!), andererseits lässt sich die Mindestbetonfestigkeit reduzieren. Dies hat, wie bereits weiter oben beschrieben, zur Folge, dass das CO₂-Aufkommen um mehr 10% je Betonfestigkeitsklasse sinkt.

Ein letzter wichtiger Punkt hat möglicherweise seine Ursache in der Umstellung der Normung zur Jahrtausendwende. Seinerzeit wurden mit der Ablösung der DIN 1045 (1988) durch die DIN 1045-1 neue Betonfestigkeitsklassen eingeführt. Bis dahin war es in der Praxis etabliert, im Hochbau möglichst keine Betonfestigkeit zu verwenden, die über einem B25 liegt, da darüber hinaus eine höhere Überwachungsklasse notwendig war.

Nach [38] entspricht ein damaliger Beton der Festigkeitsklasse B25 einem heutigen C16/20. Schaut man auf Bauprojekte der Gegenwart, so ist die Verwendung eines C16/20 für eine Decke kaum vorstellbar – es stellt sich die Frage: warum? Sehr oft werden Decken schon von vornherein mit einem Beton in C30/37 konzipiert, Wände und Stützen mit C35/45.

Da Wände oftmals überdimensioniert sind, weil sie aus konstruktiven oder schallschutztechnischen Belangen mit 20 cm Stärke oder dicker ausgeführt werden, wäre es aus statischen Gründen angezeigt, die Betonfestigkeit so gering wie möglich zu halten. Dies hat neben dem CO₂-Effekt (30% Einsparung bei Reduktion von C35/45 auf C20/25) den Charme, dass sich obendrein die Mindestbewehrung aus Hydrationswärme vor allem für die horizontale Bewehrung reduziert – grob gerechnet um 5% je Betonfestigkeitsklasse und Bewehrungslage.

Nicht ganz so starke, aber merkbare Effekte lassen sich für die Decken erzielen, bei denen die Auslegung der Tragfähigkeit sehr oft nicht das entscheidende Kriterium bei der Dimensionierung ist.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde die Ökobilanz in Bezug auf die gesamte Tragkonstruktion eines Gebäudekomplexes untersucht. Die Grundlage bildete ein neu errichtetes Wohngebäude, welches mit Decken aus Spannbetonfertigteilen gebaut wurde. Vergleichend wurde das GWP bestimmt für den Fall, dass die Decken aus konventionellen schlaff bewehrten Halffertigteilen bestehen.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass das GWP und die gesamte Ökobilanz dieses Stahlbetontragwerks überwiegend vom Volumen und der Güte des eingebrachten Betons abhängt und zu einem sehr viel geringeren Anteil der Bewehrungsmenge zuzuschreiben ist.

Das Einsparpotential des Gebäudes mit Spannbeton-Fertigdecken beträgt 23% bezogen auf das Gesamtgebäude, das Einsparpotential im CO₂-Äquivalent bei alleiniger Gegenüberstellung der Decken beträgt 34% zugunsten des Spannbetons.

Desweiteren wurden Vorschläge erarbeitet, mit denen sich auf konventionelle Weise eine deutliche Verbesserung der Nachhaltigkeit von Stahlbetontragwerken erzielen lässt. Dies wird vor allem erreicht durch den Einsatz von Fertigteilelementen bei Decken und die Reduktion unnötig hoher Betonfestigkeiten von Stahlbetonbauteilen.

8 Literatur

- [1] *M. Sc. Sarah Vonk, M. Eng. Max Gerber, Prof. Dr.-Ing. Andreas Heuer: CO₂-Einsparpotenziale bei Fertigteildecken anhand eines Praxisbeispiels. Konstruktiv (2021), S. 39–41.*
- [2] *UN, I. E.A.: Global status report for buildings and construction (2019). Available at <https://www.gbpn.org/china/newsroom/2019-global-status-report-buildings-and-construction>. Access date 15 (2020).*
- [3] *Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP. Kompetenzen im Detail: Nachhaltiges Bauen [Stand: 23.03.2022]. Verfügbar unter: <https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/flyer/gabi/flyer-nachhaltiges-bauen.pdf>.*
- [4] *Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI). Leitfaden Nachhaltiges Bauen: Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden [Stand: 23.03.2022]. Verfügbar unter: https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/publikationen/BBSR_LFNB_D_190125.pdf.*
- [5] *A. Becke, J. Reiners: Erläuterungen zu den Umweltproduktdeklarationen für Beton. Erkrath: Bau + Technik GmbH (2020).*
- [6] *ift Rosenheim GmbH: Umweltproduktdeklaration (EPD) Deklarationsnummer: EPD-BS-10.2. Betonbewehrung Betonstahl. <https://docplayer.org/168183492-Umweltproduktdeklaration-epd.html>, 15.12.2022.*

- [7] HeidelbergCement: Betontechnische Daten. <https://www.betontechnische-daten.de/de/14-oekobilanzielle-kennwerte-fuer-zement-und-beton>.
- [8] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Dekarbonisierung von Zement und Beton. Minderungspfade und Handlungsstrategien. https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/VDZ-Studie_Dekarbonisierung_von_Zement_und_Beton.pdf, 15.12.2022.
- [9] Univ.-Prof. Dr.-Ing. Breitenbücher, R.: Nachhaltig Bauen mit Beton. Roadmap des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) für einen klimagerechten und ressourceneffizienten Betonbau. http://www.dafstb.de/application/2021-09-27_DAfStb_Roadmap_Nachhaltig_Bauen_mit_Beton_final.pdf, 11.04.2022.
- [10] www.energiezukunft.eu: CO₂-Emission im Bausektor. Zementproduktion kann klimafreundlicher werden. <https://www.energiezukunft.eu/bauen/zementproduktion-kann-klimafreundlicher-werden>. Abruf am 24.03.2022.
- [11] Maro Ballach/WWF Deutschland: Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie. Hintergrund und Handlungsoptionen. https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Klimaschutz_in_der_Beton-_und_Zementindustrie_WEB.pdf, 14.12.2022.
- [12] Die Bundesregierung: Bauen und Wohnen. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimafreundliches-zuhause-1792146#:~:text=16%20Prozent%20der%20gesamten%20CO2,%C3%BCber%20enrgiesparenden%20W%C3%A4rmeschutz%20bei%20Geb%C3%A4uden>, 15.05.2022.
- [13] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung: Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland. Kurzstudie zu sektorübergreifenden Wirkungen des Handlungsfelds „Errichtung und Nutzung von Hochbauten“ auf Klima und Umwelt. BBSR-Online-Publikation Nr. 17/2020. <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2020/bbsr-online-17-2020-dl.pdf>, 04.12.2022.
- [14] www.recyclingmagazin.de: Deutsche Zementindustrie auf dem Weg in eine CO₂-freie Zukunft. <https://www.recyclingmagazin.de/2020/11/25/deutsche-zementindustrie-auf-dem-weg-in-eine-co2-freie-zukunft/>, 15.12.2022.
- [15] Spaencoms neuer Markt. <https://www.lr-online.de/nachrichten/wirtschaft/spaencoms-neuer-markt-35487640.html>, 24.06.2021.
- [16] DW SYSTEMBAU GMBH: Technische Datenblätter über BRESPA-Decken. https://www.dw-systembau.de/files/downloads/allgemein/DW085_003_EPD-Verl%C3%A4ngerung_2020.pdf, 15.12.2022.
- [17] BVerfG: Beschluss des Ersten Senats vom 24. März 2021 zum Klimaschutzgesetz. http://www.bverfg.de/e/rs20210324_1bvr265618.html (24.03.2021).
- [18] Yagmur Kaymac: Umbemessung der Deckensysteme eines Stahlbetongebäudes bei Betrachtung der CO₂-Bilanz. Masterarbeit. Berlin 31.03.2022.

- [19] Nachhaltigkeit von Bauwerken –Umweltproduktdeklarationen. Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte;Deutsche Fassung EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021. Berlin: Beuth-Verlag GmbH 03/2022.
- [20] *Frederic Sobek*: Umbemessung der Gründung eines mehrgeschossigen Gebäudes bei Betrachtung der CO₂ -Bilanz. Bachelorarbeit. Berlin 16.05.2022.
- [21] *Vu Quang Nguyen*: Ein Beitrag zur Ermittlung der CO₂-Bilanz von Fertigteilen aus Stahlbeton. Bachelorarbeit. Berlin 25.05.2021.
- [22] *Janette Nagel*: Umbemessung des Stützensystems eines Stahlbetongebäudes bei Betrachtung der CO₂ -Bilanz. Bachelorarbeit. Berlin 19.04.2022.
- [23] *Stefanie Malohing*: Konventionelle Stahlbetonbauweise vs. Deckentragwerke aus Spannbetonelementen – Untersuchungen an einem mehrgeschossigen Gebäudekomplex. Masterarbeit. Berlin 31.10.2022.
- [24] *Gabor Attila Callmuth-Jonas*: Umbemessung des Aussteifungssystems eines Stahlbetongebäudes bei Betrachtung der CO₂ -Bilanz. Bachelorarbeit. Berlin 30.03.2022.
- [25] *CEN European Committee of Standardization*: prEN 1992-1-1:2018: Eurocode 2. Design of Concrete - Part 1-1. GGeneral Rules, Rules for Buildings, Bridges and Civil Engineering Structures, Draft 3. Brussels, Belgium (2018).
- [26] *DIN Normenausschuss für Bauwesen (NABAU)*: DIN EN 1992-1-1 Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau;. Berlin, Germany: Beuth Verlag (01-2011).
- [27] *DIN Normenausschuss für Bauwesen (NABAU)*: DIN EN 1992-1-1/NA Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter. Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Berlin, Germany: Beuth Verlag (01-2011).
- [28] *DIN Normenausschuss für Bauwesen (NABAU)*: DIN 276. Kosten im Bauwesen. Berlin, Germany: Beuth Verlag (12-2018).
- [29] *Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU)*: UMWELT-PRODUKTDEKLARATION. nach ISO 14025 und EN 15804+A1. Spannbeton-Fertigteildecken DW Systembau GmbH, 15.12.2022.
- [30] *Elma Avdyli, E. H.D.*: ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION. IN ACCORDANCE WITH EN 15804+A2 & ISO 14025 / ISO 21930. DELTABEAM® Composite Beam, Painted Peikko Group Corporation. https://media.peikko.com/file/dl/i/lc7O6g/MygZE0Zny_jpZBR6Rjuw0A/EPD_DELTABEAM_Painted_Canada_March2022.pdf, 15.12.2022.
- [31] *Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen*: Ökobaudat. https://www.oekobaudat.de/no_cache/datenbank/suche.html, 15.12.2022.
- [32] *Caala GmbH*: Ozonabbaupotential (ODP). <https://www.caala.de/lexikon/ozonabbaupotential-odp>, 06.05.2023.
- [33] *cold.world Engineering Berlin*: ODP - Ozone Depletion Potential von Kältemittel. <https://cold.world/de/know-how/odp-ozone-depletion-potential-von-k>, 06.05.2023.

- [34] Eutrophierungspotential (EP). <https://www.caala.de/lexikon/eutrophierungspotential-ep>, 06.05.2023.
- [35] *Bauforum Stahl*: Ozonbildungspotenzial (POCP). <https://bauforumstahl.de/wissen/nachhaltigkeit/nachhaltigkeit-glossar/ozonbildungspotenzial-pocp/>.
- [36] *Umweltbundesamt*: Primärenergiebedarf auf Basis AG Energiebilanzen. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergieverbrauch#definition-und-einflussfaktoren>, 06.05.2023.
- [37] *Matthias Janson*: So viel CO₂ stoßen Autos aus. <https://de.statista.com/infografik/25742/durchschnittliche-co2-emission-von-pkw-in-deutschland-im-jahr-2020/>, 05.05.2023.
- [38] *Schnell, J., Loch, M.*: Umrechnung historischer Baustoffkennwerte auf charakteristische Werte. Prüferingenieur (2009).