



*Eine Studie der Technischen Universität Dortmund
im Auftrag des VPI und der
Ingenieurkammer-Bau Nordrhein-Westfalen*

Zu konstruktionsbedingten
Treibhausgasemissionen (GWP)
in der Tragwerksplanung am
Beispiel ausgewählter Decken-
und Wandkonstruktionen im
Hochbau

Auftraggeber:

VPI Landesvereinigung der Prüflingenieurere für Bautechnik e.V.
Hohenstufenring 48-54
50674 Köln

Ingenieurkammer-Bau NRW
Körperschaft des öffentlichen Rechts
Zollhof 2
40221 Düsseldorf

**Zu konstruktionsbedingten Treibhausgasemissionen (GWP)
in der Tragwerksplanung am Beispiel ausgewählter
Decken- und Wandkonstruktionen im Hochbau**

Christopher Krinitzki, M.Sc.
Marc Kaczorowski, M.Sc.
Prof. Dr.-Ing. Christian Hartz

Bauphysikalische Nachweise durch
Pirlet & Partner Ingenieurgesellschaft mbH

Definition des Untersuchungsumfangs und
technisches Review durch Bollinger+Grohmann

März 2023

Technische Universität Dortmund
Lehrstuhl Tragkonstruktionen
August-Schmidt-Straße 6
44227 Dortmund

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einführung | 1 |
| 2 | Einleitung und Zielsetzung | 2 |
| 3 | Umwelt-Produktdeklarationen und GWP-Daten | 5 |
| 3.1 | Quellen für EPDs | 5 |
| 3.2 | Erläuterung verschiedener EPD-Datensätze | 6 |
| 3.2.1 | Spezifische Datensätze | 6 |
| 3.2.2 | Durchschnittliche Datensätze | 6 |
| 3.2.3 | Repräsentative Datensätze | 6 |
| 3.2.4 | Generische Datensätze | 6 |
| 3.2.5 | Verwendung der Datensätze | 7 |
| 3.3 | Erläuterung der Lebenszyklusphasen | 8 |
| 3.4 | Auswirkung der Module auf die Ökobilanz | 9 |
| 3.4.1 | Exemplarische GWP-Berechnung einer Geschossstütze | 11 |
| 3.5 | Streuungsbreite von GWP-Daten | 13 |
| 3.5.1 | Streuung durch Auswahl der EPD | 13 |
| 3.5.2 | Streuung durch Auswahl des Datensatztyps | 14 |
| 3.5.3 | Streuung durch Materialzusammensetzung | 15 |
| 3.6 | Verwendete GWP-Werte und Lebenszyklusphasen | 18 |
| 4 | GWP-Grenzwerte für Bürogebäude | 21 |
| 4.1 | Einleitung | 21 |
| 4.2 | Deutschland | 22 |
| 4.3 | Europäisches Ausland | 24 |
| 4.3.1 | Großbritannien | 24 |
| 4.3.2 | Schweiz | 24 |
| 4.3.3 | Frankreich | 24 |
| 4.3.4 | Dänemark | 24 |
| 4.4 | Zusammenfassung | 25 |
| 5 | GWP-Vergleich ausgewählter Deckensysteme | 26 |
| 5.1 | Allgemeines | 26 |
| 5.1.1 | Randbedingungen | 27 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.2 | Deckensysteme | 29 |
| 5.2.1 | Stahlbetonflachdecke | 30 |
| 5.2.2 | Stahlbetonrippendecke | 33 |
| 5.2.3 | Spannbetonhohlplatten mit Stahlträgern | 35 |
| 5.2.4 | Stahlbetonverbunddecke | 37 |
| 5.2.5 | Holzbetonverbundflachdecke mit Stahlträgern | 40 |
| 5.2.6 | Holzbetonverbundrippendecke mit Stahlträgern..... | 43 |
| 5.2.7 | Brettsperrholzdecke mit Stahlträgern | 50 |
| 5.2.8 | Brettsperrholzdecke mit BSH-Trägern..... | 53 |
| 5.3 | Fazit | 56 |
| 6 | GWP-Vergleich ausgewählter Außenwandsysteme | 58 |
| 6.1 | Allgemeines | 58 |
| 6.1.1 | Randbedingungen | 59 |
| 6.2 | Wandsysteme | 60 |
| 6.2.1 | Kalksandstein | 60 |
| 6.2.2 | Hochlochziegel | 64 |
| 6.2.3 | Porenbeton | 68 |
| 6.2.4 | Stahlbeton..... | 70 |
| 6.2.5 | Brettsperrholz | 72 |
| 6.2.6 | Holzständer..... | 75 |
| 6.3 | Fazit | 78 |
| 7 | Literaturverzeichnis | 80 |
| 8 | Anhang..... | A1 |
| 8.1 | Deckensysteme | A1 |
| 8.1.1 | Stahlbetonflachdecke | A1 |
| 8.1.2 | Stahlbetonrippendecke | A10 |
| 8.1.3 | Spannbetonhohlplatte mit Stahlträgern | A18 |
| 8.1.4 | Stahlbetonverbunddecke | A23 |
| 8.1.5 | Holzbetonverbundflachdecke mit Stahlträgern | A30 |
| 8.1.6 | Holzbetonverbundrippendecke mit Stahlträgern..... | A37 |
| 8.1.7 | Brettsperrholzdecke mit Stahlträgern | A53 |
| 8.1.8 | Brettsperrholzdecke mit BSH-Trägern..... | A58 |

1 Einführung

Der vorliegende Bericht vergleicht 8 Deckensysteme und 6 Wandaufbauten bzgl. des globalen Erwärmungspotenzials (GWP = global warming potential). Die Evaluierung des GWP stellt einen zentralen Bestandteil bei der Bewertung der umweltbezogenen Qualität von beispielsweise Tragwerken / Gebäuden dar. Berechnungen zum GWP lassen sich sowohl auf Bauteilebene als auch auf Bauwerksebene durchführen, wobei für Vergleiche sicherzustellen ist, dass gleiche funktionale und technische Anforderungen zugrunde gelegt werden (DIN EN 15804 [1]). Im vorliegenden Bericht findet die Evaluierung auf Bauteilebene statt. Die gewählten Aufbauten sind als Auszug der konstruktiven Möglichkeiten, dennoch mit dem Ziel einer Praxisnähe, zu verstehen.

Des Weiteren sei darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse der Studie auf den derzeit gültigen Normen und Systemgrenzen für die Anwendung von EPDs beruhen und die Gültigkeit der EPDs i.d.R. auf fünf Jahre begrenzt ist (die Gültigkeit der verwendeten EPDs sind dem Literaturverzeichnis Kap. 7 zu entnehmen).

Insbesondere sei angemerkt, dass die betrachtete Referenznutzungsdauer von 50 Jahren eine Annahme darstellt und diese zwar aktuell häufig als Grundlage von ökobilanziellen Betrachtungen verwendet wird, aber ausgewählte Systeme und/oder Bauteile eine weitaus längere Nutzungsdauer aufweisen können.

Für die Deckensysteme wurde ein fester und praxisüblicher Grundriss (Abb. 7) erarbeitet. Die weiteren Randbedingungen für die Deckensysteme sind Kap. 5.1.1 zu entnehmen. Die Randbedingungen der Wandsysteme sind in Kap. 6.1.1 festgehalten. Die Ergebnisse des Berichts verstehen sich nur innerhalb der definierten Randbedingungen und den verwendeten Umwelt-Produktdeklarationen (EPD = environmental product declaration) und sind nicht ohne Weiteres auf andere Grundrisse oder abweichende Randbedingungen übertragbar. Insbesondere sei für die Deckensysteme darauf hingewiesen, dass ein Ausnutzungsgrad von 100 % vor dem Hintergrund der Vergleichbarkeit (gleiche technische Anforderungen und demnach auch gleiche Ausnutzungsgrade) angestrebt wurde, wohingegen bei einer praxisüblichen Bemessung eher geringere Ausnutzungsgrade anvisiert werden. Die im Anhang aufgeführten Bewehrungspläne verstehen sich nicht als Ausführungspläne, sondern dienen allein der Erfassung der sich aus der Bewehrung ergebenden Massen für die Ermittlung des GWP.

2 Einleitung und Zielsetzung

Zum Erreichen der ausgerufenen Ziele des Pariser Klimaabkommens ist es unabdingbar den CO₂-Ausstoß in Zukunft drastisch zu reduzieren und zudem gewissenhafter mit den auf der Erde endlich zur Verfügung stehenden Rohstoffen umzugehen. Diesbezüglich steht der Bausektor, welcher derzeit für ca. 37 % der weltweiten CO₂-Emissionen verantwortlich ist und rund ein Drittel der weltweit erzeugten Energie benötigt (s. Abb. 1), vor einer besonderen Herausforderung.

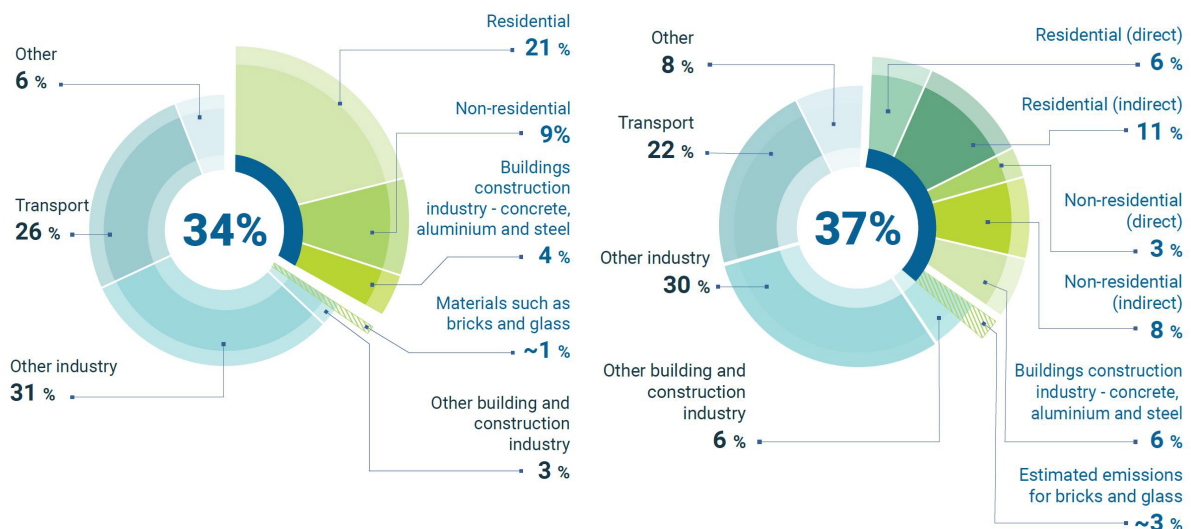


Abb. 1: Anteil von Gebäuden und Bauwerken am globalen Endenergieverbrauch sowie den globalen CO₂-Emissionen, 2021 [2]

Darüber hinaus verursacht der Bausektor in Deutschland ca. 55 % des Müllaufkommens [3] und beansprucht ca. 90 % der inländisch abgebauten mineralischen Rohstoffe [4]. Allein diese Eckdaten zeigen, dass ein Umdenken in der gesamten Branche stattfinden muss, um das von der Bundesregierung im Klimaschutzgesetz [5] ausgerufene Ziel der Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 zu erreichen. Daraus ergibt sich eine große Verantwortung für alle in diesem Wirtschaftszweig Beschäftigten, sich verstärkt für eine nachhaltig bebaute Umwelt einzusetzen.

Als Kernindikator für die Umweltwirkungen in Bezug auf den Klimawandel dient das globale Erwärmungspotenzial (GWP = global warming potential), welches den Emissionsbeitrag von Treibhausgasen wie Kohlenstoffdioxid (CO₂) oder Methan (CH₄) zum Treibhauseffekt quantifiziert. Aufgrund des unterschiedlichen Wirkungspotenzials von Treibhausgasen auf die Atmosphäre werden diese für eine bessere Vergleichbarkeit stets als CO₂-Äquivalente in Kilogramm [kg CO₂e] ausgewiesen¹.

Umweltwirkungen wie das GWP sind in sogenannten Umwelt-Produktdeklarationen (EPD = environmental product declaration) für ausgewiesene Einheiten (z.B. Kubikmeter oder Tonnen) tabellarisiert, deren Erstellung grundlegend in der DIN EN 15804 [1] sowie DIN EN ISO 14025 [7] geregelt ist. Allgemein weisen EPDs quantifizierte umweltbezogene Informationen von Produkten für verschiedene Lebenszyklusphasen auf und sind demnach

¹ Zum Beispiel entspricht 1 kg CH₄ bei einem Betrachtungszeitraum von 100 Jahren 25 kg CO₂e. Forster, P. et al. (2007) *Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing*.

fundamental für die Bewertung der umweltbezogenen Qualität von beispielsweise Bauteilen oder ganzen Gebäuden.

Das globale Erwärmungspotenzial ergibt sich aus dem Produkt des tabellarisierten GWP-Parameters aus der EPD mit der vorhandenen Menge des zu bilanzierenden Baustoffes oder Bauteils.

Beispielhafte Berechnung des GWP

$$\text{GWP [kg CO}_2\text{e]} = \text{GWP}_1 \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{m}^3} \right] \cdot \text{ME}[\text{m}^3]$$

GWP₁: aus der EPD entnommener GWP-Wert der jeweiligen Lebenszyklusphase(n) bezogen auf die ausgewiesene Einheit
ME: berechnete Gesamtmenge des zu bewertenden Produkts [hier: m³]

Darüber hinaus sind zahlreiche weitere Indikatoren in einer EPD ausgewiesen, exemplarisch seien hier das Versauerungspotenzial von Boden und Wasser (AP = acidification potential), die total erneuerbare Primärenergie (PERT = total use of renewable primary energy resources) und die Lagerung gefährlicher Abfälle auf Deponien (HWD = hazardous waste disposed) genannt.

Das GWP ist jedoch der wesentliche Indikator bei der Erstellung von Lebenszyklusanalysen (LCA = life cycle assessment), welche zur Bewertung der ökologischen Qualität eines Gebäudes verwendet werden und somit in die gesamtheitliche Nachhaltigkeitsbewertung z.B. von Zertifizierungsstellen wie der *DGNB*² und dem *BNB*³ auf nationaler Ebene oder auf internationaler Ebene bei *LEED*⁴ oder *BREEAM*⁵ einfließen. In Abhängigkeit des zugrunde gelegten Bewertungs- oder Zertifizierungssystems wird das Treibhauspotenzial unterschiedlich stark gewichtet, ist aber stets der maßgebende Indikator für die umweltbezogene Gebäudequalität.

Ziel dieser Studie ist es geeignete Maßnahmen zur Reduktion des GWP aufzuzeigen, um diese bereits in der Planungsphase zu bedenken und zur Sensibilisierung der Tragwerksplanenden beizutragen, sich diesem wichtigen Thema anzunehmen. Wichtig ist geeignete Indikatoren bei der Tragwerksplanung zu erkennen, die Maßnahmen mit hohen Erfolgsaussichten erlauben. Der Fokus dieses Berichtes liegt daher auf den Decken- und Wandsystemen, den bei üblichen Hochbauten volumen- und masseintensivsten Bauteilen.

² Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen - DGNB e.V.

³ Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen - Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen

⁴ Leadership in Energy and Environmental Design

⁵ Building Research Establishment Environmental Assessment Method

Dieser Bericht strukturiert sich wie folgt.

Zunächst werden in Kapitel 3 grundlegende Informationen zu Umwelt-Produktdeklarationen und GWP-Daten zusammengefasst, um auf Basis dieser, solide umweltbezogene Daten für die Vergleichsstudie auswählen zu können.

Kapitel 4 stellt Grenzwerte für das GWP von Bürogebäuden ausgewählter europäischer Länder einander gegenüber. Einerseits können so die Ergebnisse aus Kapitel 5 vorläufig eingeordnet werden, andererseits lassen sich Bestrebungen anderer Länder zur Reduktion der konstruktionsbedingten Treibhausgasemissionen im Vergleich zu Deutschland verdeutlichen.

Der Fokus liegt auf der Evaluierung des globalen Erwärmungspotenzials von Deckensystemen in Bürogebäuden (s. Kap. 5) sowie Wandsystemen von Wohngebäuden (s. Kap. 6), da diesen Bauteilen ein Großteil der konstruktionsbedingten Treibhausgasemissionen zugeordnet werden kann (s. Abb. 2).

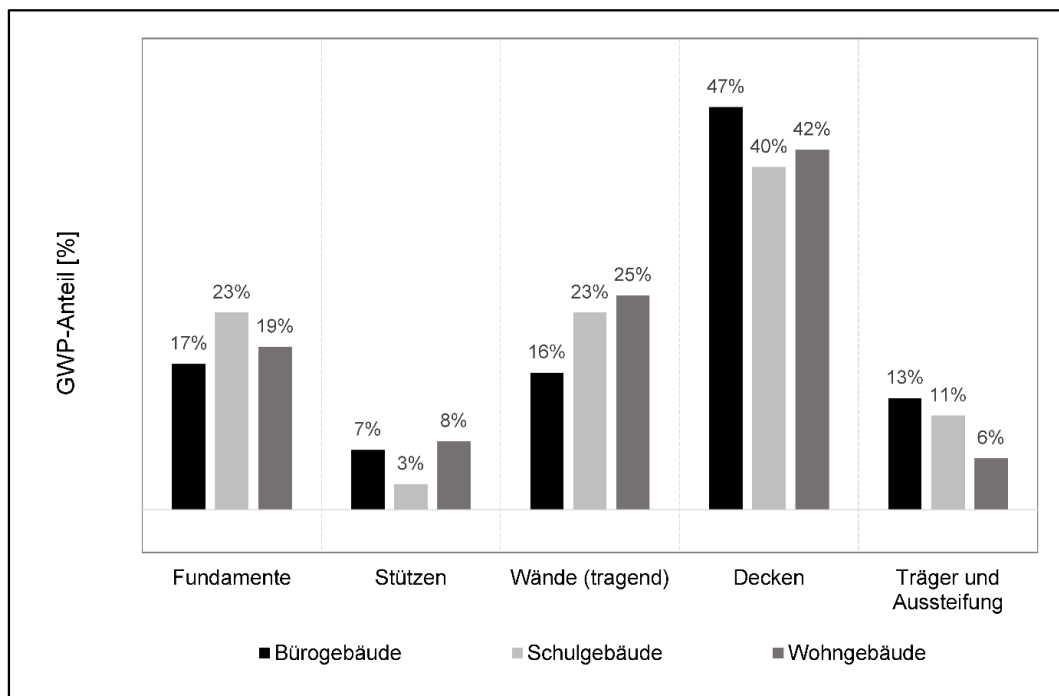


Abb. 2: Übersicht konstruktionsbedingter Treibhausgasemissionen nach [8]⁶

⁶ US-Studie, geringfügige Abweichungen zu europäischen Bauvorhaben möglich

3 Umwelt-Produktdeklarationen und GWP-Daten

3.1 Quellen für EPDs

Umwelt-Produktdeklarationen und die damit einhergehenden Daten zur Berechnung des globalen Erwärmungspotenzials sind auf unterschiedliche Weise verfügbar.

Vorrangig sind EPD-Datenbanken zu nennen, welche gemäß den technischen Regelwerken aufgestellte EPDs verwalten und z.T. eine Suchfunktion mit Filter enthalten. Tab. 1 gibt einen Überblick über wesentliche derzeit verfügbare nationale EPD-Datenbanken.

| Bezeichnung | Herausgeber | Link | |
|-------------|---|---|------|
| ÖKOBAUDAT | BMWSB | https://www.oekobaudat.de/ | [9] |
| IBU EPD | Institut Bauen und Umwelt e.V. | https://ibu-epd.com/ | [10] |
| ift EPD | Institut zur Prüfung und Zertifizierung von Bauprodukten, Sicherheitstechnik und Schutzausrüstung Rosenheim | https://www.ift-rosenheim.de/erstelte-epds | [11] |
| - | InformationsZentrum Beton GmbH | https://www.beton.org/wissen/nachhaltigkeit/umweltproduktdeklarationen | [12] |

Tab. 1: Nationale EPD-Datenbanken

Ferner gibt es internationale Datenbanken wie EPD International AB [13], die teilweise auch EPDs deutscher Hersteller enthalten. Weitere internationale Datenbanken sind in Anhang A des IStructE Berichts [14] aufgeführt.

Eine weitere wichtige Bezugsquelle von GWP-Daten stellen zunehmend die jeweiligen Herstellerseiten dar, auf welchen die EPDs spezifischer Produkte zum Herunterladen bereitgestellt werden. Darüber hinaus werden EPDs auch von diversen Forschungsinstituten (bspw. Thünen-Institut für Holzforschung) erstellt und publiziert.

Zur Durchführung von Lebenszyklusberechnungen sind bereits Softwarelösungen und browserbasierte Rechentools wie z.B. eLCA [15], GaBi [16], ecoinvent [17] oder One Click LCA [18] verfügbar. In diesen Programmen sind GWP-Datensätze hinterlegt. Teilweise sind die GWP-Werte jedoch nicht transparent ausgewiesen bzw. lassen sich nicht manuell anpassen.

3.2 Erläuterung verschiedener EPD-Datensätze

Die ausgewiesenen (GWP-)Daten von Umwelt-Produktdeklarationen können grundsätzlich auf verschiedenen Datensatztypen beruhen, welche sich vorrangig in ihrer Datengrundlage unterscheiden und ihre Aussagekraft dementsprechend zu beurteilen ist.

Zu unterscheiden ist, ob die erhobenen Daten konform zu DIN EN 15804+A1 oder neuerdings zu DIN EN 15804+A2 sind. In der neuen Norm wurden Berechnungsmethoden für einzelne Wirkungsindikatoren angepasst, sodass diese nicht mit den Wirkungsindikatoren konform zu DIN EN 15804+A1 verglichen oder gemeinsam verwendet werden dürfen [19].

Dieser Bericht legt die Datensätze gemäß DIN EN 15804+A1 zugrunde, da diese zurzeit für die BNB-Zertifizierung verbindlich anzuwenden sind und es sich bei vorhandenen Datensätzen konform zu DIN EN 15804+A2 überwiegend um generische Datensätze handelt.

Folgend werden vier relevante Datensatztypen kurz beschrieben.

3.2.1 Spezifische Datensätze

Spezifische Datensätze (*specific datasets*) enthalten umweltbezogene Daten für ein konkretes Produkt eines Herstellers, meist mit Angabe des entsprechenden Werkstandortes [20]. Sie bieten die derzeit akkuratete Darstellung der Umweltauswirkung eines bestimmten Produktes. Spezifische Datensätze müssen alle 5 Jahre aktualisiert werden [1].

3.2.2 Durchschnittliche Datensätze

Durchschnittliche Datensätze (*average datasets*) werden aus den Werten gemittelt, die von Industrieverbänden mit den Daten der im Verband organisierten Unternehmen erhoben werden. Auch Unternehmen veröffentlichen EPDs für ein Produkt mit den Durchschnittswerten mehrerer Werkstandorte. Dieser Datensatztyp beinhaltet demnach Produktdaten von verschiedenen Mitgliedern eines Industrieverbands oder verschiedenen Werkstandorten [20]. Demnach bilden durchschnittliche Datensätze für ein Produkt oder eine Produktfamilie ein breiteres Spektrum ab, z.B. wie, wo und mit welchem Energiemix dieses hergestellt oder entsorgt wird. Spezifische Datensätze können dabei als Datengrundlage eines durchschnittlichen Datensatzes fungieren.

3.2.3 Repräsentative Datensätze

Repräsentative Datensätze (*representative datasets*) sind repräsentativ für ein Land oder ein Unternehmen [20]. Sofern die zahlenmäßige und geographische Datenlage akkurat ist, können repräsentative Daten mehrerer Standorte eines Unternehmens auch zu einem repräsentativen Datensatz für ein Land oder eine Region erhoben werden. Repräsentative Datensätze basieren auf spezifischen oder durchschnittlichen Daten [21].

3.2.4 Generische Datensätze

Generische Datensätze (*generic datasets*) fußen auf Rechercheergebnissen sowie Literatursichtungen [20] und enthalten keine expliziten Werte von konkreten Produkten oder Herstellern. Einerseits werden generische Daten aus Sach- oder Ökobilanzen für Materialien und Prozesse von wissenschaftlichen Instituten, Universitäten oder Unternehmen zusammengestellt, andererseits basieren sie auf dokumentierten Erfahrungen (Statistiken,

Zulassungen, Messungen) von zugelassenen Experten. Möglich ist außerdem, dass generische Daten als Mittelwerte für ein konkretes Produkt oder einen Hersteller berechnet worden sind. Derartige Daten sollten unter Verwendung eines adäquaten Referenzszenarios so realistisch wie möglich erhoben werden und sollten weder Ideal- noch Sonderfälle beschreiben [22]. Generischen Datensätze sind in der ÖKOBAUDAT mit Sicherheitszuschlägen zwischen 10 und 30 % behaftet, da diese ohne unabhängige externe Prüfung aufgenommen werden und dementsprechend der Datenkategorie C zuzuordnen sind [20].

3.2.5 Verwendung der Datensätze

Generische Datensätze werden häufig für vorgelagerte Prozesse wie der Herstellung von Roh-, Grund- und Ausgangsstoffen sowie für die nachgelagerten Einbau-, Nutzungs- und Entsorgungsprozesse verwendet, während für die Produktherstellung bestenfalls spezifische oder durchschnittliche Daten des Herstellers verwendet werden [1].

Die Ökobilanzierung eines bestimmten Projekts sollte idealerweise mithilfe von spezifischen Datensätzen der Hersteller erfolgen, da diese die umweltbezogene Qualität der vorgesehenen Baustoffe am adäquatesten beschreiben. Sofern diese Daten in einer frühen Projektphase noch nicht vorliegen, sind vorzugsweise durchschnittliche Datensätze oder repräsentative Datensätze zu verwenden. Auf generische, nicht verifizierte Datensätze sollte nur zurückgegriffen werden, falls keine anderen Datensatztypen vorliegen.

Für vergleichende Studien bieten sich durchschnittliche Datensätze an, welche die länderspezifische Situation, bspw. in Deutschland, abbilden, sowie repräsentative Datensätze für das jeweilige Land oder die Region.

Die nachfolgende Tabelle fasst die zuvor erläuterten Datensatztypen zusammen und stellt die GWP-Werte verschiedener Datensatztypen am Beispiel eines Kubikmeters Brettschichtholz für die Module A1-A3+C3 (vgl. Kap. 3.3) dar.

| Datensatztyp | Datengrundlage | Anwendbar für | GWP-total für ausgewähltes Beispielprodukt | | |
|------------------|---|---|--|------|---|
| | | | Produkt | Jahr | Module A1-A3+C3 [kg CO ₂ e/m ³] |
| Spezifisch | Produktspezifisch | Ein bestimmtes Produkt (aus deklariertem Werkstandort) | binderholz Brettschichtholz | 2019 | 109,86 |
| Durchschnittlich | Mitglieder eines Industrieverbands oder verschiedene Werkstandorte | Produkte von allen inkludierten Herstellern / Standorten | der repräsentative Datensatz bildet durchschnittliche Produktionsverhältnisse in Deutschland ab | | |
| Repräsentativ | Land oder mehrere Werkstandorte | Produkte aus dem betrachteten Land / Industriezweig | Brettschichtholz Standardformen DE | 2021 | 153,10 |
| Generisch | Literatur und Recherche | Alle Produkte der betrachteten Art | kein Datensatz vorhanden | | |

Tab. 2: Übersicht der Datensatztypen: spezifische Daten nach [23], repräsentative Daten nach [21]

Aus der Gegenüberstellung der spezifischen und repräsentativen GWP-Daten eines vergleichbaren BSH-Produktes ergibt sich nach Tab. 2 eine Abweichung von ca. 43 %. Ein generischer Datensatz für BSH liegt nicht vor. Dabei ist anzumerken, dass die Verwendung von generischen Ökobilanzdatensätzen derzeit häufig zu schlechteren Ökobilanzergebnissen verglichen mit den Ergebnissen basierend auf spezifischen bzw. repräsentativen EPD-Datensätzen führt [24].

3.3 Erläuterung der Lebenszyklusphasen

Umwelt-Produktdeklarationen beinhalten für ein Produkt nicht nur verschiedene Umweltwirkungen, wie das GWP oder das AP. Sie deklarieren diesbezüglich keinen Gesamtwert, sondern gliedern den Lebenszyklus des Produkts in verschiedene Module. Infolgedessen werden die umweltbezogenen Daten modulweise ausgewiesen, sodass der Einfluss einzelner Module auf beispielsweise den GWP-Gesamtwert ausgewiesen und evaluiert werden kann. Die Module sind in sogenannte Lebenszyklusphasen zusammengefasst. Tab. 3 gibt eine Übersicht über die einzelnen Module und Lebenszyklusphasen, für ausführliche Definitionen und Beschreibungen sei u.a. auf die DIN EN 15804 [1] verwiesen.

| Herstellungsphase | | | Bauphase | | Nutzungsphase | | | | | | | Entsorgungsphase | | | | Ergänzungen außerhalb der Systemgrenze |
|--|-----------|-------------|--|--------------------|--|----------------|-----------|--------|------------------|---|-------------------------|---|-----------|------------------|-------------|--|
| | | | | | Bausubstanz | | | | | Betrieb | | | | | | |
| A1-A3 | | | A4-A5 | | B1-B5 | | | | | B6-B7 | | C1-C4 | | | | D |
| Rohstoffgewinnung, Transport zum Hersteller sowie Herstellung* | | | Transport des Produkts zur Baustelle sowie Einbau* | | Nutzung der Bausubstanz mit notwendiger Wartung, Reparatur, Ersatz oder Modernisierung** | | | | | Nötiger Energie- und Wassereinsatz für das Betreiben des Gebäudes** | | Rückbau oder Abriss sowie anschließendem Transport, Abfallbehandlung bei Weiter- oder Neunutzung oder Beseitigung des Produktes** | | | | Potenziale aus Wiederverwendung, Rückgewinnung oder Recycling des verwendeten Produktes. |
| A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | C1 | C2 | C3 | C4 | D |
| Rohstoff- bereitstellung | Transport | Herstellung | Transport | Bau-/Einbauprozess | Nutzung | Instandhaltung | Reparatur | Ersatz | Umbau/Erneuerung | betriebl. Energieeinsatz | betriebl. Wassereinsatz | Rückbau, Abriss | Transport | Abfallbehandlung | Deponierung | Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs-, Recycling-Potenzial |

*) einschließlich der dazu notwendigen Produkte, des Energieverbrauchs sowie entstehender Abfälle.

**) einschließlich der dazu notwendigen Produkte, des Energie- und Wasserverbrauchs sowie entstehender Abfälle.

Tab. 3: Übersicht der Lebenszyklusphasen nach DIN EN 15804

3.4 Auswirkung der Module auf die Ökobilanz

Sofern die notwendigen GWP-Daten vorliegen und die jeweiligen Mengen der Baustoffe / Bauteile bekannt sind, kann eine Beurteilung deren ökologischer Qualität vorgenommen werden. Eine möglichst präzise Bewertung gelingt, falls die Umweltwirkungen der Baustoffe / Bauteile für jede Lebenszyklusphase bekannt sind. Ein solcher Idealfall stellt derzeit jedoch eine Ausnahme dar. EPDs weisen i.d.R. Umweltparameter wie das GWP nicht für alle Phasen aus, da unterschiedliche Transportdistanzen zur Baustelle oder abweichende Bauabläufe sowie individuelle Annahmen für die Nutzungsphase nicht allgemeingültig abgedeckt werden können.

Grundsätzlich sind gemäß DIN EN 15804 [1] für jedwedes Szenario die Module A1-A3 verpflichtend auszuweisen. Bei Produkten, die biogenen⁷ Kohlenstoff enthalten, sind zusätzlich die Module C1-C4 sowie D zu deklarieren. Darüber hinaus sind, in Abhängigkeit des der Ökobilanzierung zugrunde gelegten Szenarios, weitere Module abzubilden.

Typische Szenarien sind (vgl. Abb. 3):

- Cradle-to-Gate (A1-A3)
- Cradle-to-Grave (A1-C4)
- Cradle-to-Cradle (Zirkuläres Bauen)

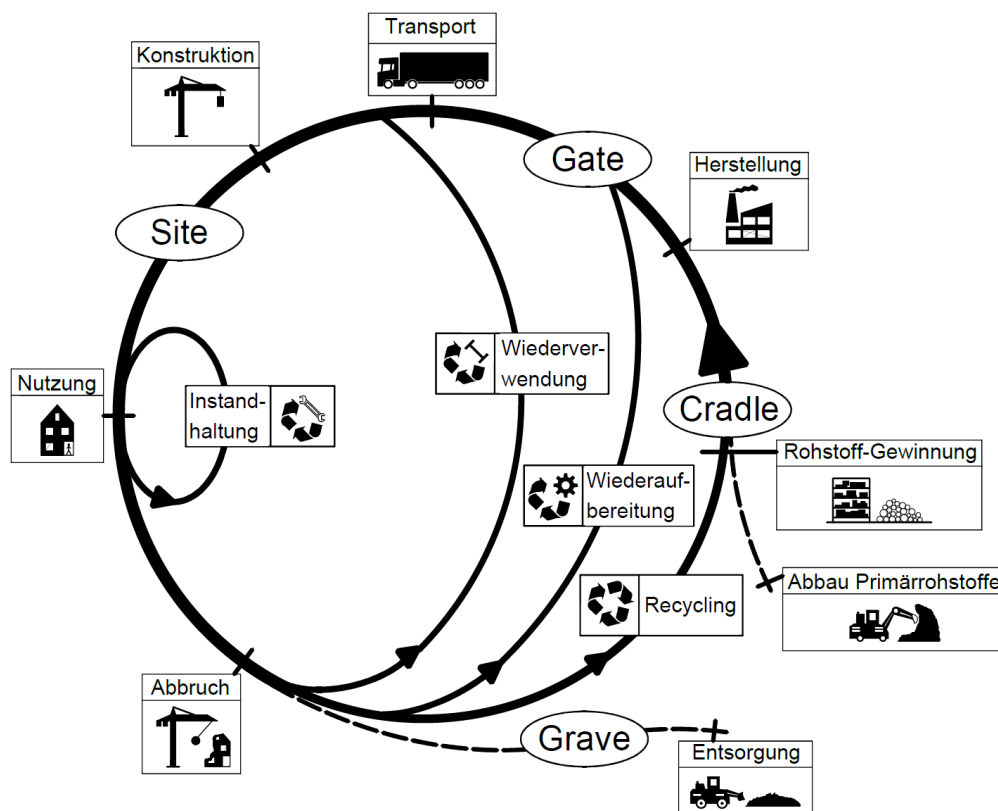


Abb. 3: Lebenszyklusphasen und Szenarien

⁷ Als biogen werden Stoffe bezeichnet, die durch lebende Organismen in natürlichen Prozessen entstanden sind und weder fossilisiert sind noch aus fossilen Ressourcen entstammen.

Bei der Bewertung des globalen Erwärmungspotenzials ist der Einfluss einiger Module weitaus höher als bei anderen, sodass selbst mithilfe von EPDs mit vergleichsweise wenigen betrachteten Modulen bereits wesentliche Erkenntnisse gewonnen werden können. So zeigt eine Studie der LETI [25] zu Bürogebäuden, dass die Herstellungsphase eines Gebäudes das Gesamt-GWP bereits signifikant beeinflusst (vgl. Tab. 4).

| | Herstellungsphase | | | Bauphase | | Nutzungsphase | | | | | | | Entsorgungsphase | | | |
|--|-------------------|----|----|----------|----|---------------|----|----|----|----|---------|----|------------------|----|----|----|
| | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | Bausubstanz | | | | | Betrieb | | C1 | C2 | C3 | C4 |
| | | | | | | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | | | | |
| Bürogebäude nach aktuellen Bauvorschriften | 16% | | | 1% | 1% | 15% | | | | | 66% | | 1% | | | |
| Bürogebäude mit Niedrigenergiebedarf | 34% | | | 2% | 2% | 32% | | | | | 28% | | 2% | | | |

Modul D wurde nicht berücksichtigt

Tab. 4: GWP-Anteile einzelner Lebenszyklusphasen gemäß [25]

Weiterhin ist ersichtlich, dass der Anteil der konstruktionsbedingten THG-Emissionen an Bedeutung gewinnt, sofern strengere Auflagen zur Energieeinsparungen umgesetzt werden. Betrachtet man diesen Fall, verursacht allein die Herstellungsphase rund ein Drittel der gesamten Emissionen. Dieser Zusammenhang zeigt sich für mittelgroße Wohngebäude noch deutlicher, denn hier weisen Studienergebnisse der Herstellungsphase ca. 50 % des Gesamt-GWP zu [25].

Auch bei der Betrachtung von einzelnen EPDs wird deutlich, dass insbesondere die stets deklarierten Module A1-A3 wesentlich zum Gesamt-GWP beitragen. Darüber hinaus sind je nach Material weitere Module für die Ökobilanzierung relevant. Zur Verdeutlichung sollen an dieser Stelle exemplarisch vier EPDs zur Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Konstruktionsvollholz [26], von gewalzten Stahlprofilen der Güten S235 bis S960 [27], von Betonen der Druckfestigkeitsklasse C30/37 mit durchschnittlicher Zusammensetzung [28] sowie von Bewehrungsstahl [29] dienen (s. Tab. 5).

| EPD | Quelle | Datensatztyp | Einheit | A1-A3 | A4 | A5 | B1 | C1 | C2 | C3 | D |
|-----------------|--------|---------------|--|--------|-----|-----|-------|-----|------|-------|---------|
| KVH | [26] | repräsentativ | [kg CO ₂ e/m ²] | -721,7 | NA | 5,5 | NA | NA | 0,5 | 809,7 | -351,4* |
| Stahl S235-S960 | [27] | Durchschnitt | [kg CO ₂ e/t] | 1125,0 | NA | NA | NA | NA | NA | 1,8 | -413,4 |
| Beton C30/37 | [28] | Durchschnitt | [kg CO ₂ e/m ²] | 252** | 4,5 | 1,1 | -10,0 | 3,1 | 12,0 | 6,0 | -21,4 |
| Bewehrung | [29] | repräsentativ | [kg CO ₂ e/t] | 818,0 | NA | NA | NA | NA | NA | 1,6 | 411,0 |

* Standardszenario thermische Verwertung

** inkl. 33 kg CO₂e aus dem Anteil aus der Verbrennung von Abfällen bei der Klinkerherstellung

Tab. 5: Übersicht der GWP-Werte für einzelne Module aus EPDs verschiedener Materialien

Bei KVH fußt der negative Wert für die Herstellungsphase auf der Einlagerung des Kohlenstoffs während der Wachstumsphase. Die negativen Werte bei Modul D stellen eine Gutschrift aufgrund des Recyclingpotenzials dar, wobei der negative Wert in Modul B1 bei Beton die CO₂-Aufnahme infolge der fortschreitenden Karbonatisierung während der Nutzungsdauer berücksichtigen soll.

Grundsätzlich ist anhand der tabellarisierten Werte sowie im folgenden Beispiel zu erkennen, dass für alle Materialien die Herstellungsphase ausschlaggebend für die Ökobilanzierung ist.

3.4.1 Exemplarische GWP-Berechnung einer Geschossstütze

Die Beispielrechnung basiert auf den folgenden Randbedingungen und Annahmen:

- Zentrische Bemessungsnormalkraft: 3 MN
 - Querschnittswahl mit dem Ziel einer Ausnutzung von 100 %
- Stützenlänge 3,5 m (Eulerfall 2)
 - Holz- und Stahlbetonstütze: Einfluss der Knicklänge vergleichsweise klein, sodass $A_{\text{erf}} \approx \frac{N}{\sigma_{\text{zul}}}$
 - Stahlstütze: Knicken um die schwache Achse berücksichtigt
- Holzstütze: C24, $k_{\text{mod}} = 0,8$, $\gamma_M = 1,3$, $\sigma_{\text{zul.}} = 12,92 \text{ N/mm}^2$
- Stahlstütze: S355, $\gamma_M = 1,1$, KSL b, HEB 280 ($A = 131 \text{ cm}^2$)
- Stahlbetonstütze: C30/37 mit Mindestbewehrung, $\sigma_{\text{zul.}} = 17 \text{ N/mm}^2$
 - $\rho_{l,\text{min}} \geq 0,15 \cdot \frac{|N_{\text{Ed}}|}{f_{\text{yd}}} = 0,15 \cdot \frac{3000}{43,5} = 10,34 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$
- GWP Berechnung
 - EPDs gemäß Tab. 5
 - Bei der Stahlbetonstütze wurde das durch die Bewehrung verdrängte Betonvolumen berücksichtigt, vereinfacht wurde die Bügelbewehrung vernachlässigt

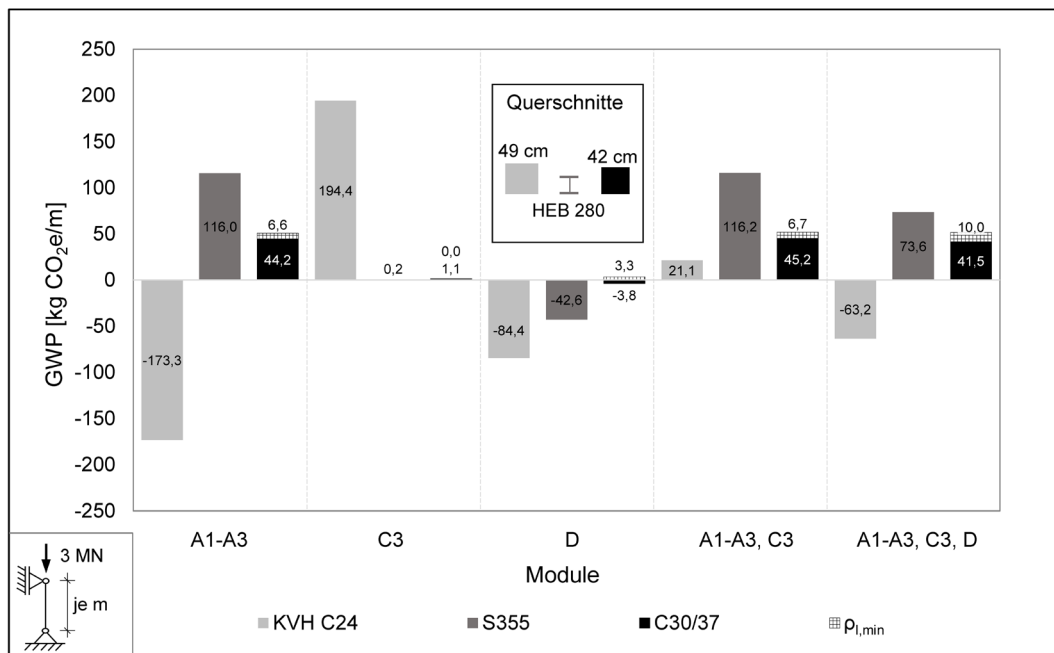


Abb. 4: GWP je Meter Stütze für unterschiedliche Materialien und ein Lastniveau von 3 MN

Für die GWP-Bewertung lassen sich die wesentlichen Erkenntnisse aus dem Diagramm wie folgt zusammenfassen:

- Für alle Baustoffe ist die Herstellungsphase maßgebend
- Für Holzbauteile wie die untersuchte Holzstütze würde man ohne Berücksichtigung von Modul C3 falsche Schlussfolgerungen ableiten, sodass für biogene Baustoffe stets C3 zu betrachten ist [1], um die Freisetzung des gebundenen Kohlenstoffdioxids zu erfassen
- Die hohe Recyclingrate von Stahlbauteilen wird durch die Gutschrift in Modul D erfasst, wodurch sich die GWP-Ergebnisse der Stahl- und Stahlbetonstütze für A1-A3, C3 und D annähern
- Für (Stahl-)Betonbauteile ist die Herstellungsphase klar dominant, alle anderen Module haben nur einen geringen Einfluss auf das GWP-Ergebnis
 - Trotz Verwendung der Mindestbewehrung ist selbst bei einem hauptsächlich druckbeanspruchten Bauteil wie der betrachteten Stütze der GWP-Anteil der Bewehrung nicht vernachlässigbar

HINWEIS:

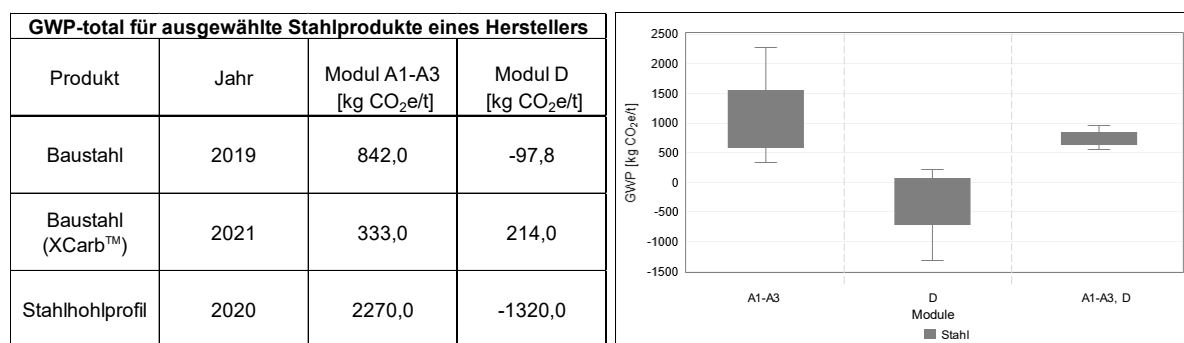
Die ausgewiesenen Werte treffen nur für das betrachtete Szenario einer 3,5 m langen Geschossstütze unter eine Belastung von 3 MN und den zugrunde gelegten Materialien und EPDs zu. Diese exemplarische Berechnung berücksichtigt keine Brandbemessung sowie keine etwaigen notwendigen Zusatzmaßnahmen zur Einhaltung bestimmter Feuerwiderstandsklassen.

3.5 Streuungsbreite von GWP-Daten

Aus den unterschiedlichen Datensatztypen sowie dem EPD-Angebot verschiedener Hersteller für vergleichbare Produkte resultiert eine gewisse Streuung der GWP-Daten, welche neben den zugrunde gelegten Lebenszyklusphasen die ökobilanzielle Bewertung beeinflusst.

3.5.1 Streuung durch Auswahl der EPD

Bereits bei der Auswahl der EPDs sind realistische Annahmen zu treffen und nicht die EPD zu verwenden, welche für ein Bauprodukt ein möglichst geringes GWP deklariert, jenes in dieser Form aber dann nicht im Projekt verwendet wird. Exemplarisch seien hier die GWP-Daten aus den EPDs [30–32] eines international agierenden Stahlkonzerns genannt, welche sich trotz vergleichbarer Aktualität und Produktionsstandorte wesentlich unterscheiden und je nach Anwendungsfall sorgfältig auszuwählen sind (s. Tab. 6).



Tab. 6: GWP-Daten für Stahlprodukte eines Herstellers

Demnach resultiert aus der Verwendung des XCarb-Baustahls mit Abstand das geringste GWP. Die Berücksichtigung dieses Baustahls mit erhöhtem Stahlschrottanteil und ausschließlich mit erneuerbaren Energien hergestellt, sollte allerdings nur dann erfolgen, wenn dieser tatsächlich im geplanten Projekt so verbaut wird.

Ein GWP-Vergleich lediglich auf Basis der Herstellungsphase der aufgeführten EPDs führt zu einem Unterschied von Faktor $\frac{2270}{333} = 6,8$. Erweitert man den Vergleich um Modul D, reduziert sich der Faktor bereits auf $\frac{2270-1320}{333+214} = 1,7$.

Ein Extrembeispiel zur Streuung von GWP-Daten lässt sich mit [33], Tabelle 19, aufzeigen, in welcher die GWP-Werte der Module A1-A3 von Bewehrungsstahl aus verschiedenen Herkunftsländern einander gegenübergestellt sind. Hier ergibt sich ein Faktor von ca. 10 zwischen dem niedrigstem und dem höchsten GWP-Wert.

3.5.2 Streuung durch Auswahl des Datensatztyps

Tab. 7 zeigt einen Überblick über die GWP-Werte von Bewehrung (Stabstahl) auf Grundlage verschiedener Datensatztypen (s. Kap. 3.2).

| Datensatztyp | Produkt | Grundlage | Jahr | GWP-total für Bewehrung | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------|---|--------------------------------------|-------------------------------------|
| | | | | Modul A1-A3 [kg CO ₂ e/t] | Modul C3 [kg CO ₂ e/t] | Modul D [kg CO ₂ e/t] |
| Spezifisch | Bewehrung (XCarb) von ArcelorMittal | Werkstandort Warschau | 2021 | 300,0 | 1,6 | 246,0 |
| Repräsentativ | Bewehrung von ArcelorMittal Europe | Werkstandorte Hamburg und Warschau | 2022 | 818,0 | 1,6 | 411,0 |
| Generisch (inkl. 20% Zuschlag) | Bewehrung | länderspezifische Situation in DE | 2017 | 683,4 | NA | NA |

Tab. 7: GWP-Daten für Bewehrung aus unterschiedlichen Datensätzen

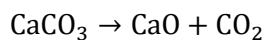
Zeile 1 verweist auf einen spezifischen Datensatz für (XCarb-)Bewehrung [34], welche aus Stahlschrott über die Sekundärroute ausschließlich unter Verwendung erneuerbarer Energien hergestellt wird und somit vergleichsweise geringe GWP-Werte für die Module A1-A3 aufweist. In Zeile 2 wird ein repräsentativer Datensatztyp für Bewehrung angegeben, welcher die GWP-Kennwerte der üblich erzeugten Bewehrung von ArcelorMittal Europe beinhaltet [29]. In Zeile 3 ist ein generischer Datensatztyp für Bewehrung inkl. Sicherheitszuschlag [35] infolge der Datengrundlage (vgl. Kap 3.2.4) aufgenommen. Hier zeigt sich, dass generische Daten häufig weniger Module umfassen als andere Datensatztypen.

Anhand der genannten Beispiele wird ersichtlich, dass die Wahl der zugrunde gelegten EPDs die Ökobilanzierung eines Bauteils, einer funktionalen Einheit oder eines Bauwerks entscheidend beeinflusst. Vor diesem Hintergrund hängt die Aussagekraft von vergleichenden Ökobilanzierungen zwischen Bauteilen, funktionalen Einheiten und Bauwerken aus verschiedenen Materialien entscheidend von der Qualität der zugrunde gelegten Umwelt-Produktdeklarationen und deren Datensatztypen ab.

3.5.3 Streuung durch Materialzusammensetzung

Beispielhafter Vergleich von CEM I und CEM III

Im Jahr 2020 wurden in Deutschland 55,25 Mio. m³ Beton⁸ produziert [36]. Der Baustoff besteht im Wesentlichen aus Zement, Gesteinskörnung und Wasser sowie etwaigen Zusatzmitteln/-stoffen. Die Festigkeitseigenschaften sowie die Verarbeitbarkeit des Betons werden mithilfe des Mischungsverhältnisses der einzelnen Bestandteile eingestellt. Darüber hinaus wird die umweltbezogene Qualität von Beton maßgeblich durch dessen Zusammensetzung, insbesondere dem Zementanteil sowie der zugrunde gelegten Zementart, beeinflusst [37]. Bei der Zementherstellung sind zwei wesentliche Prozesse für CO₂-Emissionen verantwortlich, welche sich hinsichtlich des globalen Erwärmungspotenzials ungünstig auf die Ökobilanzierung von Betonbauteilen auswirken. Einerseits entstehen beim hochenergetischen Brennen des Zementklinkers bei bis zu 1450°C prozessbedingte Emissionen, welche ca. ein Drittel der CO₂-Freisetzung bei der Zementherstellung ausmachen. Ein Ansatz zur Reduktion der prozessbedingten Emissionen besteht im Einsatz biomassehaltiger alternativer Brennstoffe. Andererseits werden rund zwei Drittel des Kohlenstoffdioxids beim chemischen Prozess der Entsäuerung des Kalksteins emittiert.



Um den Einfluss der chemisch bedingten Emissionen zu reduzieren, besteht ein Ansatz darin, in der Betonrezeptur einen geringeren Klinkergehalt vorzusehen. Dazu kann der Zement durch Secondary Cementitious Materials oder Zusatzstoffe wie Hüttensand, Flugasche oder Kalksteinmehl anteilig ersetzt werden [37]. Für Betone im üblichen Hochbau, der mindestens 65 % des Ortbetonbaus in Deutschland ausmacht, sind alle Zemente zugelassen [38]. Andere Anwendungsfälle sind aufgrund fehlender Zulassung derzeit davon ausgeschlossen.

Portlandzement (CEM I) besteht gemäß EPD des VDZ zu ca. 90 % aus Portlandzementklinker [39]. Dagegen ist in einem Hochofenzement (CEM III), welcher seit mehr als 100 Jahren industriell hergestellt wird [37], der Anteil von Portlandzementklinker mit ca. 45-50 % deutlich reduziert und vergleichbar mit dem Anteil von Hüttensand (ca. 45 %) [40].

Gemäß [38] ist der durchschnittliche Klinker-Zement-Faktor von 86 % im Jahr 1997 innerhalb von rd. 25 Jahren auf 71 % gesunken. Dieser Trend wird durch Abb. 5 bestätigt, in welcher eine Abnahme von CEM I am deutschen Zementproduktmix seit Mitte der 1990er Jahre hervorgeht.

⁸ Produktionsmenge von Beton in: 2015 – 46,80 Mio. m³, 2017 – 52,01 Mio. m³, 2019 – 53,15 Mio. m³

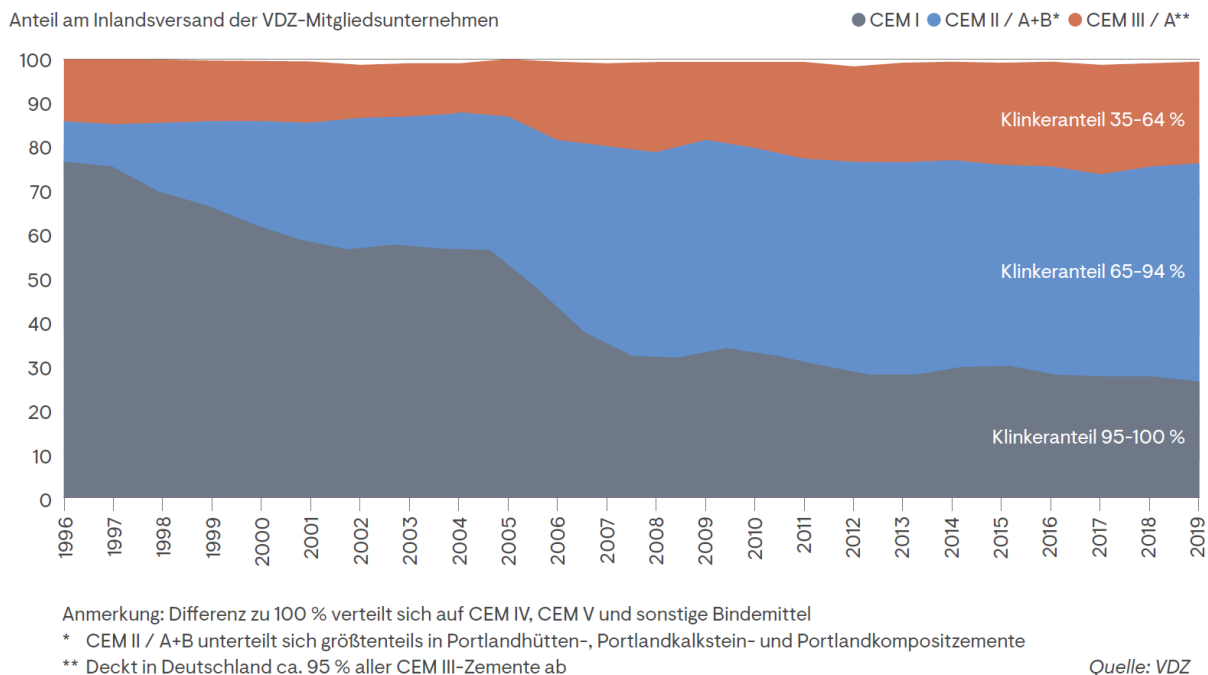


Abb. 5: Trend zu klinkereffizienten Zementen im Produktmix der Jahre 1996-2019 [41]

Bei einem Vergleich des GWP verschiedener Zementarten unter Verwendung von Umwelt-Produktdeklarationen des Vereins Deutscher Zementwerke e.V. aus dem Jahr 2022 ergeben sich für einen CEM III/A [40] sowie für einen im Jahr 2020 durchschnittlich hergestellten Zement in Deutschland [42] deutliche Einsparpotenziale gegenüber einem typischen CEM I [39].

| | Zusammensetzung [%] | | | | | GWP-total [kg CO ₂ e/t] | | Verhältnis |
|-----------|-----------------------|------------|-----------|---------------|----------|------------------------------------|---|------------|
| | Portlandzementklinker | Hüttensand | Kalkstein | Gips/Anhydrit | Sonstige | A1-A3 | Bruttoemissionen inkl. CO ₂ aus Verbrennung von Abfällen | |
| CEM I | 90,0 | 0,0 | 2,5 | 6,0 | 1,5 | 665,0 | 875,0 | 100% |
| CEM III/A | 47,5 | 45,0 | 1,5 | 6,0 | 0,0 | 433,0 | 543,8 | -38% |
| Zement* | 70,0 | 18,0 | 5,0 | 6,0 | 1,0 | 553,0 | 715,0 | -18% |

* Durchschnittlicher Zement in Deutschland 2020, EPD-Ausstellung im Jahr 2022, repräsentativer Datensatz

Tab. 8: Vergleich des globalen Erwärmungspotenzials verschiedener Zementarten

Zudem ist bei dieser Betrachtung wichtig, den Zusammenhang bzgl. der Auswirkung der Zementart auf die Rissbildung des Betons und die damit einhergehende Bewehrungsmenge mit einzubeziehen. Die bei der Hydratation des Zements entstehende Wärme während der Betonhärtung kann innerhalb der ersten Tage nach dem Betonieren zu Oberflächen-, Trenn- sowie Biegerissen mit Rissbreiten von über 1 mm führen [43]. Bei der Verwendung eines CEM III 32,5 N entsteht dabei nur ca. 70% der Hydratationswärme im Vergleich zu einem CEM I 32,5 N [44], wodurch weniger Bewehrung zur Kontrolle des Rissbildes notwendig ist. Einsparungen bei der Bewehrung gehen linear in die Berechnung des GWP der Stahlbetonbauteile ein.

Ausblick auf Zementzusatzstoffe und alternative Bindemittelsysteme

Dem Trend des sinkenden Klinkeranteils in Zementen gegenüber steht eine anstehende Verknappung von Steinkohlenflugasche und Hüttensand, die Klinker ersetzen. Hier lässt sich eventuell mit Kalksteinmehl als Betonzusatzstoff gegenwirken. Dieses ist zugelassen und global in großen Mengen verfügbar. In der europäischen Norm sind bis zu 35 M.-% Kalksteinmehl als Hauptbestandteil zugelassen, die durchschnittliche Substitutionsmenge liegt aber nur bei 7 M.-% [45].

Neben der Verwendung von Zusatzstoffen wird auch an alternativen Bindemittelsystemen geforscht, die bei vergleichbarer Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit geringere CO₂-Emissionen verursachen. Mittelfristig kommen dabei verschiedene alternative Bindemittelsysteme infrage. Mit der Verwendung von Calcium-Sulfoaluminat-Zementen (CSA-Zemente) können bis zu 30 % CO₂ im Vergleich zu einem CEM I eingespart werden, das Einsparpotenzial gegenüber dem heutigen Zementportfolio ist aber gering. Ähnliche Werte können mit der Verwendung von Calciumhydroxysilicaten (CHS) erreicht werden. Ein höheres Potenzial bietet die Karbonatisierung von Calcium-Silicat(hydraten). Dabei beträgt das mögliche Einsparpotenzial unter bestimmten Voraussetzungen rund 60 % gegenüber dem heutigen Zementportfolio [46]. Wegen regional schwer verfügbaren Rohstoffen und begrenzter technischer Leistungsfähigkeit dieser Bindemittel sind die Einsatzmöglichkeiten in Bauwerken aber eingeschränkt [37]. Gemäß [41] dürfen derartige Bindemittel CEM I bis 2030 nur zu 1 % und bis 2050 nur zu 5 % ersetzen [14].

3.6 Verwendete GWP-Werte und Lebenszyklusphasen

Auf Basis der zuvor aufgezeigten Einflüsse verschiedener Datensatztypen und Module auf die Aussagekraft von umweltbezogenen Wirkungsindikatoren wie dem globalen Erwärmungspotenzial sowie der Verfügbarkeit dieser GWP-Daten werden dieser Studie die Module A1-A3, C3 und D zugrunde gelegt (s. Tab. 9). Um den Einfluss der einzelnen Module quantifizieren zu können, werden die Ergebnisse der jeweiligen Module einzeln und summiert ausgewiesen. Demnach werden die wesentlichen Module erfasst und gleichzeitig wird sichergestellt, dass die Daten für diese Module bei nahezu allen verwendeten EPDs vorliegen. Zudem wird auf diese Weise eine Vergleichbarkeit zwischen diversen Baustoffen gewährleistet und vermieden, dass in den GWP-Resultaten verschiedener Baustoffe unterschiedlich viele Module berücksichtigt sind.

| Herstellungsphase | | | Bauphase | | Nutzungsphase | | | | | | | Entsorgungsphase | | | | Ergänzungen außerhalb der Systemgrenze |
|-------------------------|-----------|-------------|-----------|--------------------|---------------|----------------|-----------|--------|------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|-----------|------------------|-------------|--|
| A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | Bausubstanz | | | | Betrieb | | | C1 | C2 | C3 | C4 | D |
| Rohstoff-bereitstellung | Transport | Herstellung | Transport | Bau-/Einbauprozess | Nutzung | Instandhaltung | Reparatur | Ersatz | Umbau/Erneuerung | betrieblicher Energieeinsatz | betrieblicher Wassereinsatz | Rückbau, Abriss | Transport | Abfallbehandlung | Deponierung | Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs-, Recycling-Potenzial |

Tab. 9: Verwendete Module für den GWP-Vergleich im Szenario Cradle-to-Gate zzgl. C3 und D

Weiterhin werden für die Beurteilung der konstruktionsbedingte Treibhausgasemissionen nach Möglichkeit EPDs verwendet, deren Werte auf durchschnittlichen oder repräsentativen Datensätzen konform zu DIN EN 15804+A1 (vgl. Kap. 3.2) beruhen. Generische Daten werden nur verwendet, sofern für den jeweiligen Baustoff keine EPD auf Basis anderer Datensatztypen vorliegt.

In Modul D wird bei den Holzwerkstoffen das Standardszenario einer thermischen Verwertung von Altholz berücksichtigt, wobei häufig auch ein stoffliches Szenario mit einer bedeutend geringeren Gutschrift ausgewiesen wird.

Bei der Gutschrift der thermischen Verwertung wird angenommen, dass die thermische Energie durch die Verbrennung des Altholzes den äquivalenten Energieanteil infolge Verbrennung fossiler Brennstoffe (gemäß EPDs i.d.R. Erdgas) ersetzt und dieser substituierte Strom dem aktuellen deutschen Strommix entspräche. Dies sollte bei der Bewertung der Ergebnisse bedacht werden, da sich der Strommix bis zum Ende der Nutzungsdauer von Materialien/Bauteilen/Gebäuden voraussichtlich ändern wird und die Substitution von Energie, welche überwiegend aus erneuerbaren Energien gewonnen wird, in deutlich geringeren Gutschriften resultiert. Dies ist einer der Gründe, weshalb die Berücksichtigung von Modul D gesondert erfolgen sollte.

Alle verwendeten GWP-Werte einschließlich der EPD, des Datensatztyps und der Bezugsgröße werden in Tab. 10 für die jeweiligen Module in „kg CO_{2e} je deklarierte Einheit“ zusammengefasst. Da jede EPD einen Gültigkeitszeitraum aufweist, sind die tabellarisierten GWP-Werte auch nur innerhalb dieses Zeitraums zu verwenden und nach Ablauf durch aktualisierte Datensätze zu ersetzen.

| Baustoff / Produkt | Quelle | Datensatztyp (Sicherheitszuschlag) | Deklarierte Einheit | A1-A3 | C3 | D |
|---|--------|--|---|--------|-------|--------|
| Beton C20/25 | [47] | Durchschnitt | m ³ (ρ = 2400 kg/m ³) | 204* | 6,01 | -21,4 |
| Beton C30/37 | [28] | Durchschnitt | m ³ (ρ = 2400 kg/m ³) | 252** | 6,01 | -21,4 |
| Beton C45/55 | [48] | Durchschnitt | m ³ (ρ = 2400 kg/m ³) | 328*** | 6,01 | -21,4 |
| Bewehrung | [29] | Repräsentativ für Hersteller | t (ρ = 7850 kg/m ³) | 818 | 1,6 | 411 |
| Spannstahl (SWE)* | [49] | Spezifisch für Hjulsbro Steel Schweden | t (ρ ≈ 7850 kg/m ³) | 1820 | 18,5 | -772 |
| Baustahl | [27] | Durchschnitt für Mitglieder des BauforumStahl | t (ρ = 7850 kg/m ³) | 1125 | 1,8 | -413,4 |
| Kalksandstein (KS) | [50] | Durchschnitt | m ³ (ρ = 1800 kg/m ³) | 209 | NA | -4,49 |
| Hochlochziegel (HLz) | [51] | Durchschnitt | m ³ (ρ = 575 kg/m ³) | 113 | -10,1 | -1,46 |
| Porenbeton (PB) | [52] | Generisch (10%) | m ³ (ρ = 500 kg/m ³) | 222,6 | 3,18 | -0,97 |
| Brettsper Holz (BSP) | [53] | Repräsentativ für Deutschland | m ³ (ρ = 489,4 kg/m ³) | -658 | 792,5 | -306 |
| Brettschichtholz (BSH) | [21] | Repräsentativ für Deutschland | m ³ (ρ = 507 kg/m ³) | -666,2 | 819,3 | -319,1 |
| Konstruktionsvollholz (KVH) | [26] | Repräsentativ für Deutschland | m ³ (ρ = 493 kg/m ³) | -721,7 | 809,7 | -351,4 |
| Holzfaserdämmstoff (HDP) | [54] | Repräsentativ für Deutschland | m ³ (ρ = 150,8 kg/m ³) | -156,3 | 238,2 | -124 |
| Mineralwolle (MW) | [55] | Generisch (10%) | m ³ | 70,39 | 1,27 | NA |
| Mineralwolle mit mittlerer Rohdichte | [56] | Repräsentativ für Verbands- mitglieder der Mineralwolle- industrie | m ³ (ρ = 100 kg/m ³) | 117 | NA | NA |
| WDVS-Verklebung + mineralische Putzbeschichtung (WDVS- Verklebung+MP) | [57] | Generisch (10%) | m ² | 9,84 | NA | NA |
| Gipsputz (GP) | [58] | Generisch (10%) | m ³ | 119,4 | NA | NA |
| Gips-Kalk-Putz (GKP) | [59] | Generisch (10%) | m ³ | 134,2 | NA | NA |
| Gipskartonplatte (GKB) | [60] | Generisch (10%) | m ² (t = 12,5 mm) | 1,54 | NA | NA |

| | | | | | | |
|------------------------------------|------|---|---|--------|-------|--------|
| Nadelschnittholz (Holzschalung) | [61] | Repräsentativ für Deutschland | m ³ (ρ = 484,5 kg/m ³) | -738,9 | 796,8 | -349,5 |
| Dampfbremse (PE) | [62] | Generisch (10%) | m ² (t = 0,2 mm) | 0,4 | 0,56 | -0,27 |
| Zementestrich | [63] | Generisch (10%) | t (ρ = 2400 kg/m ³) | 183,6 | NA | NA |
| Splitt (getrocknet) | [64] | Generisch (10%) | t (ρ ≈ 1500 kg/m ³) | 34,27 | 6,73 | -2,05 |
| Brandschutzanstrich ⁺⁺ | [65] | Spezifisch für Rudolf Hensel GmbH | t (ρ ≈ 1300 kg/m ³) | 1840 | NA | NA |
| Brandschutzplatte | [66] | Spezifisch für Etex Building Performance International | m ² (t = 0,5 cm) | 2,67 | NA | NA |

Tab. 10: GWP-Werte einschließlich der EPD, des Datensatztyps und der Bezugsgröße

NA GWP-Wert für Modul nicht ausgewiesen

* inkl. 26 kg CO₂e aus dem Anteil aus der Verbrennung von Abfällen bei der Klinkerherstellung

** inkl. 33 kg CO₂e aus dem Anteil aus der Verbrennung von Abfällen bei der Klinkerherstellung

*** inkl. 42 kg CO₂e aus dem Anteil aus der Verbrennung von Abfällen bei der Klinkerherstellung

+ Stand 02/2023 lag keine andere EPD für Spannstahl vor, Umweltwirkungen erhoben nach DIN EN 15804+A2

** enthält nicht die Umweltwirkungen der Grundierung – für die Grundierung lag Stand 02/2023 keine EPD vor

4 GWP-Grenzwerte für Bürogebäude

4.1 Einleitung

Referenzwerte dienen dem Vergleich, inwiefern aktuelle Planungs-/Bauvorhaben in Bezug auf ihre umweltbezogene Qualität einzuordnen sind. Diese stehen aktuell für einige Länder in Form von Ziel-/Richt- bzw. Grenzwerten zur Verfügung. Die Bedeutung der Referenzwerte nimmt in Anbetracht der Zielsetzung des Pariser Klimaabkommens sowie der in Deutschland angestrebten Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 zu. Abb. 6 zeigt eine mögliche Trendkurve der Entwicklung des konstruktionsbedingten GWP bezogen auf einen Quadratmeter Gebäudefläche in Anlehnung an [67], wobei diese auf einem CO₂-Budget von 21 GT CO₂e bis 2050 und einer erforderlichen neuen Gebäudefläche von 230 Mrd. m² bis 2060 basiert [68].

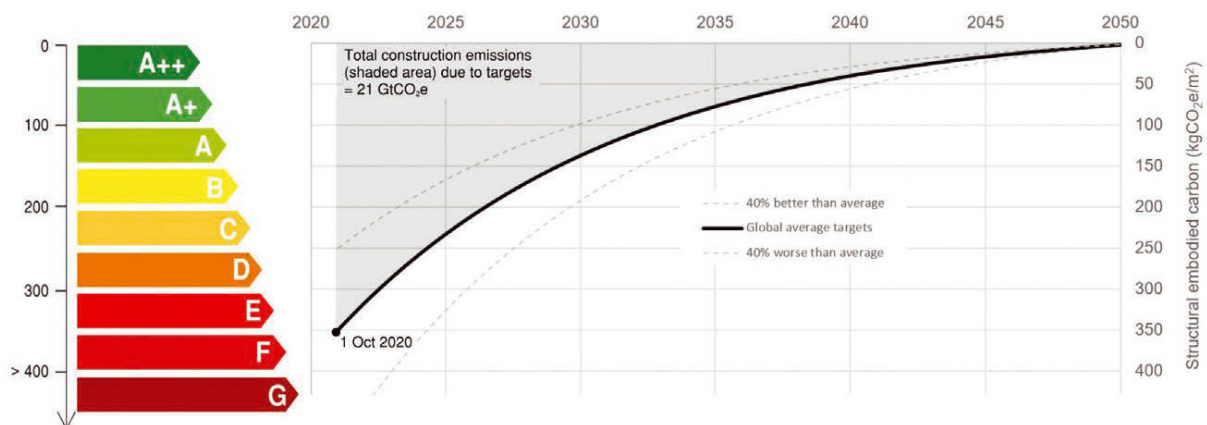


Abb. 6: Jährliche Zielwerte für konstruktionsbedingte Treibhausgasemissionen [67]

Auch vor diesem Hintergrund sei auf die aktuell durch die Baubranche verursachten CO₂-Emissionen verwiesen. Abb. 6 zeigt eindrücklich, dass eine deutliche Reduktion der THG-Emissionen erforderlich ist.

Die nachfolgend aufgeführten empfohlenen Richtwerte, Zielwerte bzw. gesetzlich verankerten Grenzwerte wurden für eine bessere Vergleichbarkeit unter Berücksichtigung der angegebenen Referenz-Nutzungsdauer (RSL) auf die Einheit „kg CO₂e/m² je Jahr“ umgerechnet, sofern diese derartig nicht deklariert waren⁹. In Abhängigkeit der Region variiert die Bezugsfläche „je m²“ geringfügig.

Für Hintergrundinformationen zu den Referenzwerten sei auf die jeweils angegebenen Quellen verwiesen. Die Referenz-Nutzungsdauer entspricht dabei der Nutzungsdauer, welche infolge Festlegung bestimmter (Referenz-)Nutzungsbedingungen zu erwarten ist und u.a. die Basis für die umweltbezogene Bewertung von Ersatz- (Modul B4) sowie Modernisierungsmaßnahmen (Modul B5) darstellt [1].

⁹ Sofern Gesamtwerte in „kg CO₂e/m²“ von Interesse sind, sind die jährlichen Werte mit der angegebenen RSL zu multiplizieren. Die Mehrheit der hier betrachteten Länder gibt die Richtwerte in „kg CO₂e/m² je Jahr“ an.

4.2 Deutschland

In Deutschland gibt es aktuell (Stand: 02/2023) keine politischen oder normativen Vorgaben hinsichtlich einzuhaltender Grenzwerte konstruktionsbedingter Treibhausgasemissionen. Lediglich das öffentlich-rechtliche Zertifizierungssystem *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)* (für Bundesbauten verpflichtend) sowie das privat-rechtliche Zertifizierungssystem der *Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB)* evaluieren im Rahmen der gesamten Nachhaltigkeitsbewertung den ökologischen Einfluss konstruktionsbedingter THG-Emissionen für Büro- und Verwaltungsgebäude.

So legt das *BNB* in Abschnitt 1.1.1 des Kriterienkatalogs aus dem Jahr 2015 zur vollständigen Erfüllung des Anforderungsniveaus einen maximalen

GWP-Grenzwert von $24 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^2_{\text{NGFa}} \cdot \text{a})$

fest [69], wobei in diesem Wert das GWP der Betriebsenergie inkludiert ist. Die Grenzwerte des Kriterienkatalogs basieren auf den Ergebnissen des BBSR Forschungsvorhabens 10.08.17.7-14.19 [70], in welchem das Treibhauspotenzial in konstruktionsbedingte und energetische Emissionen unterteilt ist. Daraus abgeleitet ergibt sich mit dem Verhältniswert der Mediane von $\text{THG}_{\text{Konstruktion}}/\text{THG}_{\text{Energie}}$ für Bürogebäude ein Anforderungsniveau der konstruktionsbedingten¹⁰

THG-Emissionen von ca. $7,9 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^2_{\text{NGFa}} \cdot \text{a})$

unter Berücksichtigung der Module A1-A3 sowie C3-C4.

Die *DGNB* weist in ihrem Kriterienkatalog [71] aktuell einen konstruktionsbedingten¹¹

Referenzwert von $9,4 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^2_{\text{NRF}} \cdot \text{a})$

aus, bezieht neben den Modulen A1-A3 und C3-C4 aber zusätzlich das Modul B4 sowie das Modul D zur Berücksichtigung von Lasten oder Gutschriften aus dem Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- bzw. Recycling-Potenzial mit ein. Dieser Referenzwert ergibt mithilfe von Umrechnungsfaktoren einen Grenzwert bzw. Zielwerte, welche als Bewertungsmaßstab für die Teilbepunktung innerhalb der Zertifizierung dienen. Die Teilpunkte sind nachfolgend tabellarisiert, wobei der Referenzwert 40 Teilpunkten entspricht.

| Jahr 2022 | Grenzwert | Referenzwert | Zielwert | Übererfüllung |
|---|-----------|--------------|------------|---------------|
| Umrechnungsfaktor | 1,4 | 1,0 | 0,7 | 0,55 |
| GWP [kg CO ₂ e/(m ² _{NRF} ·a)] | 13,2 | 9,4 | 6,6 | 5,2 |
| Teilpunkte | 0 | 40 | 80 | 100 |

Tab. 11: Bewertung des globalen Erwärmungspotenzials gemäß DGNB-Bewertungskatalog

Darüber hinaus sind 5 Bonuspunkte zu erreichen, sofern der Referenzwert um mehr als 50 % unterschritten wird. An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Ökobilanz im gesamten *DGNB*-Zertifizierungsprozess nur eine von insgesamt 37 Bewertungskategorien darstellt und lediglich 9,5 % der Gesamtnachhaltigkeitsbewertung entspricht [72], wobei die konstruktionsbedingten THG-Emissionen nur ca. 3-5 % ausmachen.

¹⁰ Bauteile der KG 300 und 400, welche mit mind. 1% an der Gesamtmasse und am GWP beteiligt sind

¹¹ Bauteile der KG 300 und 400 gemäß DGNB GmbH (2018) *DGNB System – Kriterienkatalog Gebäude Neubau – ENV1.1 / Ökobilanz des Gebäudes*, Anlage 1

Zudem wurde am 30.12.2022 das Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG) vom Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) veröffentlicht, welches als Grundlage für das ab dem 01.03.2023 startende Förderprogramm Klimafreundlicher Neubau (KFN) dient [73]. Es definiert Grenzwerte für Wohn- und Nichtwohngebäude und differenziert zwischen zwei Anforderungsniveaus. QNG-PLUS wird für das vom BMWSB definierte Niveau 1, dem angehobenen Ambitionsniveau, und QNG-PREMIUM wird für Niveau 2, dem hohen Ambitionsniveau, vergeben [74].

Der für QNG-PLUS definierte

GWP-Grenzwert von $12 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^2_{\text{NRF}}\cdot\text{a})$

bezieht sich für Nichtwohngebäude auf die Module A1-A3, B4 und C3-C4. Gesondert wird für das Recyclingpotenzial (Modul D) der GWP-Grenzwert von $-2,4 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^2_{\text{NRF}}\cdot\text{a})$ angegeben.

Für die QNG-Premium Zertifizierung ist der

GWP-Grenzwert von $9,5 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^2_{\text{NRF}}\cdot\text{a})$

einzuhalten. Es werden die gleichen Module wie für QNG-PLUS berücksichtigt. Für Modul D ist der GWP-Grenzwert mit $-3,5 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^2_{\text{NRF}}\cdot\text{a})$ ausgewiesen.

Voraussetzung für die Vergabe eines QNG Siegels ist die Durchführung einer Nachhaltigkeitsbewertung. Diese muss auf Grundlage einer deutschen Akkreditierungsstelle erfolgen (bspw. DGNB oder BNB) [75].

4.3 Europäisches Ausland

4.3.1 Großbritannien

Das *Royal Institute of British Architects (RIBA)* schlägt für das Jahr 2025 einen Zielwert für neue Bürogebäude von $970 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{m}^2_{\text{NGF}}$ unter Einbeziehung der Module A1-A5, B1-B5 und C3-C4 vor [76], was bei einer Referenzstudienzeit von 60 Jahren [77] einen Zielwert von $16,2 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^2_{\text{NGF}}\cdot\text{a})$ konstruktionsbedingter¹² THG-Emissionen ergibt. Darin enthalten ist der positive Effekt der CO_2 -Einlagerung von biogenen Baustoffen wie Holz während der Referenzdauer, vorausgesetzt das Holz stammt aus einer nachhaltigen Forstwirtschaft.

Das *London Energy Transformation Initiative (LETI)* weist $500 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{m}^2_{\text{NGF}}$ bzw. $8,3 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^2_{\text{NGF}}\cdot\text{a})$ als aktuellen Zielwert der konstruktionsbedingten¹² THG-Emissionen innerhalb der Module A1-A5 aus, wobei auch hier der Einfluss der CO_2 -Speicherung durch beispielsweise Holz eingeht [25].

Sowohl *RIBA* mit $12,5 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^2_{\text{NGF}}\cdot\text{a})$ als auch *LETI* mit $4,2 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^2_{\text{NGF}}\cdot\text{a})$ weisen bereits Zielwerte für das Jahr 2030 aus.

4.3.2 Schweiz

Vor dem Hintergrund einer „2000-Watt Gesellschaft“ im Jahr 2050 gibt die *SIA 2040* [78] für ein SIA-Effizienzpfad-kompatibles neues Verwaltungsgebäude einen konstruktionsbezogenen¹² Richtwert von $9 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{a}$ je m^2 Energiebezugsfläche A_E an, ein umgebautes Verwaltungsgebäude sollte einen Richtwert von $6 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^2_{A_E}\cdot\text{a})$ nicht überschreiten. Neben den Modulen A1-A5 sind das Modul B4 sowie die Module C1-C4 bei der Ökobilanzierung zu evaluieren.

4.3.3 Frankreich

Im Jahr 2022 wurde u.a. für Bürogebäude das *Décret n°2022-305* [79] erlassen, welches bei einer RSL von 50 Jahren einen Maximalwert des konstruktionsbedingten¹² GWP von $980 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$ bzw. $19,6 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^2_{\text{BGF}}\cdot\text{a})$ für die Module A1-A5, B1-B5 und C1-C4 gesetzlich vorschreibt [80]. Die zulässigen Maximalwerte werden stetig reduziert, sodass ab dem Jahr 2031 ein GWP von $600 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$ bzw. $12 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^2_{\text{BGF}}\cdot\text{a})$ einzuhalten ist.

4.3.4 Dänemark

Im Zuge der nationalen Strategie für nachhaltiges Bauen soll ab dem Jahr 2023 in der *BR23* für Gebäude mit einer Brutto-Grundfläche über 1000 m^2 ein gesetzlicher GWP-Grenzwert von $12 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^2_{\text{BGF}}\cdot\text{a})$ unter Berücksichtigung der konstruktionsbedingten¹³ Emissionen aus den Modulen A1-A5, B4 und C3-C4 gelten. Darüber hinaus ist in diesem Grenzwert Modul D sowie zusätzlich das GWP infolge des betrieblichen Energieeinsatzes über die Nutzungsdauer von 50 Jahren inkludiert. Zudem wird es freigestellt, bereits einen unverbindlichen Richtwert von $8 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^2_{\text{BGF}}\cdot\text{a})$ einzuhalten. Die gesetzlich verankerten Grenzwerte sollen im Zeitraum bis 2029 sukzessive um ca. 40 % auf $7,5 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^2_{\text{BGF}}\cdot\text{a})$ gesenkt werden [81; 82].

¹² Tragkonstruktion zuzüglich Ausbau und TGA

¹³ Voraussichtlich Tragkonstruktion zuzüglich Ausbau und TGA

4.4 Zusammenfassung

In den zusammenfassenden Tabellen wird ersichtlich, dass derzeit weder Deutschland noch die Schweiz zukünftige Richtwerte für das GWP ausweisen, wohingegen in anderen Ländern eine sukzessive Reduktion der Zielwerte bzw. gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte vorgesehen ist.

| Region | Institution / Regelwerk | Referenzjahr | Referenz-Nutzungsdauer | Bezugsfläche* | GWP-Grenzwerte [kgCO ₂ e/(m ² a)] | Herstellungsphase | | | Bauphase | | Nutzungsphase | | | | | | Entsorgungsphase | | | | Ergänzungen außerhalb der Systemgrenze | | |
|----------------|-------------------------|--------------|------------------------|------------------|---|---------------------------|--------------|----------------|--------------|-----------------------|---------------|-------------------|--------------|-----------|---------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------|--------------|---------------------|--|----------------|--|
| | | | | | | A1 Rohstoffbereitstellung | A2 Transport | A3 Herstellung | A4 Transport | A5 Bau-/Einbauprozess | B1 Nutzung | B2 Instandhaltung | B3 Reparatur | B4 Ersatz | B5 Umbau/Erneuerung | B6 betrieblicher Energieeinsatz | B7 betrieblicher Wassereinsatz | C1 Rückbau, Abriss | C2 Transport | C3 Abfallbehandlung | | C4 Deponierung | |
| Deutschland | BNB | 2022 | 50 | NGF _a | 7,9 | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | C1 | C2 | C3 | C4 | D | |
| | DGNB | 2022 | 50 | NRF | 6,6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | QNG-PLUS | 2022 | 50 | NRF | 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | QNG-PREMIUM | 2022 | 50 | NRF | 9,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Großbritannien | RIBA | 2025 | 60 | NGF | 16,2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | LETI | 2022 | 60 | NGF | 8,3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Schweiz | SIA 2040 | 2022 | 50 | A _e | 9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Frankreich | Décret n° 2022-305 | 2022 | 50 | BGF | 19,6** | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Dänemark | BR23*** | 2023 | 50 | BGF | 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

* Bezugsfläche gemäß DIN 277, DIN EN 15221-6 bzw. nationalen Definitionen; A_e: Energiebezugsfläche gemäß SIA 380/1

** für Bürogebäude ab dem 01.07.2022 gesetzlich vorgeschrieben

*** geplantes Gesetz für das Jahr 2023

14

| Region | Institution / Regelwerk | Referenzjahr | Referenz-Nutzungsdauer | Bezugsfläche* | GWP-Grenzwerte [kgCO ₂ e/(m ² a)] | Herstellungsphase | | | Bauphase | | Nutzungsphase | | | | | | Entsorgungsphase | | | | Ergänzungen außerhalb der Systemgrenze | | |
|----------------|-------------------------|--------------|------------------------|---------------|---|---------------------------|--------------|----------------|--------------|-----------------------|---------------|-------------------|--------------|-----------|---------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------|--------------|---------------------|--|----------------|--|
| | | | | | | A1 Rohstoffbereitstellung | A2 Transport | A3 Herstellung | A4 Transport | A5 Bau-/Einbauprozess | B1 Nutzung | B2 Instandhaltung | B3 Reparatur | B4 Ersatz | B5 Umbau/Erneuerung | B6 betrieblicher Energieeinsatz | B7 betrieblicher Wassereinsatz | C1 Rückbau, Abriss | C2 Transport | C3 Abfallbehandlung | | C4 Deponierung | |
| Deutschland | BNB | 2030 | 50 | NGFa | 7,9 | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | C1 | C2 | C3 | C4 | D | |
| | DGNB | 2030 | 50 | NRF | 6,6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | QNG-PLUS | 2030 | 50 | NRF | 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | QNG-PREMIUM | 2030 | 50 | NRF | 9,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Großbritannien | RIBA | 2030 | 60 | NGF | 12,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | LETI | 2030 | 60 | NGF | 4,2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Schweiz | SIA 2040 | 2030 | 50 | AE | 9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Frankreich | Décret n° 2022-305 | 2030 | 50 | BGF | 12** | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Dänemark | BR23*** | 2029 | 50 | BGF | 7,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

* Bezugsfläche gemäß DIN 277, DIN EN 15221-6 bzw. nationalen Definitionen; A_e: Energiebezugsfläche gemäß SIA 380/1

** für Bürogebäude ab dem 01.07.2022 gesetzlich vorgeschrieben

*** geplantes Gesetz für das Jahr 2023

14 Z.B. ergibt sich der BNB-Richtwert für die zugrunde liegende RSL von 50 Jahren zu $\text{Lim}_{\text{GWP,BNB}} = 50 \cdot 7,9 = 395 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$.

5 GWP-Vergleich ausgewählter Deckensysteme

5.1 Allgemeines

Deckenkonstruktionen bei Geschossbauten kann i.d.R. ein wesentlicher Anteil an der Gesamtgebüdemasse zugeschrieben werden, wodurch statisch sowohl vertikale Tragelemente wie Stützen, Wände und Kerne als auch die Gründung beeinflusst werden. Darüber hinaus sind Deckenkonstruktionen für einen Großteil der konstruktionsbedingten Treibhausgasemissionen von Bürogebäuden verantwortlich (vgl. Abb. 2). Zur Erreichung der in [5] vorgeschriebenen Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 ist es daher unerlässlich, Potenziale zur Reduktion des GWP – sowohl auf Bauteilebene als auch auf Bauwerksebene – frühzeitig in der Planungsphase zu erkennen und umzusetzen. Diesbezüglich wurden in der vorliegenden Studie verschiedene Deckensysteme für einen typischen Gebäudegrundriss (s. Abb. 7) geplant und deren GWP evaluiert.

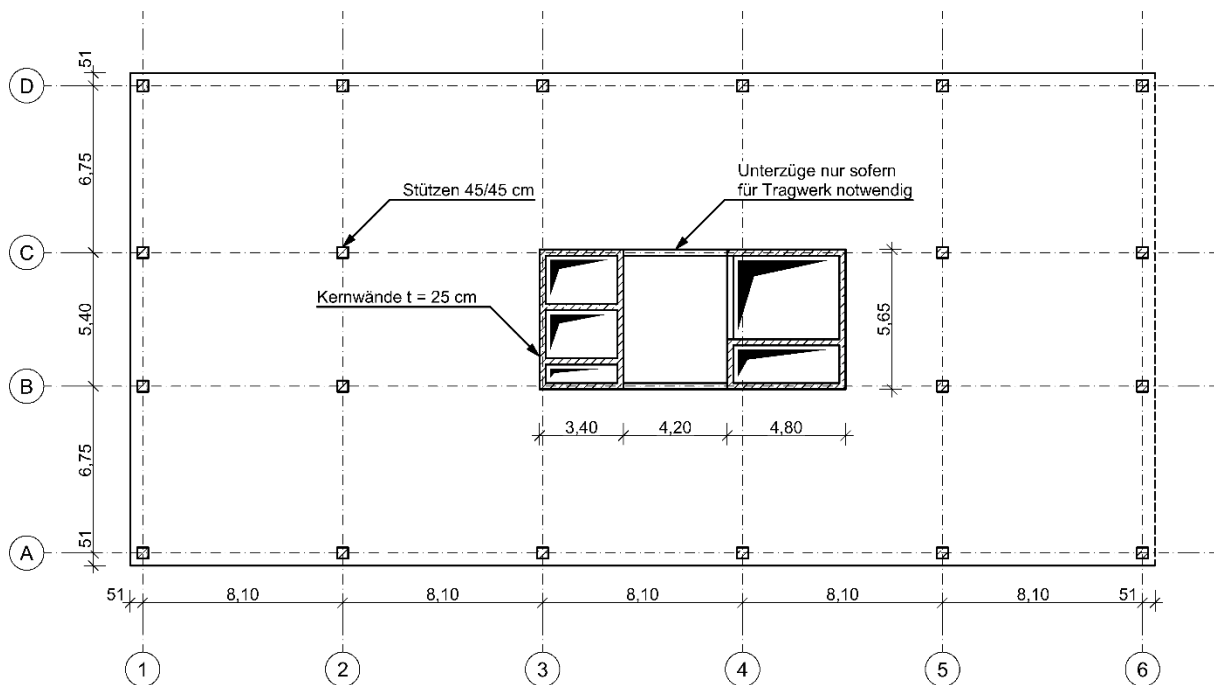


Abb. 7: Zugrunde gelegter Grundriss Bürogebäude

Der dargestellte Grundriss ist so gewählt, dass an Achse 6 eine Fortsetzung vorstellbar ist, z.B. in Form eines weiteren Schenkels für einen L-förmigen Grundriss. Der für alle Deckensysteme vorgesehene Randbalken ist bei Erweiterung des Grundrisses in dieser Achse nicht mehr erforderlich.

5.1.1 Randbedingungen

Die Entwurfsplanung sowie die Bemessung der Deckensysteme basieren auf den folgenden Randbedingungen:

- Abmessungen: gemäß Grundriss, Höhe OK der obersten Geschossdecke ≤ 22 m ¹⁵
- Belastung:
 - Deckeneigengewicht $g_{k,1} = \text{var.}$
 - Ausbaulast $g_{k,2} = 2 \text{ kN/m}^2$
 - Nutzlast $q_k = 5 \text{ kN/m}^2$
 - Fassadenlast $p_k = 3,5 \text{ kN/m}$
- Bemessung im GZT und im GZG (Verformung und Schwingung) mit einer Ausnutzung von ca. 100 % mit den jeweils normativen Vorgaben nach deutscher Norm
 - Wesentliche Nachweise im Rahmen einer Genehmigungsstatik
 - Verformungsbegrenzung $L/250$ (bzw. $L/500$ nach Ausbau)
 - Deckenrandverformungen $\leq L/500$ (nach Ausbau)
 - Schwingungsnachweise der HBV-Decken und BSP-Decken nach [83] mit Zielbewertung 1,0 bis 1,5
- Schallschutzanforderungen¹⁶
 - Luftschalldämmung erf. $R'_w \geq 55 \text{ dB}$
 - Trittschalldämmung zul. $L'_{n,w} \leq 46 \text{ dB}$
- Brandschutzanforderungen¹⁶ F 90
 - für Betonbauteile wird F 90 aufgrund ausreichender Bauteildicke und Betondeckung ohne expliziten Nachweis als gegeben angenommen (DIN EN 1992-1-2)
 - für Holzbauteile erfolgt der Nachweis nach DIN EN 1995-1-2 unter Ansatz einer direkten Beflammung nach der Methode mit reduziertem Querschnitt
 - Beplankung bei der HBV-Rippendecke in schlanker Ausführung 15 mm
 - Stahlbauteile wurden im Rahmen dieser Studie nicht für den Brandfall nachgewiesen
 - Für die GWP-Bewertung der Stahlbetonverbunddecke wird eine Brandschutzbeschichtung berücksichtigt
 - Bei den Deckensystemen mit Rand- bzw. Innenträgern aus Stahl sind die Stahlträger im Brandfall durch Kammerbeton und Bewehrungszulage nachgewiesen und in der GWP-Ermittlung berücksichtigt

Der Entwurf der jeweiligen Deckensysteme fußt auf typischen und praxisüblichen Systemen mit sinnvoller Wahl der Deckenspannrichtung für den vorliegenden Grundriss unter der Einschränkung einer fehlenden TGA-Planung. Die ganzseitigen Deckenuntersichten aller Systeme sowie deren Bemessung sind den zugehörigen Anhängen zu entnehmen.

¹⁵ Feuerwiderstandsdauer F 90

¹⁶ Nachweisführung durch Pirlet & Partner Ingenieurgesellschaft mbH

Die GWP-Berechnung für das funktionale Äquivalent einer Geschossdecke unter Einhaltung der zuvor genannten Randbedingungen erfolgt auf Bauteilebene. Dabei werden lediglich alle Komponenten der Deckenkonstruktion ohne etwaige Anschlussdetails oder benachbarte Bauteile berücksichtigt. Zudem enthalten die ausgewiesenen GWP-Werte nicht den Einfluss des Bodenbelags, welcher in einer Vergleichsstudie für alle Systeme gleich anzunehmen ist und demnach nicht zum Ausweisen etwaiger Unterschiede der betrachteten Deckenkonstruktionen bzgl. ihrer THG-Emissionen beiträgt. Das GWP etwaiger notwendiger Ausbauschichten wird zusammengefasst und als eine gemeinsame Position dargestellt.

Für den Vergleich auf Bauteilebene/Deckenebene fließen die im Grundriss abgebildeten Tragelemente, wie die Stützen/Kernwände und die Unterzüge direkt an den Öffnungen, nicht mit in die GWP-Betrachtung ein.

Es wird eine Referenz-Nutzungsdauer von 50 Jahren angesetzt. Für diese Nutzungsdauer wird davon ausgegangen, dass keine Instandhaltungsmaßnahmen anfallen und demnach die GWP-Ergebnisse nicht durch eine etwaige Berücksichtigung der Module B2 – B4 beeinflusst werden.

Die Auswertung des globalen Erwärmungspotenzials aller Deckensysteme wird auf einen Quadratmeter der Nettogeschossfläche bezogen, wobei zusätzliche Deckendurchbrüche (zu den dargestellten) übermessen werden. Die Nettogeschossfläche des zugrunde liegenden Grundrisses ergibt sich zu:

$$A_{NGF} = (2 \cdot 0,51 + 5 \cdot 8,1) \cdot (2 \cdot 0,51 + 2 \cdot 6,75 + 5,4) - [(3,4 - 0,25 + 4,8 - 0,25) \cdot 5,4]$$

$$A_{NGF} = 785,5 \text{ m}^2$$

Die GWP-Berechnung der Stahlbetonbauteile basiert auf dem Netto-Betonvolumen. Das Brutto-Betonvolumen wird um den Bewehrungsanteil reduziert. Je nach Bewehrungsgrad ergibt sich dadurch ein um ca. 1-2 % geringeres Erwärmungspotenzial.

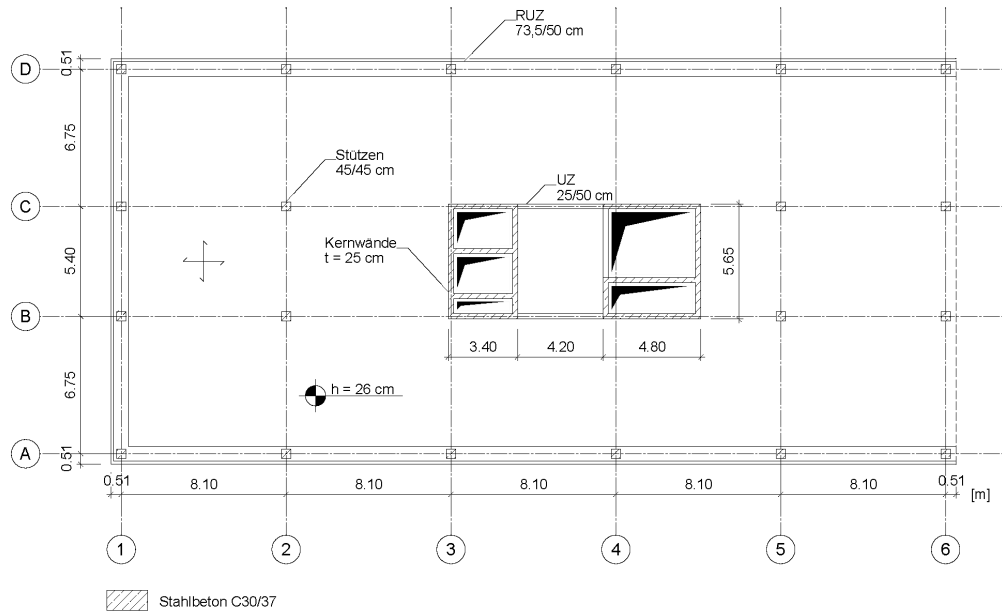
5.2 Deckensysteme

In diesem Kapitel sind für die untersuchten Deckensysteme die jeweiligen Deckenuntersichten und Deckenaufbauten dargestellt, deren einzelne Trag- und Ausbauschichten charakterisiert sowie die GWP-Ergebnisse bezogen auf einen Quadratmeter der Nettogeschossfläche grafisch aufbereitet. Die jeweiligen Spannrichtungen und abweichende konstruktive Elemente sind ebenfalls in den Deckenuntersichten explizit ausgewiesen.

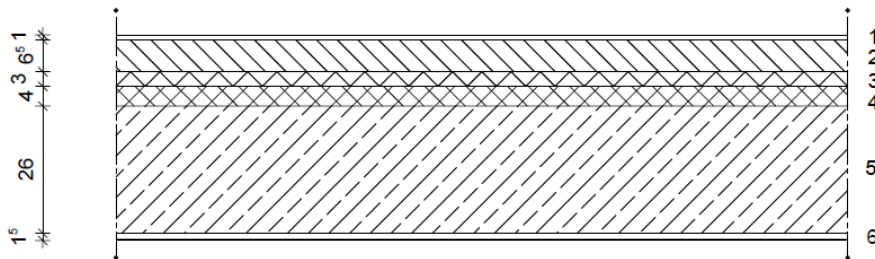
5.2.1 Stahlbetonflachdecke

Für die betrachtete Stahlbetonflachdecke können die Randbedingungen sowohl der folgenden Deckenuntersicht als auch Kap. 8.1.1 entnommen werden. Die zugrunde gelegte Bemessung ist ebenfalls in Kap. 8.1.1 ersichtlich.

Deckenuntersicht



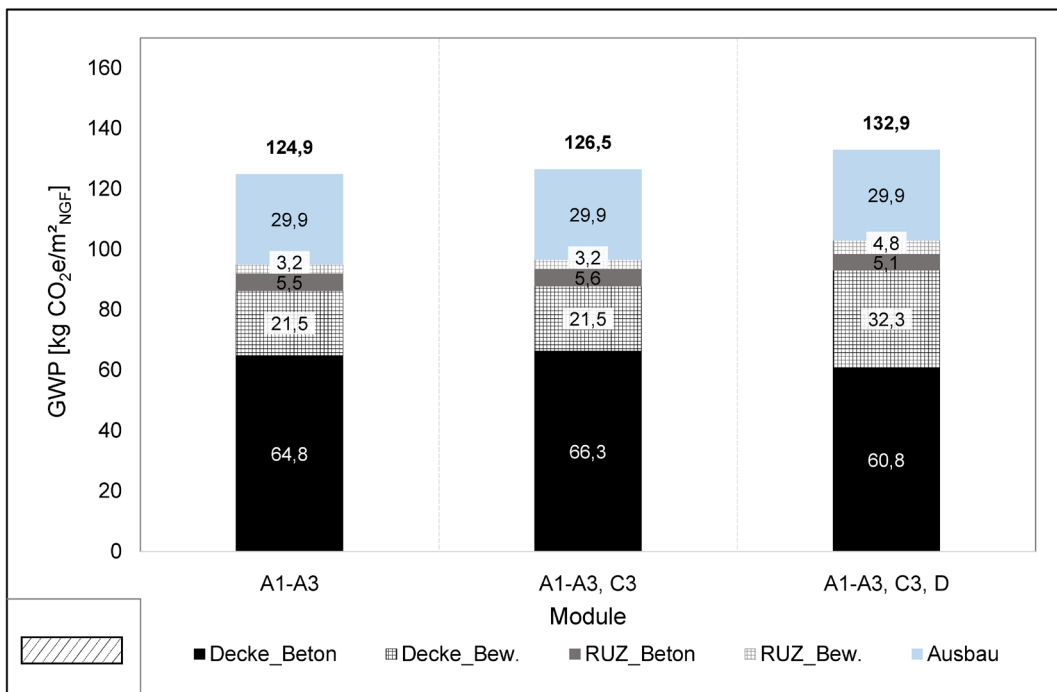
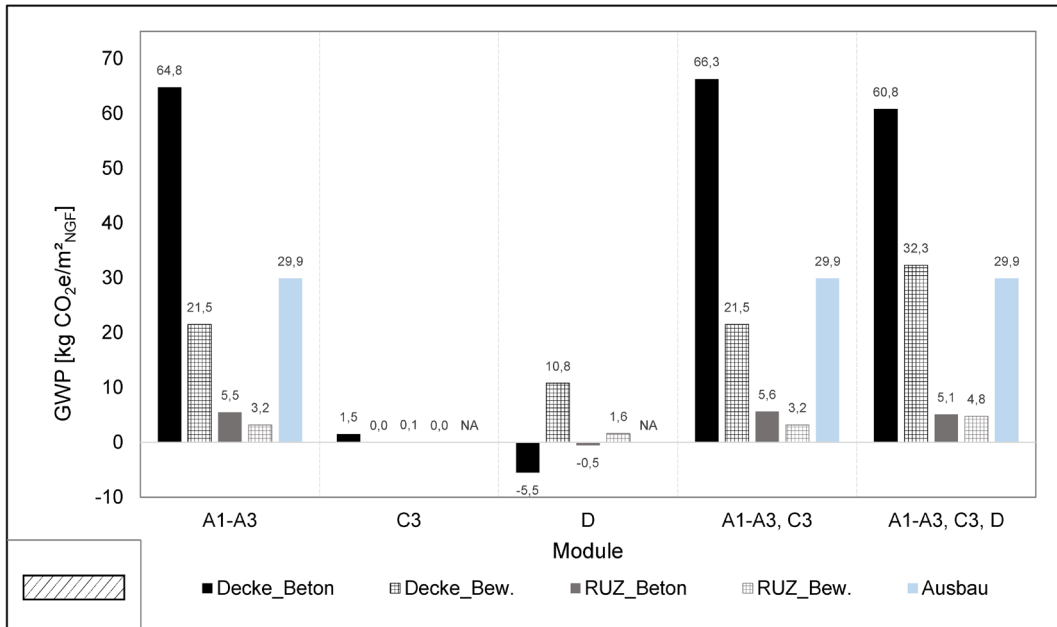
Deckenaufbau



| Schicht | | EPD | t [cm] | ρ [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$] | ME [je m ²] |
|---------|--------------------|------|-----------|--|--|
| 1 | Bodenbelag | - | 1,00 | - | - |
| 2 | Zementestrich | [63] | 6,50 | 2000 | $0,065 \cdot \frac{2}{2,4} \cdot 2 = 0,11 \text{ t}$ |
| 3 | Trittschalldämmung | [56] | 3,00 | 100 | 0,03 m ³ |
| 4 | Ausgleichsdämmung | [56] | 4,00 | 100 | 0,04 m ³ |
| 5 | Beton C30/37 | [28] | 26,00 | 2400 | 0,26 m ³ |
| | Bewehrung | [29] | var. | 7850 | (s. 8.1.1) |
| 6 | Gipsputz | [58] | 1,50 | 1200 | 0,015 m ³ |

GWP

Für die Auswertung des GWP wird die Beton- und Bewehrungsmenge des Unterzugs am Kern in den Achsen B und C der Decke zugewiesen. Der Randunterzug (Ruz) wird gesondert ausgewiesen, wobei diesem das Betonvolumen abzüglich der Höhe der Deckenplatte angerechnet wird (s. Kap. 8.1.1).

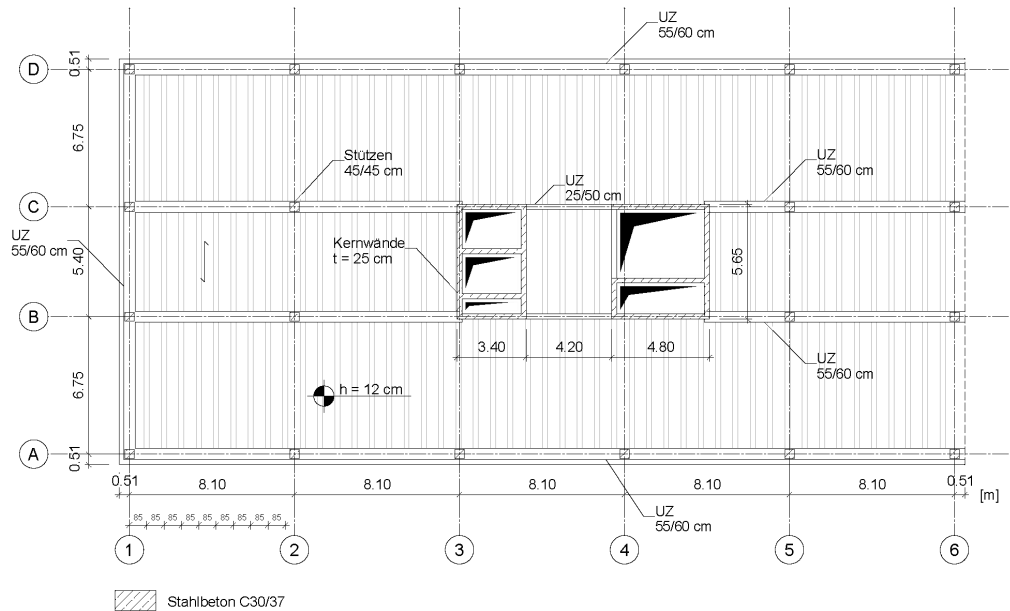


Das Modul C3 beeinflusst das GWP nur geringfügig. Für Modul D ergeben sich sowohl negative, als Gutschrift für die Verwendung von Betonabbruch, als auch positive Korrekturen. Ca. 45 % des GWP bei Betrachtung der Module A1-A3, C3, D ergibt sich aus dem Anteil des Betons (hier C30/37). Die anteilig notwendige Bewehrung ist seitens des GWP als getrennte Position ausgewiesen, muss aber natürlich für den Konstruktionswerkstoff Stahlbeton zusammen betrachtet werden. Zieht man beide Positionen zusammen, ergibt sich ein Anteil am gesamten GWP von ca. 70 % aus Stahlbeton, berücksichtigt man überdies die Stahlbeton-Randunterzüge sind es ca. 80 %. Das GWP der Ausbauschichten wird zu ca. zwei Drittel durch den Zementestrich verursacht. In den Modulen C3 und D ergeben sich hierfür keine Änderungen, da diese nicht in den verwendeten EPDs der Ausbauschichten ausgewiesen sind.

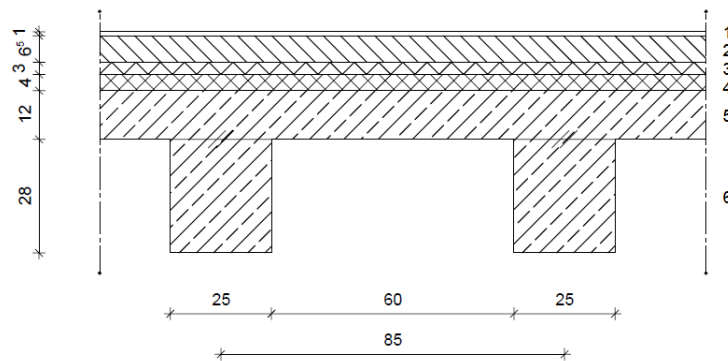
5.2.2 Stahlbetonrippendecke

Für die betrachtete Stahlbetonrippendecke können die Randbedingungen sowohl der folgenden Deckenuntersicht als auch Kap. 8.1.2 entnommen werden. Die zugrunde gelegte Bemessung ist ebenfalls in Kap. 8.1.2 ersichtlich.

Deckenuntersicht



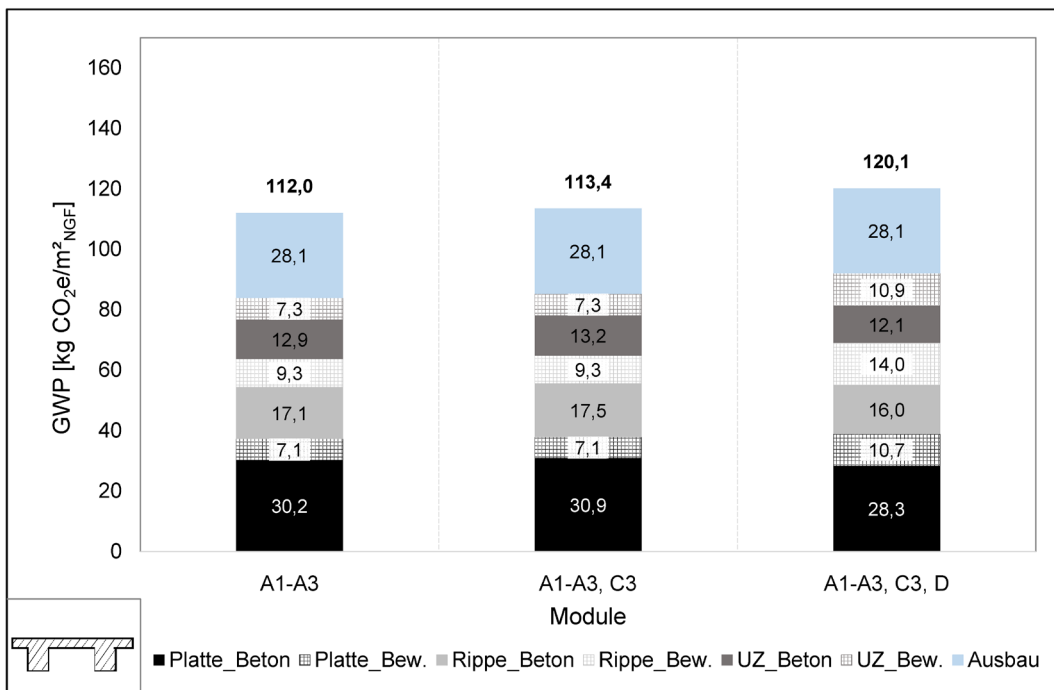
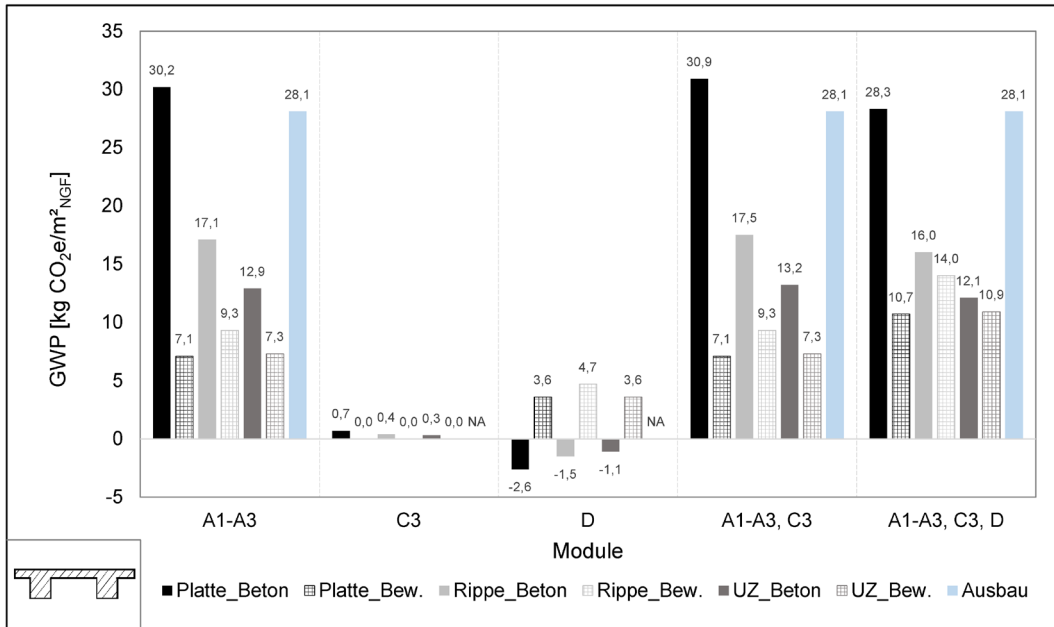
Deckenaufbau



| Schicht | | EPD | t [cm] | ρ [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$] | ME [je m ²] |
|---------|--------------------|------|-----------|--|--|
| 1 | Bodenbelag | - | 1,00 | - | - |
| 2 | Zementestrich | [63] | 6,50 | 2000 | $0,065 \cdot \frac{2}{2,4} \cdot 2 = 0,11 \text{ t}$ |
| 3 | Trittschalldämmung | [56] | 3,00 | 100 | 0,03 m ³ |
| 4 | Ausgleichsdämmung | [56] | 4,00 | 100 | 0,04 m ³ |
| 5 | Betonplatte C30/37 | [28] | 12,00 | 2400 | 0,12 m ³ |
| | Bewehrung | [29] | var. | 7850 | (s. 8.1.2) |
| 6 | Betonrippe C30/37 | [28] | 28,00 | 2400 | (s. 8.1.2) |
| | Bewehrung | [29] | var. | 7850 | (s. 8.1.2) |

GWP

Für die Auswertung des GWP wird die Beton- und Bewehrungsmenge des Unterzugs am Kern in den Achsen B und C der Decke zugewiesen. Die Rippen werden ebenso wie die Unterzüge (55/60 cm) innen und am Rand gesondert ausgewiesen, wobei diesen jeweils das Betonvolumen abzüglich der Höhe der Deckenplatte angerechnet wird.

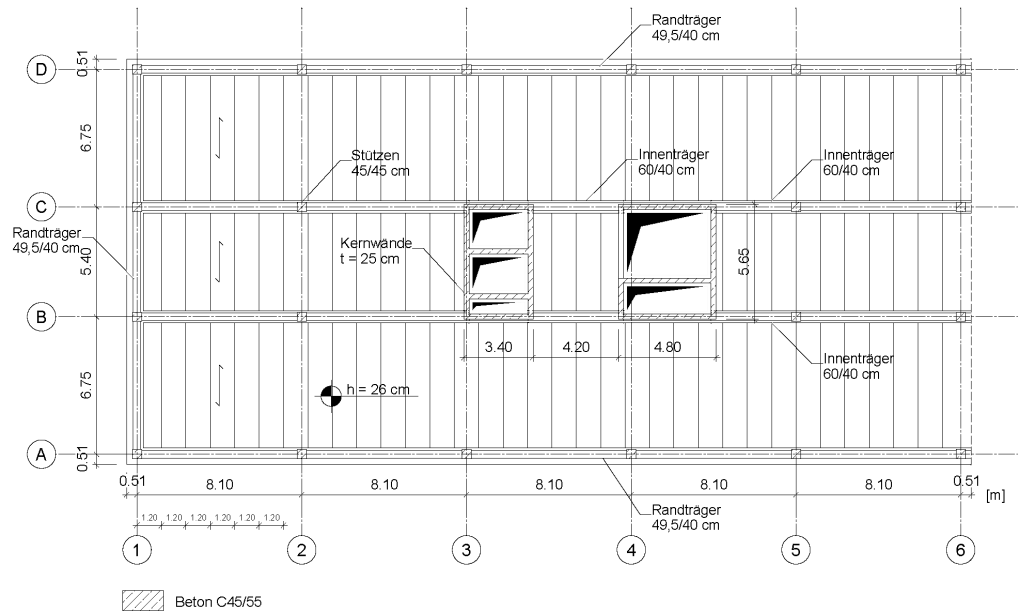


Das GWP der Ausbauschichten wird zu ca. zwei Drittel durch den Zementestrich verursacht. In den Modulen C3 und D ergibt sich keine Änderung, da diese nicht in den verwendeten EPDs der Ausbauschichten ausgewiesen sind.

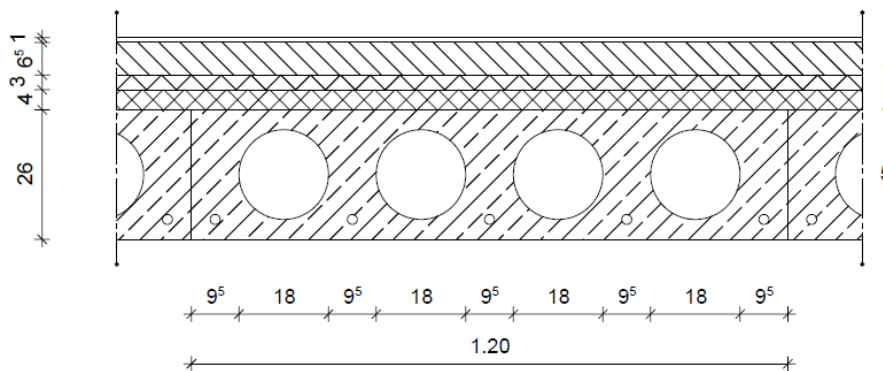
5.2.3 Spannbetonhohlplatten mit Stahlträgern

Für das betrachtete Deckensystem aus Spannbetonhohlplatten mit Stahlträgern können die Randbedingungen sowohl der folgenden Deckenuntersicht als auch Kap. 8.1.3 entnommen werden. Die zugrunde gelegte Bemessung ist ebenfalls in Kap. 8.1.3 ersichtlich.

Deckenuntersicht



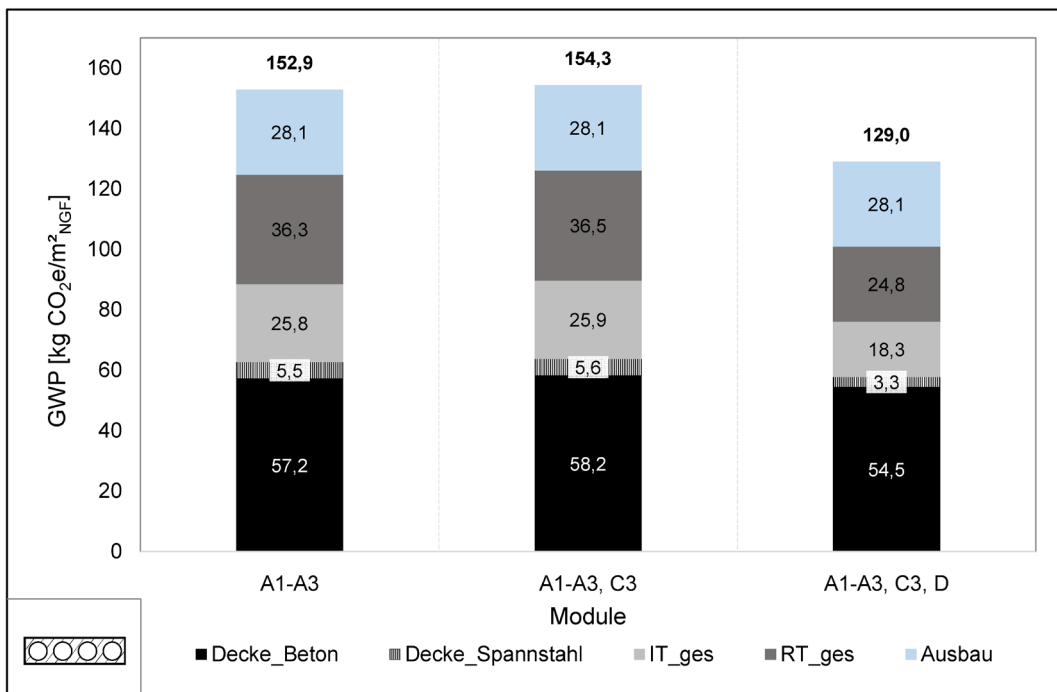
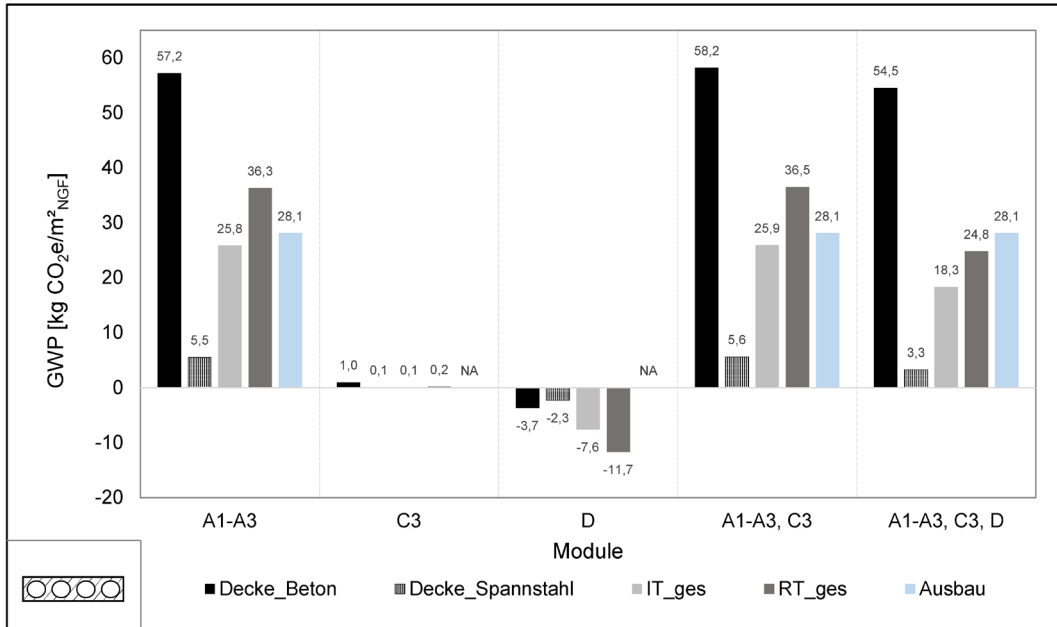
Deckenaufbau



| Schicht | | EPD | t [cm] | ρ [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$] | ME [je m ²] |
|---------|----------------------|------|-----------|--|--|
| 1 | Bodenbelag | - | 1,00 | - | - |
| 2 | Zementestrich | [63] | 6,50 | 2000 | $0,065 \cdot \frac{2}{2,4} \cdot 2 = 0,11 \text{ t}$ |
| 3 | Trittschalldämmung | [56] | 3,00 | 100 | 0,03 m ³ |
| 4 | Ausgleichsdämmung | [56] | 4,00 | 100 | 0,04 m ³ |
| 5 | Beton C45/55 | [48] | 26,00 | 2400 | (s. 8.1.3) |
| | Spannstahl 1570/1770 | [49] | Ø12,7 mm | 7850 | (s. 8.1.3) |

GWP

Für die Auswertung des GWP wird den Rand- und Innenträgern (s. Kap. 8.1.3) neben der Stahlmenge auch der Anteil des Kammerbetons zzgl. Bewehrung aus der Bemessung im Brandfall zugeordnet.

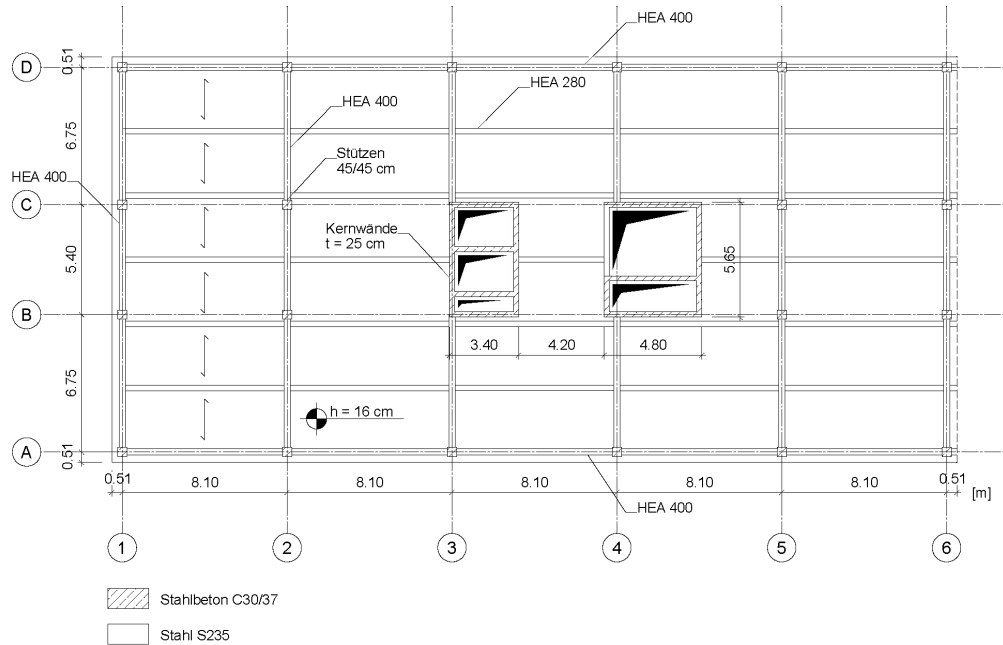


Das GWP der Ausbauschichten wird zu ca. zwei Drittel durch den Zementestrich verursacht. In den Modulen C3 und D ergibt sich keine Änderung, da diese nicht in den verwendeten EPDs der Ausbauschichten ausgewiesen sind.

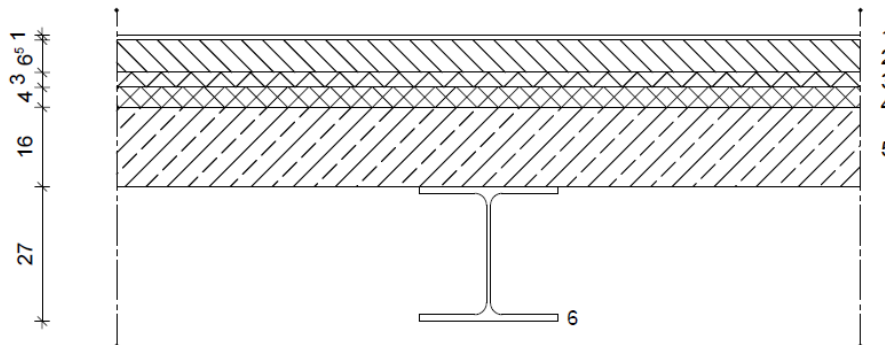
5.2.4 Stahlbetonverbunddecke

Für die betrachtete Stahlbetonverbunddecke können die Randbedingungen sowohl der folgenden Deckenuntersicht als auch Kap. 8.1.4 entnommen werden. Die zugrunde gelegte Bemessung ist ebenfalls in Kap. 8.1.4 ersichtlich.

Deckenuntersicht



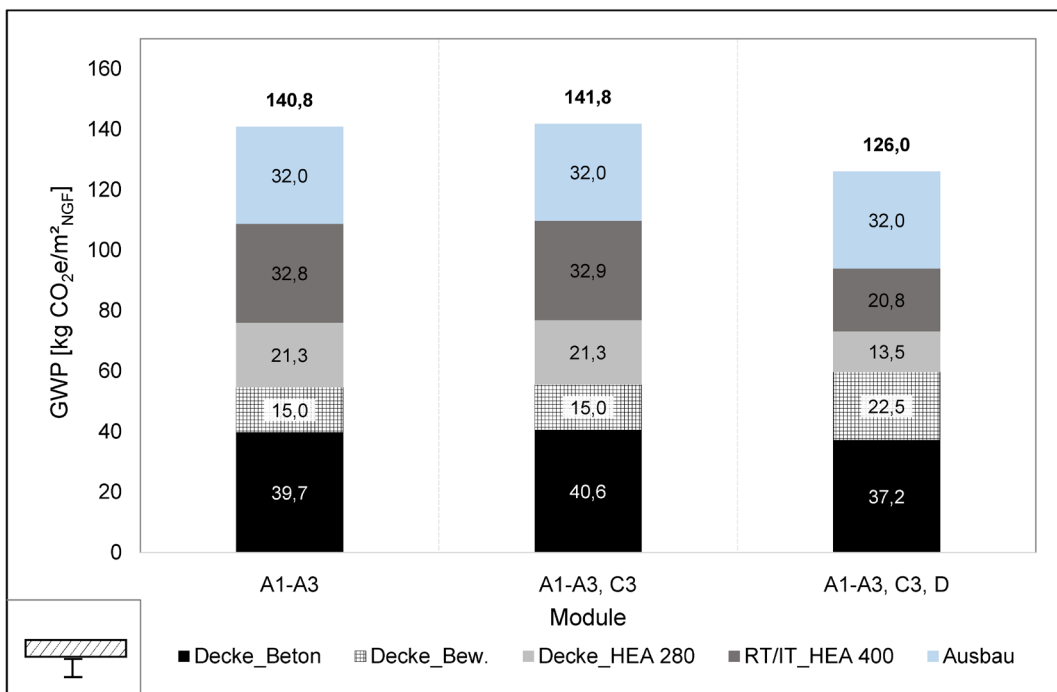
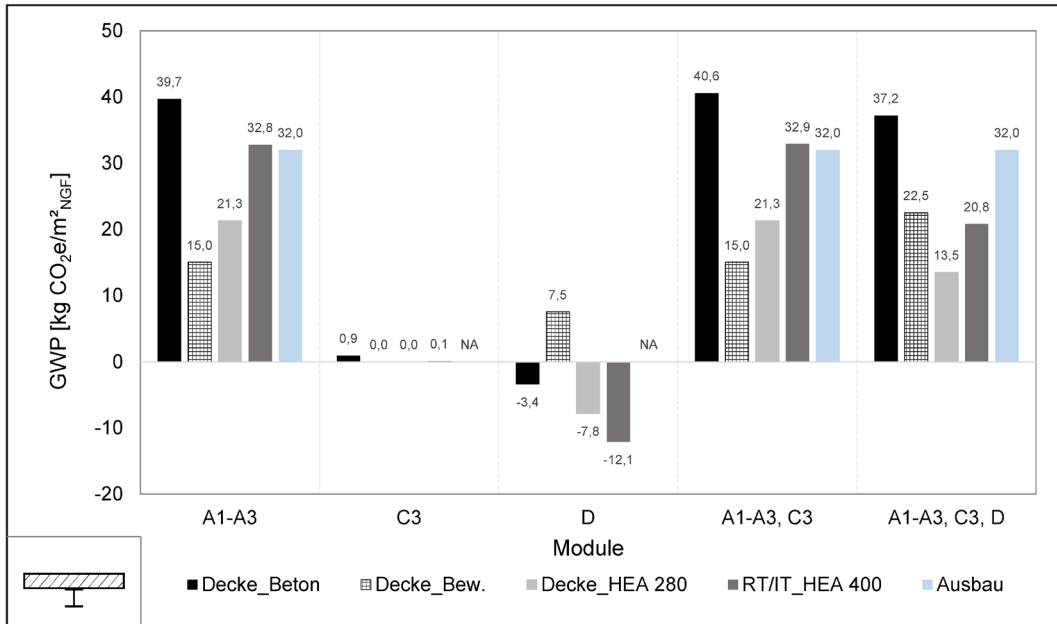
Deckenaufbau



| Schicht | EPD | t [cm] | ρ [kg/m ³] | ME [je m ²] |
|----------------------|------|------------|-----------------------------|--|
| 1 Bodenbelag | - | 1,00 | - | - |
| 2 Zementestrich | [63] | 6,50 | 2000 | $0,065 \cdot \frac{2}{2,4} \cdot 2 = 0,11 \text{ t}$ |
| 3 Trittschalldämmung | [56] | 3,00 | 100 | 0,03 m ³ |
| 4 Ausgleichsdämmung | [56] | 4,00 | 100 | 0,04 m ³ |
| 5 Betonplatte C30/37 | [28] | 16,00 | 2400 | 0,16 m ³ |
| Bewehrung | [29] | var. | 7850 | (s. 8.1.4) |
| 6 Stahlträger | [27] | HEA280 | 7850 | (s. 8.1.4) |
| Brandschutzanstrich | [65] | (s. 8.1.4) | 1300 | (s. 8.1.4) |

GWP

Für die Auswertung des GWP werden die Stahlbetonplatte, die Verbundträger (HEA 280) sowie die Rand-/Innenträger (HEA 400) gesondert ausgewiesen. Darüber hinaus wird das GWP des Ausbaus quantifiziert.

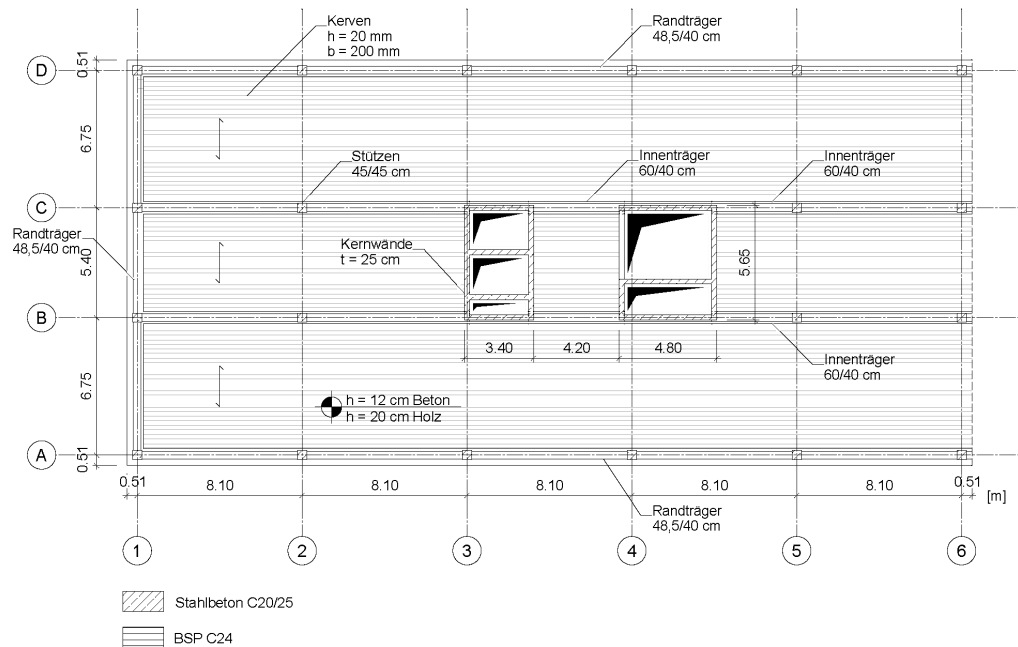


Das GWP der Ausbauschichten wird zu ca. 60 % durch den Zementestrich verursacht, wobei der Brandschutzanstrich aller Stahlträger (exklusive Grundierung, welche aufgrund fehlender EPDs nicht beurteilt werden konnte) diesbezüglich für rund 12 % verantwortlich ist. In den Modulen C3 und D ergibt sich keine Änderung, da diese nicht in den verwendeten EPDs der Ausbauschichten ausgewiesen sind. Der Hersteller des Brandschutzanstriches gibt auf seiner Website den Verbrauch je m² in Abhängigkeit der Profilmassnahmen an (Berechnung s. 8.1.4) und verweist auf die allgemeine Bauartgenehmigung, in der eine Nutzungsdauer von mehr als 25 Jahren angegeben ist [84]. Die Umweltwirkungen der Erneuerung des Brandschutzanstriches ist nicht in den ausgewiesenen Daten inkludiert (fehlende Angabe in der EPD und Module B2-B4 für die Vergleichsstudie nicht berücksichtigt).

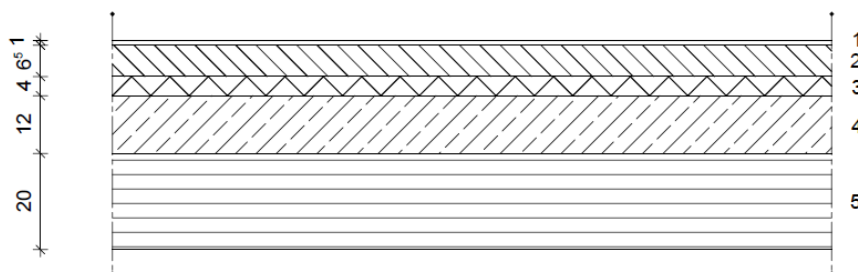
5.2.5 Holzbetonverbundflachdecke mit Stahlträgern

Für die betrachtete Holzbetonverbundflachdecke mit Stahlträgern können die Randbedingungen sowohl der folgenden Deckenuntersicht als auch Kap. 8.1.5 entnommen werden. Die zugrunde gelegte Bemessung ist ebenfalls in Kap. 8.1.5 ersichtlich.

Deckenuntersicht



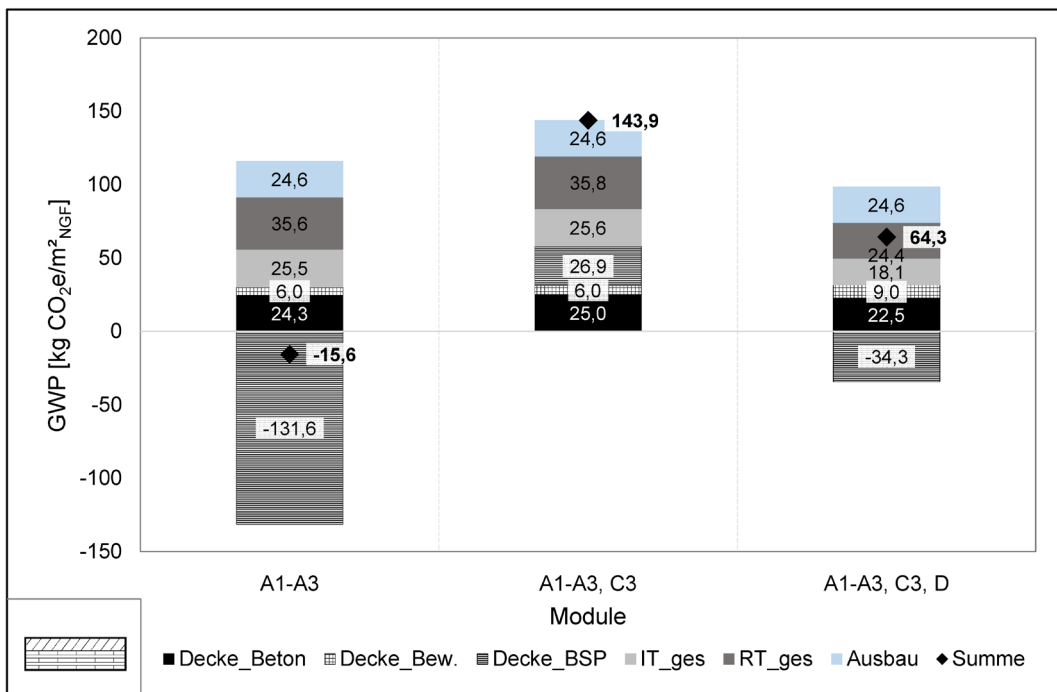
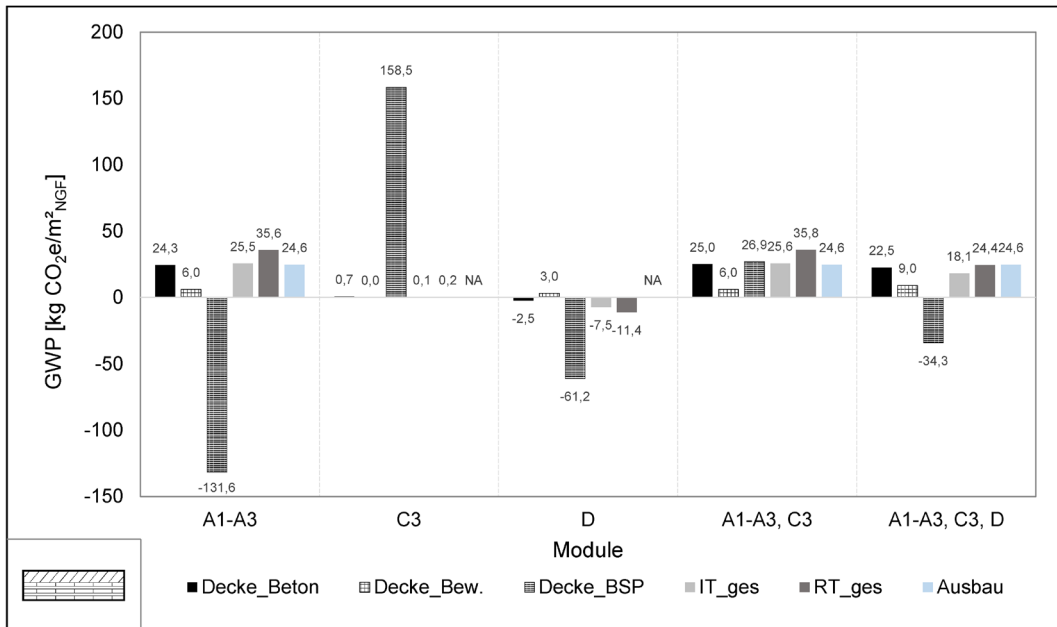
Deckenaufbau



| Schicht | EPD | t [cm] | ρ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ | ME [je m ²] |
|------------------------|------|--------|--|--|
| 1 Bodenbelag | - | 1,00 | - | - |
| 2 Zementestrich | [63] | 6,50 | 2000 | $0,065 \cdot \frac{2}{2,4} \cdot 2 = 0,11 \text{ t}$ |
| 3 Trittschalldämmung | [56] | 4,00 | 100 | 0,04 m ³ |
| 4 Beton C20/25 | [47] | 12,00 | 2400 | 0,12 m ³ |
| Bewehrung | [29] | var. | 7850 | (s. 8.1.5) |
| 5 Brettsperrholz (BSP) | [53] | 20,00 | 500 | 0,20 m ³ |

GWP

Für die Auswertung des GWP wird den Randträgern (RT) und Innenträgern (IT) (s. 8.1.5) neben der Stahlmenge auch der Anteil des Kammerbetons zzgl. Bewehrung aus der Bemessung im Brandfall zugeordnet. Der Einfluss der Kerven auf das Volumen der Beton- bzw. BSP-Schicht wird vereinfacht vernachlässigt.



Für die Module A1-A3 wirkt sich das Brettsperrholz positiv auf die GWP-Bewertung aus (negativer Wert), die restlichen Konstruktionselemente gehen negativ in die GWP-Betrachtungen ein. In Summe ergibt sich für die Module A1-A3 ein leicht negativer GWP-Wert, der sich allein durch den im Holz der BSP-Decke eingelagerten Kohlenstoff ergibt. Für biogene Werkstoffe ist jedoch stets Modul C3 (Freisetzen des gebundenen Kohlenstoffs) zu berücksichtigen, wodurch eine deutliche Korrektur in den positiven Bereich stattfindet. Modul D wiederum erfasst die potenzielle Gutschrift einer energetischen Verwertung der Holzwerkstoffe. Das GWP der Ausbauschichten wird zu ca. drei Viertel durch den Zementestrich verursacht. In den Modulen C3 und D ergibt sich keine Änderung, da diese nicht in den verwendeten EPDs der Ausbauschichten ausgewiesen sind. Betrachtet man die Module A1-A3, C3, D zusammen, ergibt sich insgesamt ein positiver GWP-Wert.

5.2.6 Holzbetonverbundrippendecke mit Stahlträgern

Für die Holzbetonverbundrippendecke wurden 2 Varianten untersucht, welche sich hauptsächlich in den statischen Höhen der Betonplatte bzw. den Holzrippen unterscheiden. Bei der ersten Variante handelt es sich um eine schlanke Deckenkonstruktion mit einer statischen Höhe von 34 cm, welche alle erforderlichen Nachweise erfüllt (s. 8.1.6), jedoch den Schwingungsnachweis nicht einhält. Der Brandschutznachweis gelingt nicht bei Ansatz einer direkten Beflammung der Holzrippen, kann jedoch unter Zuhilfenahme einer entsprechenden Beplankung erfüllt werden.

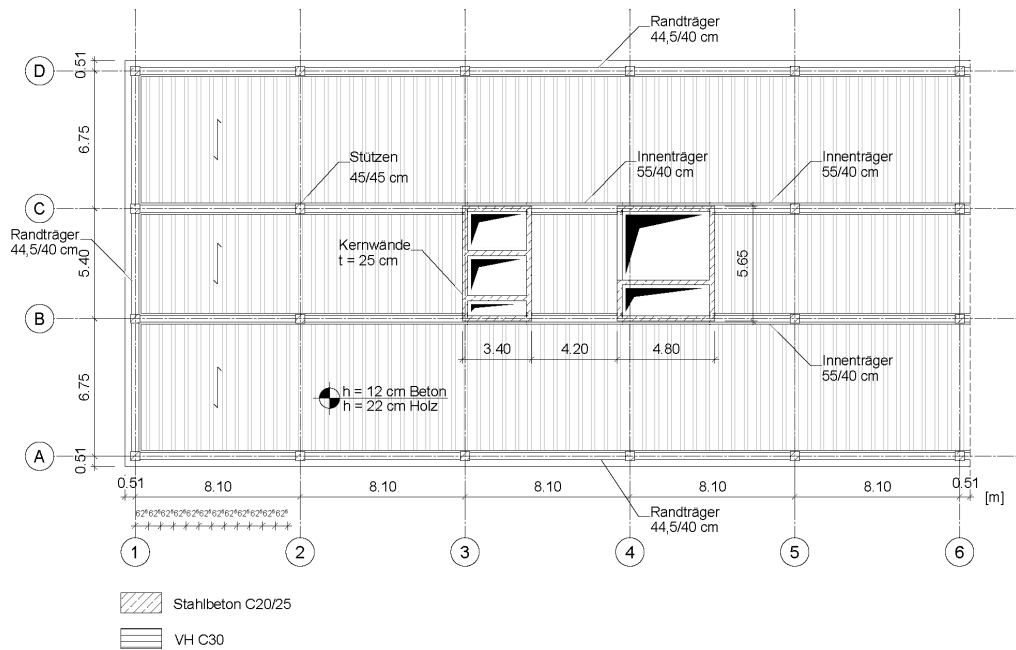
Die zweite Variante ist mit 46 cm deutlich steifer ausgebildet, erfüllt den Brandschutznachweis mit direkter Beflammung sowie die Anforderungen an das Schwingungsverhalten.

Der Vergleich beider Varianten soll aufzeigen, welche Maßnahmen notwendig sind und damit einhergehend welches zusätzliche GWP entsteht, um das nach Norm geforderte Schwingungsverhalten (Behaglichkeit) zu erzielen.

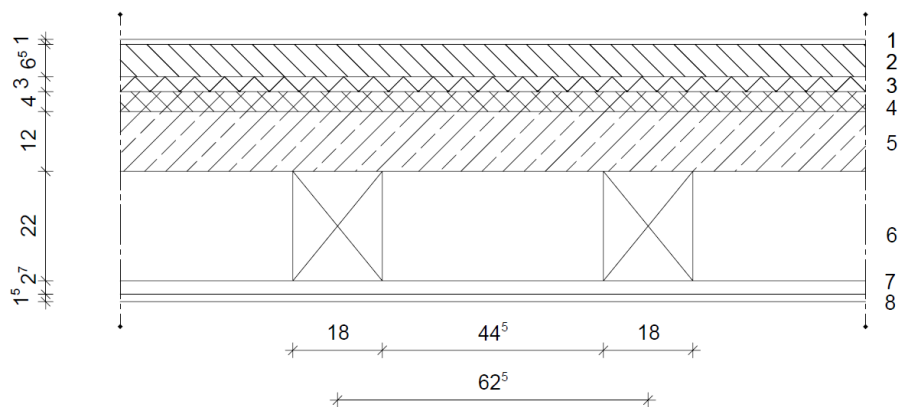
Die Randbedingungen können sowohl den folgenden Deckenuntersichten als auch Kap. 8.1.6 entnommen werden. Die zugrunde gelegte Bemessung beider Varianten ist ebenfalls in Kap. 8.1.6 ersichtlich.

Variante 1 – schlanke Deckenkonstruktion

Deckenuntersicht



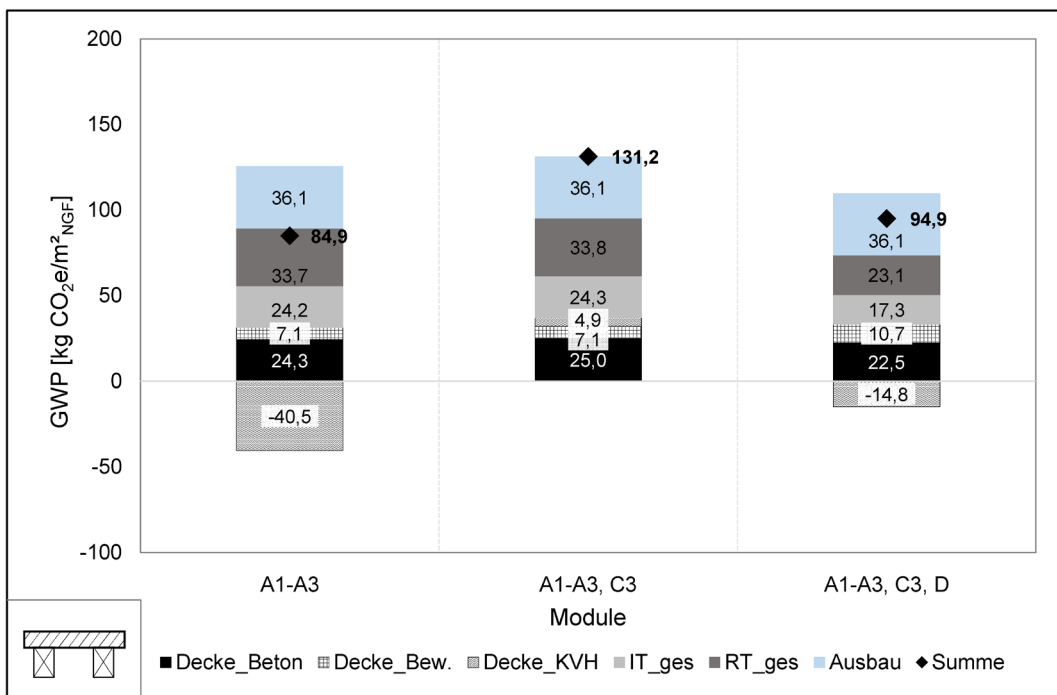
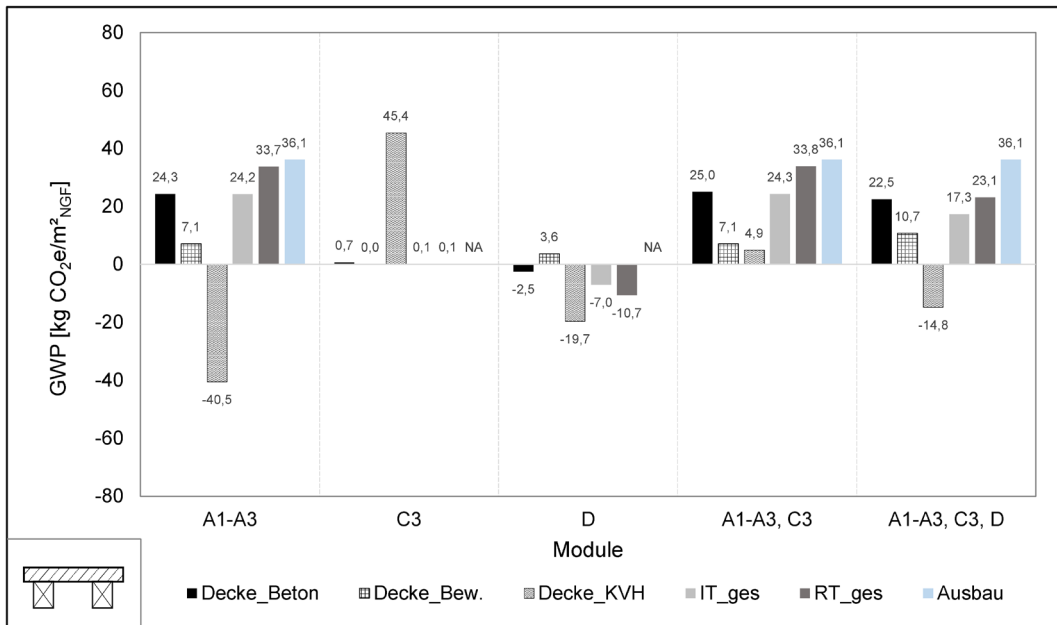
Deckenaufbau



| | Schicht | EPD | t [cm] | ρ [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$] | ME [je m ²] |
|---|---------------------------------|--------------|---------------|--|--|
| 1 | Bodenbelag | - | 1,00 | - | - |
| 2 | Zementestrich | [63] | 6,50 | 2000 | $0,065 \cdot \frac{2}{2,4} \cdot 2 = 0,11 \text{ t}$ |
| 3 | Trittschalldämmung | [56] | 3,00 | 100 | 0,03 m ³ |
| 4 | Ausgleichsdämmung | [56] | 4,00 | 100 | 0,04 m ³ |
| 5 | Betonplatte C20/25 Bewehrung | [47] [29] | 12,00 var. | 2400 7850 | 0,12 m ³ (s. 8.1.6) |
| 6 | KVH | [26] | 22,00 | 500 | (s. 8.1.6) |
| 7 | Federschiene | - | 2,70 | - | - |
| 8 | Brandschutzplatte | [60] | 1,50 | 900 | $\frac{1,5}{0,5} \cdot 1 = 3 \text{ m}^2$ |

GWP

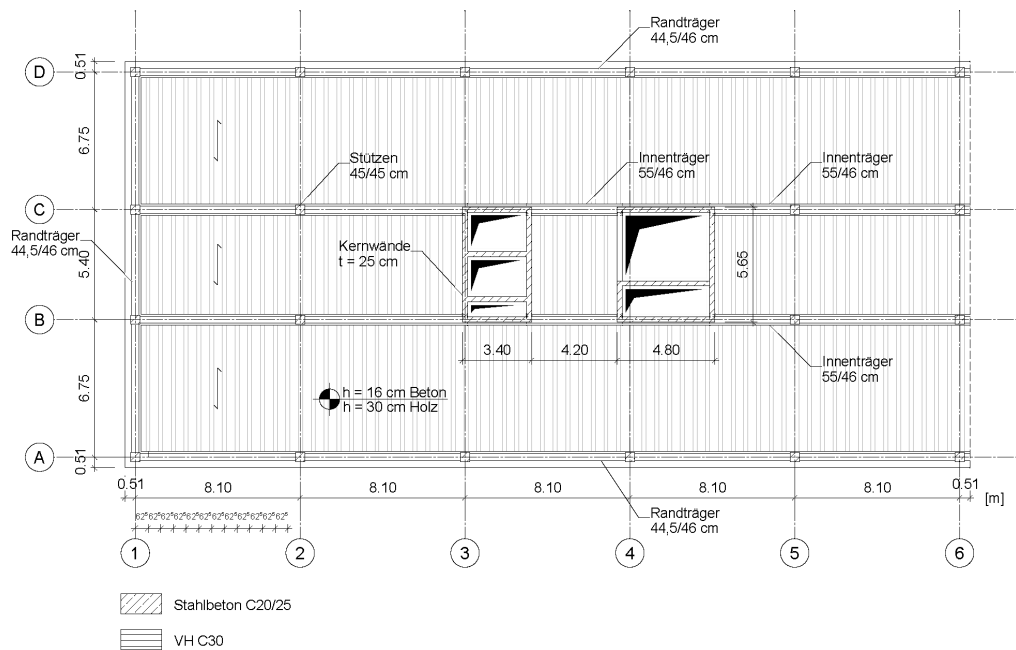
Für die Auswertung des GWP wird den Rand- und Innenträgern (s. 8.1.6) neben der Stahlmenge auch der Anteil des Kammerbetons zzgl. Bewehrung aus der Bemessung im Brandfall zugeordnet.



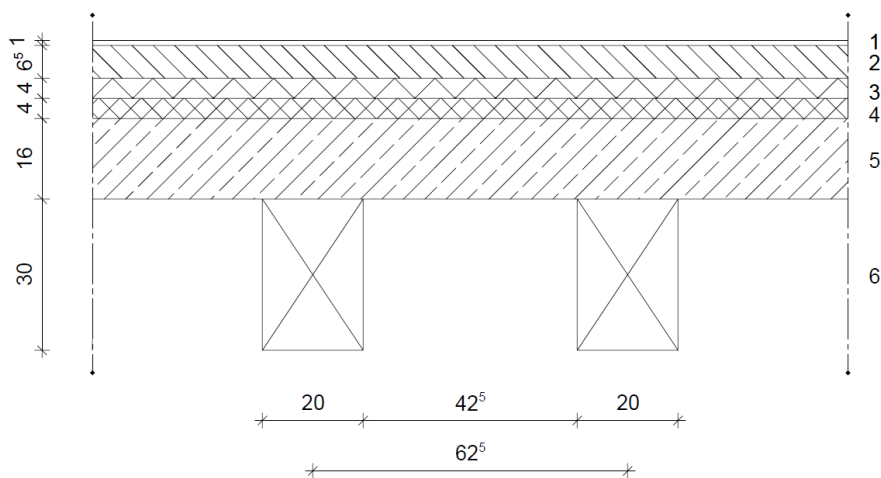
Für die Module A1-A3 wirken sich die KVH-Rippen positiv auf die GWP-Bewertung aus (negativer Wert), die restlichen Konstruktionselemente gehen negativ in die GWP-Betrachtungen ein. Somit ergibt sich für die Module A1-A3 bereits ein positiver GWP-Wert, der sich lediglich durch den im Holz der KVH-Rippen eingelagerten Kohlenstoff leicht nach unten korrigiert. Für biogene Werkstoffe ist jedoch stets Modul C3 (Freisetzen des gebundenen Kohlenstoffs) zu berücksichtigen, wodurch eine deutliche Korrektur in den positiven Bereich stattfindet. Modul D wiederum erfasst die potenzielle Gutschrift einer energetischen Verwertung der Holzwerkstoffe. Das GWP der Ausbauschicht wird wesentlich durch den Zementestrich beeinflusst, wobei auch der Einfluss der Brandschutzplatten nicht zu vernachlässigen ist. Die EPDs aller Baustoffe der Ausbauschichten weisen für die Module C3 und D keine Werte aus. Betrachtet man die Module A1-A3, C3, D zusammen, ergibt sich insgesamt ein positiver GWP-Wert.

Variante 2 – steife Deckenkonstruktion

Deckenuntersicht



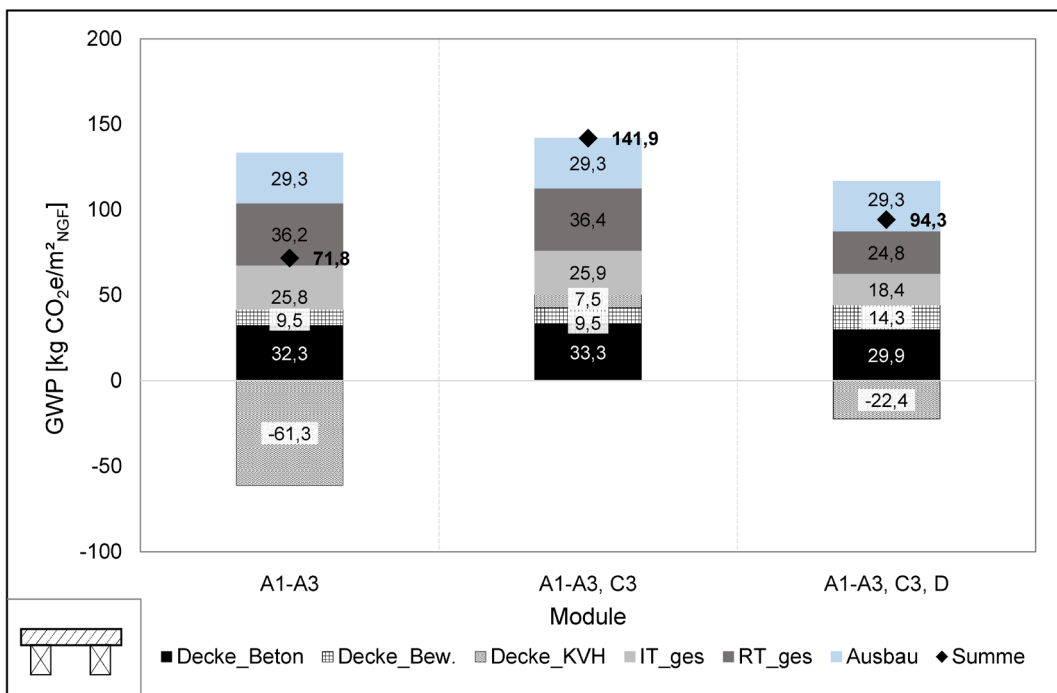
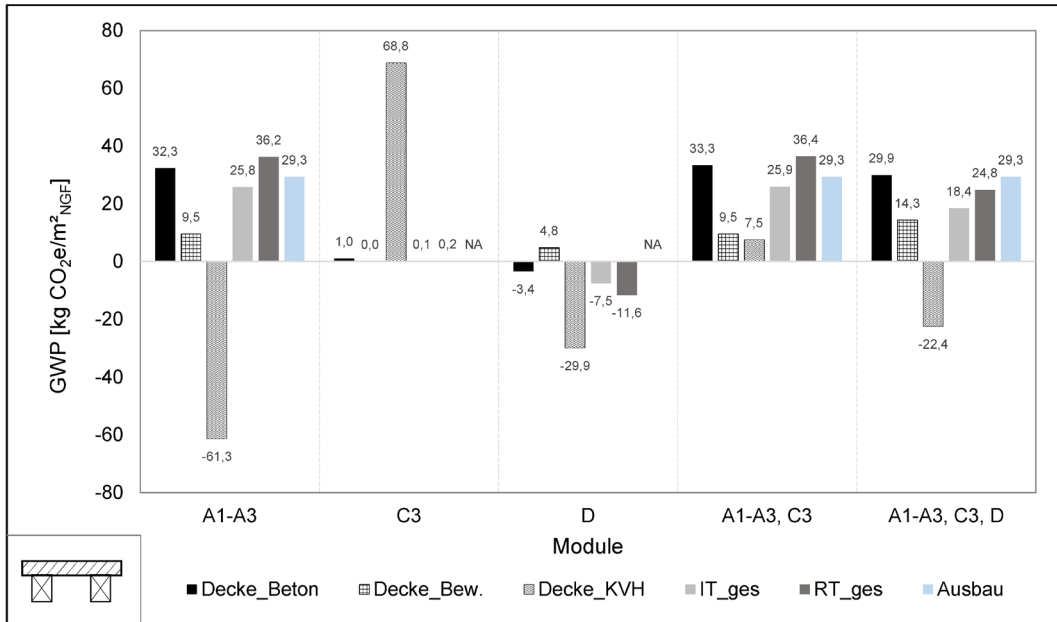
Deckenaufbau



| Schicht | EPD | t [cm] | ρ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ | ME [je m ²] |
|----------------------|------|--------|--|--|
| 1 Bodenbelag | - | 1,00 | - | - |
| 2 Zementestrich | [63] | 6,50 | 2000 | $0,065 \cdot \frac{2}{2,4} \cdot 2 = 0,11 \text{ t}$ |
| 3 Trittschalldämmung | [56] | 4,00 | 100 | 0,04 m ³ |
| 4 Ausgleichsdämmung | [56] | 4,00 | 100 | 0,04 m ³ |
| 5 Betonplatte C20/25 | [47] | 16,00 | 2400 | 0,16 m ³ |
| Bewehrung | [29] | var. | 7850 | (s. 8.1.6) |
| 6 KVH | [26] | 30,00 | 500 | (s. 8.1.6) |

GWP

Für die Auswertung des GWP wird den Rand- und Innenträgern (s. 8.1.6) neben der Stahlmenge auch der Anteil des Kammerbetons zzgl. Bewehrung aus der Bemessung im Brandfall zugeordnet.



Für die Module A1-A3 wirken sich die KVH-Rippen positiv auf die GWP-Bewertung aus (negativer Wert), die restlichen Konstruktionselemente gehen negativ in die GWP-Betrachtungen ein. Somit ergibt sich für die Module A1-A3 bereits ein positiver GWP-Wert, der sich lediglich durch den im Holz der KVH-Träger eingelagerten Kohlenstoff leicht nach unten korrigiert. Für biogene Werkstoffe ist jedoch stets Modul C3 (Freisetzen des gebundenen Kohlenstoffs) zu berücksichtigen, wodurch eine deutliche Korrektur in den positiven Bereich stattfindet. Modul D wiederum erfasst die potenzielle Gutschrift einer energetischen Verwertung der Holzwerkstoffe. Das GWP der Ausbauschicht wird wesentlich durch den Zementestrich beeinflusst. Die EPDs aller Baustoffe der Ausbauschichten weisen für die Module C3 und D keine Werte aus. Betrachtet man die Module A1-A3, C3, D zusammen, ergibt sich insgesamt ein positiver GWP-Wert.

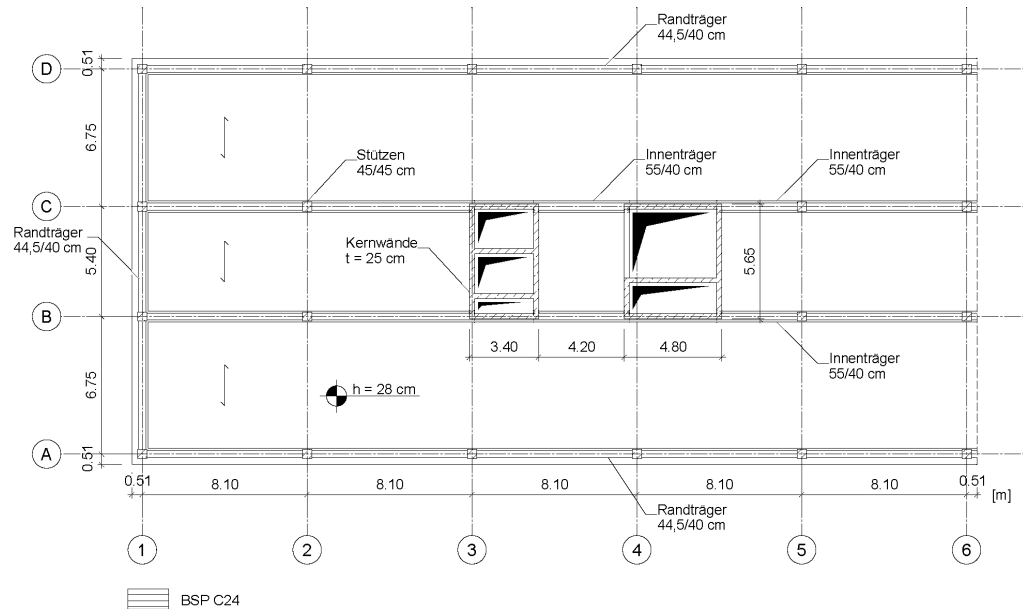
Im Vergleich zur schlanken Variante ergibt sich für die Module A1-A3, C3 ein um knapp 10% höherer GWP-Wert, bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Modul D sind beide Varianten hinsichtlich des GWP als annähernd gleich einzustufen, da die steifere Deckenkonstruktion aufgrund des höheren Holzanteils eine höhere Gutschrift erhält.

Für den im Fazit aufgestellten GWP-Vergleich mit den anderen Deckensystemen wird mit Variante 2 die steifere Deckenkonstruktion herangezogen.

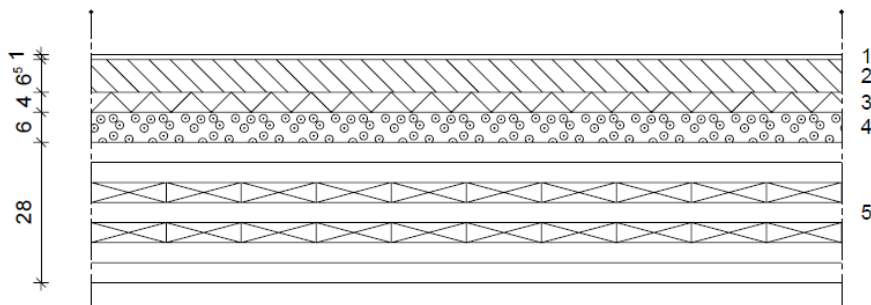
5.2.7 Brettsperrholzdecke mit Stahlträgern

Für die betrachtete Brettsperrholzdecke mit Stahlträgern können die Randbedingungen sowohl der folgenden Deckenuntersicht als auch Kap. 8.1.7 entnommen werden. Die zugrunde gelegte Bemessung ist ebenfalls in Kap. 8.1.7 ersichtlich.

Deckenuntersicht



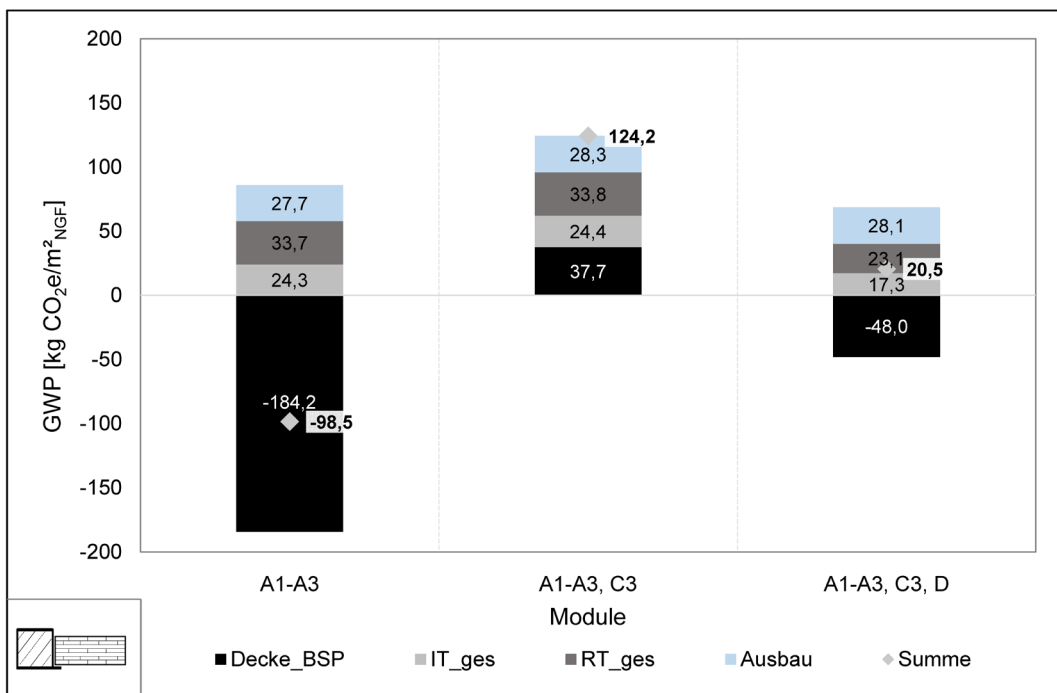
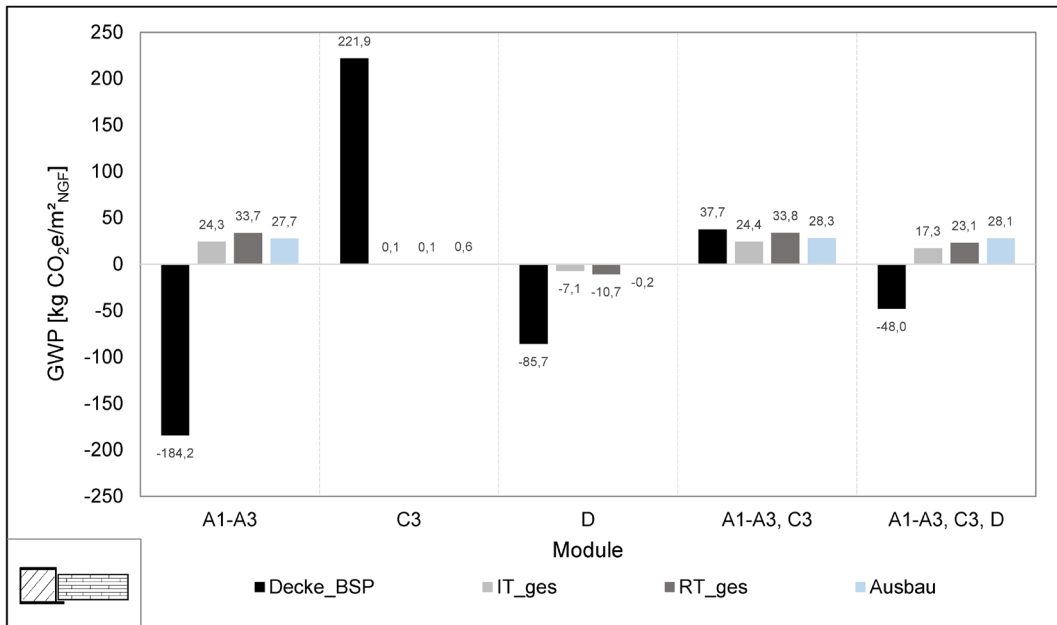
Deckenaufbau



| Schicht | EPD | t [cm] | ρ [kg/m ³] | ME [je m ²] |
|--|------|--------|-----------------------------|--|
| 1 Bodenbelag | - | 1,00 | - | - |
| 2 Zementestrich | [63] | 6,50 | 2000 | $0,065 \cdot \frac{2}{2,4} \cdot 2 = 0,1083 \text{ t}$ |
| 3 Trittschalldämmung | [56] | 4,00 | 100 | 0,04 m ³ |
| 4 Splittschüttung zzgl. Rieselschutzpapier | [64] | 6,00 | 1500 | $0,06 \cdot \frac{1500}{1000} = 0,09 \text{ t}$ |
| 5 Brettsperrholz (BSP) | [53] | 28,00 | 500 | 0,28 m ³ |

GWP

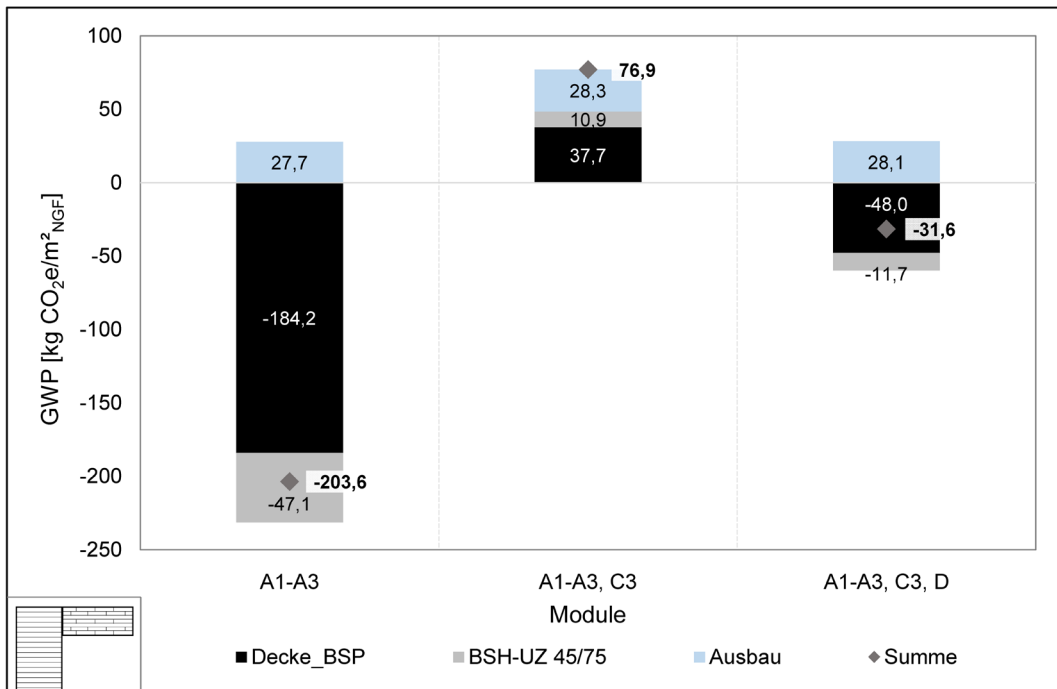
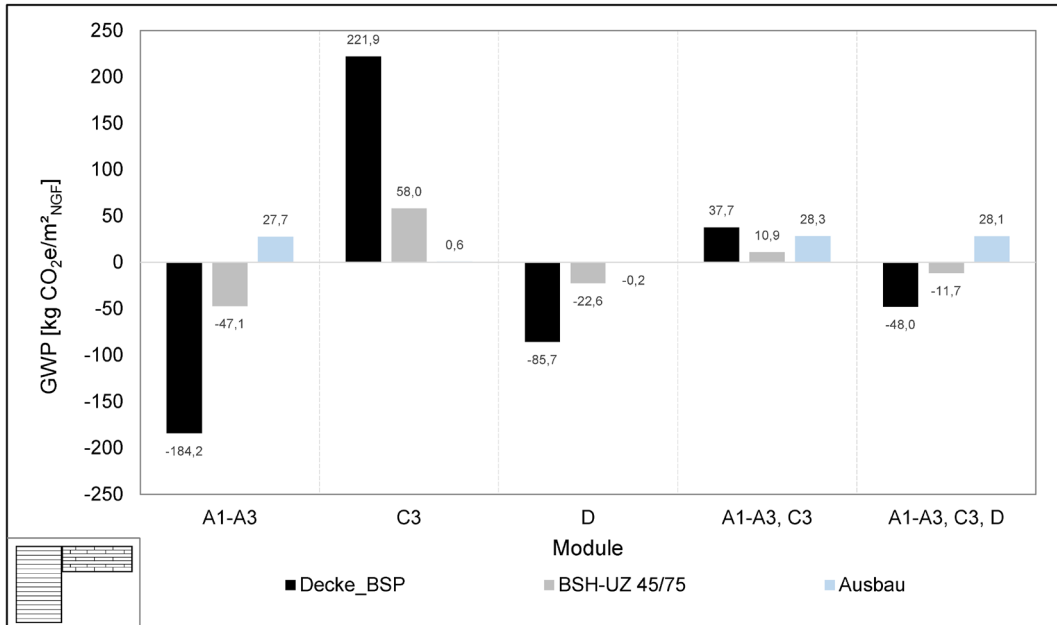
Für die Auswertung des GWP wird den Randträger (RT) und Innenträgern (IT) (s. 8.1.7) neben der Stahlmenge auch der Anteil des Kammerbetons zzgl. Bewehrung aus der Bemessung im Brandfall zugeordnet.



Für die Module A1-A3 beeinflussen die Randträger (RT), Innenträger (IT) und der Ausbau das GWP negativ (positive Werte), die Brettsperrholzdecke (BSP) beeinflusst den GWP-Wert positiv (negativer Wert). Somit ergibt sich für die Module A1-A3 ein insgesamt negativer GWP-Wert, der sich maßgeblich durch den im Holz eingelagerten Kohlenstoff ergibt. Für biogene Werkstoffe ist jedoch stets Modul C3 (Freisetzen des gebundenen Kohlenstoffs) zu berücksichtigen, wodurch eine deutliche Korrektur in den positiven Bereich stattfindet. Modul D wiederum erfasst die potenzielle Gutschrift einer energetischen Verwertung der Holzwerkstoffe. Das GWP der Ausbauschichten wird zu ca. 70 % durch den Zementestrich verursacht, das Rieselschutzpapier wurde nicht berücksichtigt. Betrachtet man die Module A1-A3, C3, D zusammen, ergibt sich insgesamt ein positiver GWP-Wert.

GWP

Die Auswertung des GWP umfasst die Brettsperrholzdecke, die Unterzüge aus Brettschichtholz sowie die Ausbauschichten gesondert.



Für die Module A1-A3 wird der GWP-Wert lediglich durch den Ausbau negativ beeinflusst, sowohl das GWP der Brettsperrholzdecke (BSP) als auch der Unterzüge aus Brettschichtholz haben einen positiven Effekt auf die GWP-Betrachtung (negative Werte). In Summe ergibt sich für die Module A1-A3 ein hoher negativer GWP-Wert, der sich maßgeblich durch den im Holz eingelagerten Kohlenstoff ergibt. Für biogene Werkstoffe ist jedoch stets Modul C3 (Freisetzen des gebundenen Kohlenstoffs) zu berücksichtigen, wodurch eine deutliche Korrektur in den positiven Bereich stattfindet. Modul D wiederum erfasst die potenzielle Gutschrift einer energetischen Verwertung der Holzwerkstoffe. Das GWP der Ausbauschichten wird zu ca. 70 % durch den Zementestrich verursacht, das Rieselschutzpapier wurde nicht berücksichtigt. Betrachtet man die Module A1-A3, C3, D zusammen, ergibt sich insgesamt ein negativer GWP-Wert.

5.3 Fazit

Abb. 8 stellt das GWP aller Deckensysteme (s. Kap. 5.1 & 5.2) vergleichend gegenüber und weist gesondert die Module A1-A3, C3 und D sowie A1-A3, C3, D aus.

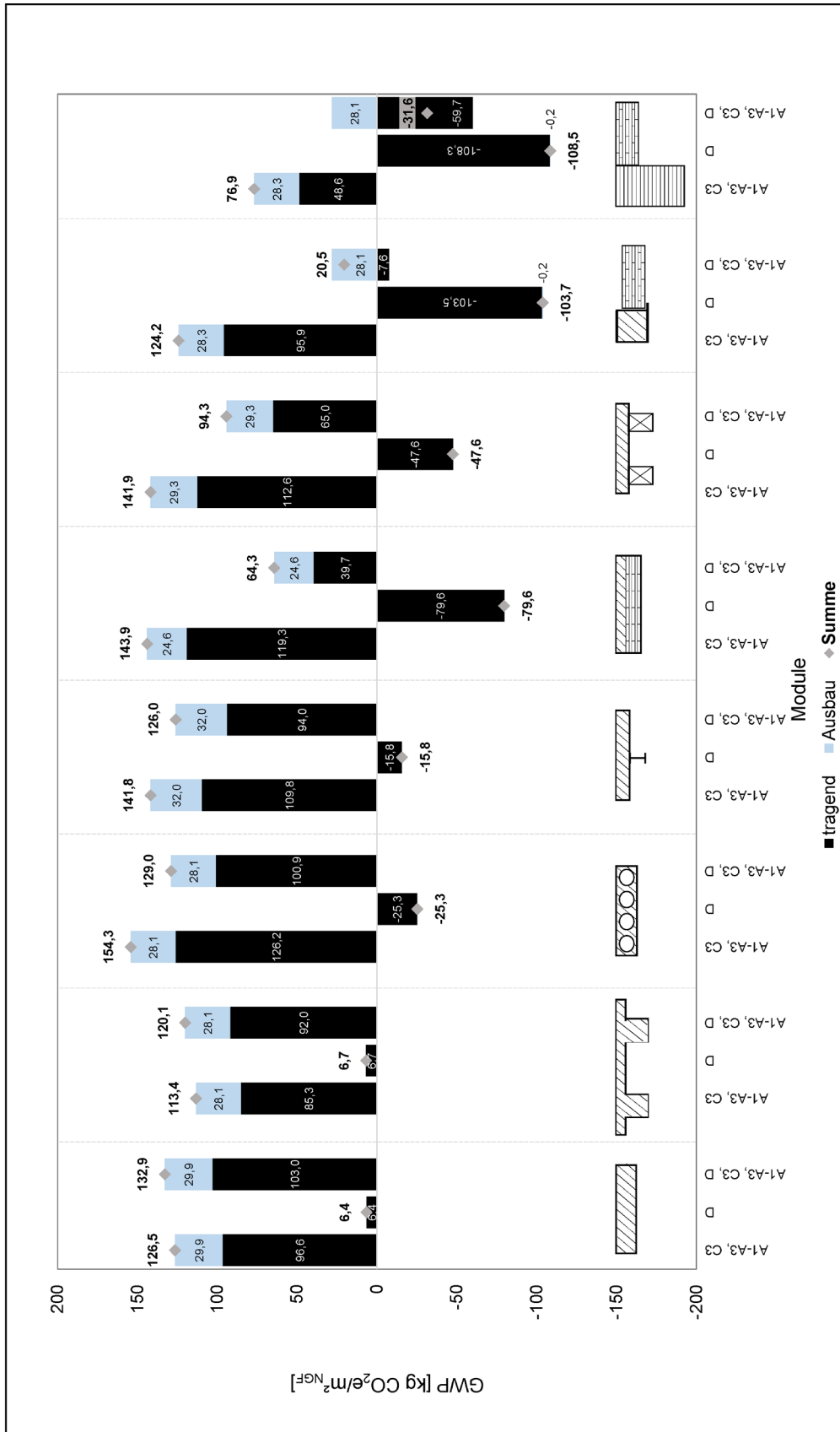


Abb. 8: Gegenüberstellung aller betrachteten Deckensysteme (s. Kap. 5.1 und Kap. 5.2)

Wie bereits in den jeweiligen Abschnitten in Kap. 5.2 beschrieben, resultieren für fast alle Deckensysteme durchweg positive GWP-Werte. Einzig die betrachtete Brettsperrholzdecke mit BSH-Trägern (s. Kap. 5.2.8) erreicht einen negativen GWP-Wert unter Berücksichtigung der Module A1-A3, C3, D. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass der Ansatz von Gutschriften in Modul D mit Bedacht erfolgen sollte. Für das End-of-Life-Szenario sind stets Unwägbarkeiten möglich (u.a. Szenariowechsel, Änderung der Gutschriftgrundlagen wie z.B. Änderung des Strommix, welcher Basis für die Quantifizierung der Gutschriften von Holzwerkstoffen ist), welche die GWP-Bewertung von Modul D beeinflussen und in der Planungsphase nur schwierig abzusehen sind. Insbesondere eine energetische Verwertung von Holz bringt gegenüber einer stofflichen Verwertung eine höhere Gutschrift, sodass ein höherer Materialeinsatz und ein thermisches Verwertungsszenario von Holz die GWP-Bilanz (bei Berücksichtigung von Modul D) begünstigt – was kritisch zu hinterfragen ist. Trotz dieser Unwägbarkeiten sollte Modul D bei vergleichenden Betrachtungen stets untersucht und für die Interpretation der Ergebnisse verwendet werden. Vor dem Hintergrund der zuvor genannten Aspekte (Verwertungsszenario etc.) sollten potenzielle Gutschriften jedoch gesondert ausgewiesen und transparent diskutiert werden.

Beschränkt man sich auf die Module A1-A3, C3 ist die Brettsperrholzdecke mit BSH-Trägern dennoch das, bezogen auf die GWP-Betrachtung, favorisierte System. Dennoch kann man für alle hier betrachteten Deckenkonstruktionen festhalten, dass bezogen auf das GWP (Module A1-A3, C3) keine der Deckenkonstruktionen die in der Einleitung erwähnten Ziele des Pariser Klimaabkommens oder das von der Bundesrepublik anvisierte Ziel zur Klimaneutralität uneingeschränkt unterstützen kann.

Festzuhalten ist, dass die ausgewiesenen Werte pro Quadratmeter Decke zu verstehen sind und somit auch marginale Einsparungen beim GWP allein durch die zumeist großen Flächen ein beträchtliches Einsparpotential ermöglichen. Zudem können die hier nicht betrachteten Vertikalkonstruktionen wie Stützen und Wände infolge geringerer Auflast aus leichten Deckenkonstruktionen filigraner ausgebildet werden. Auch die jeweiligen Gründungkörper sind direkt abhängig von der jeweiligen Auflast. Somit weisen leichtere Deckenkonstruktionen signifikante Einsparpotenziale bzgl. des GWP der Gesamtkonstruktion auf. Um derartige Einflüsse quantifizieren zu können, sind ausgeweitete Studien auf Bauwerksebene notwendig.

6 GWP-Vergleich ausgewählter Außenwandsysteme

6.1 Allgemeines

Die konstruktionsbedingten THG-Emissionen von Wohngebäuden werden maßgeblich sowohl durch die Deckenkonstruktionen als auch durch die Außenwandsysteme beeinflusst (vgl. Abb. 2). Um das globale Erwärmungspotenzial tragender Außenwände quantifizieren und vergleichen zu können, wurde in diesem Bericht das GWP von insgesamt 8 Wandaufbauten (s. Abb. 9) einander gegenübergestellt.

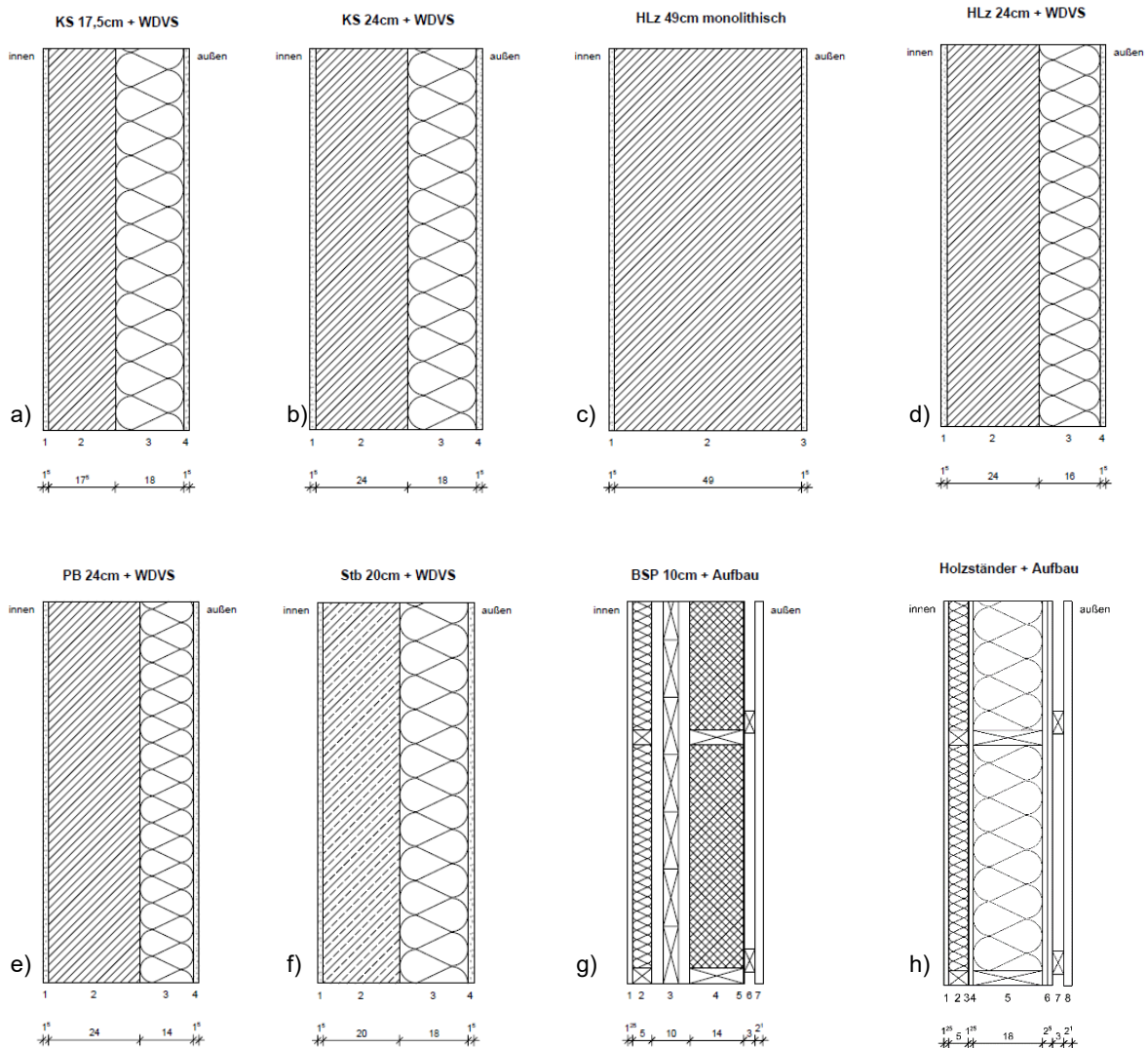


Abb. 9: Übersicht Außenwandsysteme, a) KS¹⁷ 17,5 cm + WDVS¹⁸, b) KS 24 cm + WDVS, c) HLz¹⁹ 49 cm monolithisch, d) HLz 24 cm + WDVS, e) PB²⁰ 24 cm + WDVS, f) Stb²¹ 20 cm + WDVS, g) BSP²² 10 cm + Aufbau, h) Holzständer + Aufbau

¹⁷ Kalksandstein

¹⁸ Wärmedämmverbundsystem mit notwendiger Dicke für das jeweilige Wandsystem zum Erreichen des vorgegebenen U-Wertes (s. Kap. 6.1.1)

¹⁹ Hochlochziegel

²⁰ Porenbeton

²¹ Stahlbeton

²² Brettsperrholz

6.1.1 Randbedingungen

Zur Vergleichbarkeit müssen alle Wandsysteme die folgenden Randbedingungen bzw. Abmessungen erfüllen:

- Abmessungen 1 m breiter Wandstreifen
- Lichte Geschosshöhe 2,75 m
- Lagerung zweiseitig gehalten
- Belastung (zentrisch eingeleitet) $q_{Ed} = 183 \text{ kN/m}$,
 - resultierend aus 4 Geschossen mit einer Deckenspannweite von 6 m
 - Deckeneigengewicht – Wände a) – f) $g_{k,1} = 6,3 \text{ kN/m}^2$
 - Deckeneigengewicht – Wände g) und h) $g_{k,1} = 1,5 \text{ kN/m}^2$
 - Ausbaulast $g_{k,2} = 2 \text{ kN/m}^2$
 - Nutzlast $q_k = 2,7 \text{ kN/m}^2$
- Erfüllung der Standsicherheitsnachweise mit einer Ausnutzung von ca. 70 % im Regelbereich mit ausreichender Reserve außerhalb des Regelbereichs
- Wärmeschutzanforderungen²³
 - Wärmedurchgangskoeffizient $U \approx 0,18 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
 - Holzwandsysteme $R_{si,Holz} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$,
 $R_{se,Holz} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$
 - Alle anderen Wandsysteme: $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$,
 $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$
- Brandschutzanforderungen²³ F 90

Die Nachweisführung der Mauerwerkswände erfolgte mithilfe des vereinfachten Mauerwerksnachweises nach DIN EN 1996-3+NA [85; 86]. Es wurden typische Steinfestigkeitsklassen verwendet, wodurch teils geringfügige Abweichungen zur Zielausnutzung von 70 % resultieren. Die Stahlbetonwand wurde gemäß DIN EN 1992-1-1+NA [87; 88] nachgewiesen. Der Nachweis der Brettsperrholzwand erfolgte nach DIN EN 1995-1-1+NA [89; 90] sowie in Anlehnung an [91] zur Berücksichtigung der Schubnachgiebigkeit.

Für die GWP-Ermittlung wird eine Referenz-Nutzungsdauer von 50 Jahren angesetzt. Für diesen Zeitraum wird davon ausgegangen, dass keine Instandhaltungsmaßnahmen anfallen und demnach die GWP-Ergebnisse nicht durch eine etwaige Berücksichtigung der Module B2 – B4 beeinflusst würden. Auch bei den Wandkonstruktionen mit WDVS wird davon ausgegangen, dass das WDVS in diesem Zeitraum nicht ausgetauscht werden muss, da Studien auf eine derartige Haltbarkeit hinweisen [92]. Die GWP-Berechnung erfolgt auf Bauteilebene, sodass lediglich alle Komponenten der Außenwandsysteme ohne etwaige Anschlussdetails oder benachbarte Bauteile berücksichtigt werden. Die nachfolgenden Diagramme weisen jeweils die Module A1-A3, C3 und D einzeln aus und zusätzlich jeweils aufsummiert A1-A3, C3 und A1-A3, C3, D.

Auf den nächsten Seiten sind die jeweiligen Wandsysteme dargestellt, deren einzelne Wandschichten charakterisiert, die tabellarische Bemessung ausgewiesen sowie die GWP-Ergebnisse bezogen auf einen Quadratmeter Wandfläche grafisch aufbereitet. Im Anschluss werden die Wandsysteme in Kap. 6.3 verglichen.

²³ Nachweisführung durch Pirlet & Partner Ingenieurgesellschaft mbH

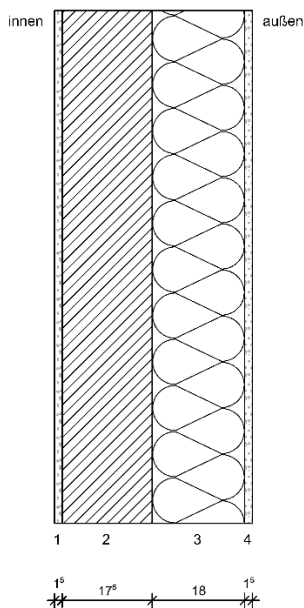
6.2 Wandsysteme

6.2.1 Kalksandstein

Es wurden tragende Wandschichten von 17,5 cm respektive 24 cm jeweils mit Wärmedämmverbundsystem (WDVS) untersucht. Dabei zeigt sich, dass sich aufgrund des geringen λ -Wertes für beide KS Wandschichtendicken gleiche Dicken für das WDVS ergeben.

KS 17,5 cm

Wandaufbau

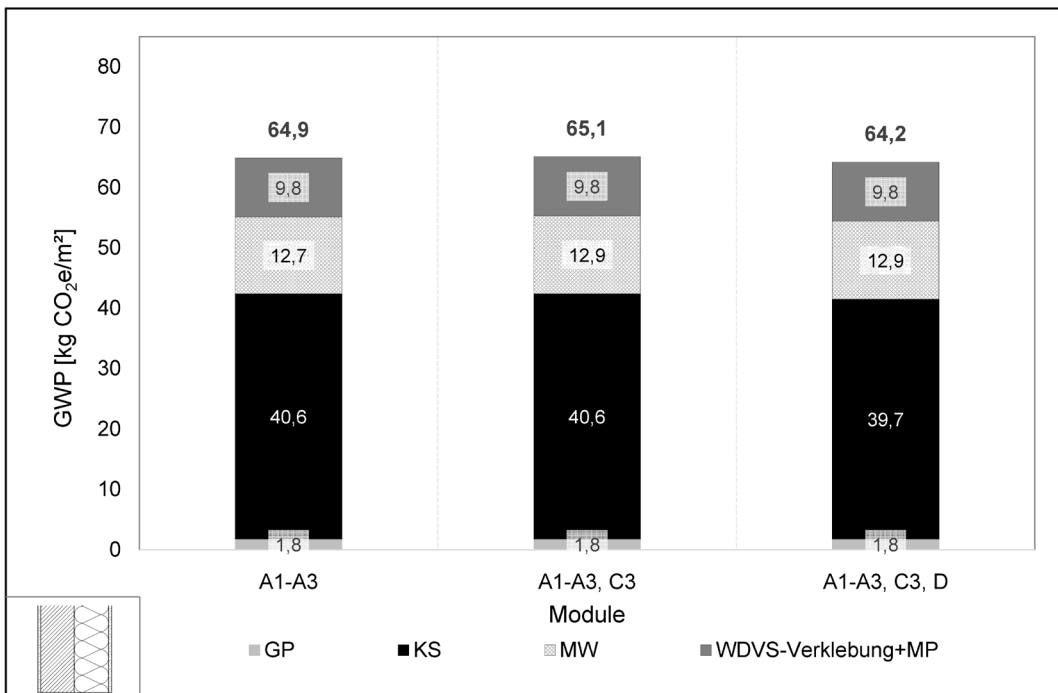
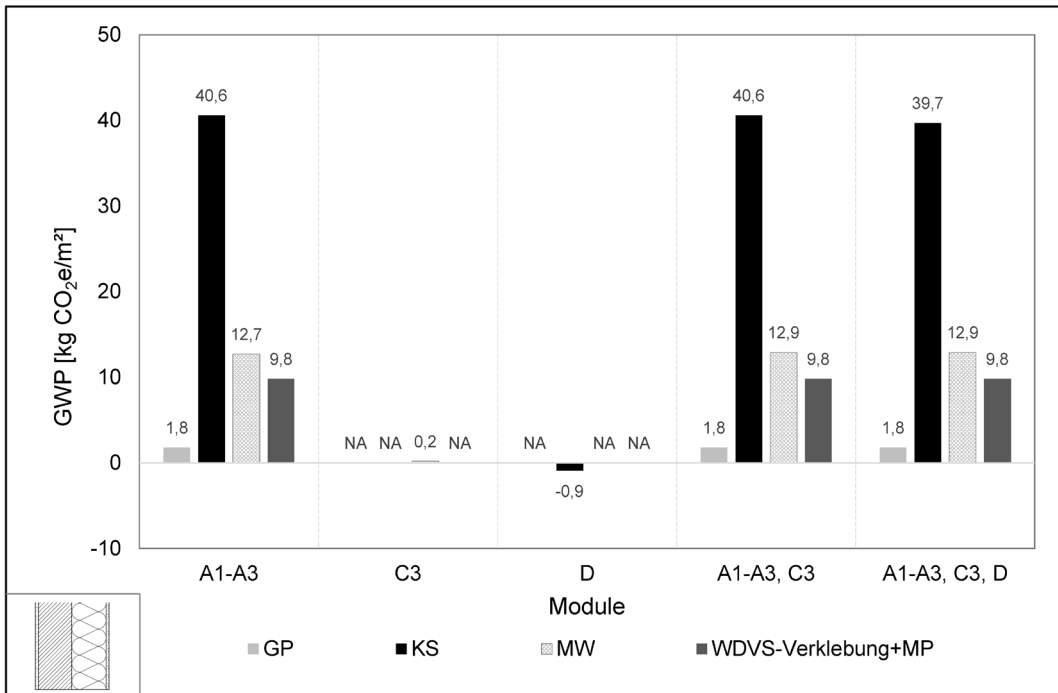


| Schicht | | EPD | t [cm] | ρ [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$] | ME [je m ²] | λ [$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$] |
|---------|--------------------------------------|------|-----------|--|--|---|
| 1 | Gipsputz (GP) | [58] | 1,50 | 1200 | 0,015 m ³ | 0,350 |
| 2 | Kalksandstein (KS) | [50] | 17,50 | 2000 | $0,175 \cdot \frac{2}{1,8} \text{m}^3$ | 1,100 |
| 3 | Mineralwolle (MW) | [55] | 18,00 | 20 | 0,18 m ³ | 0,035 |
| 4 | WDVS-Verklebung + mineralischer Putz | [57] | 1,50 | 1100 | 1 m ² | 0,700 |

Nachweis

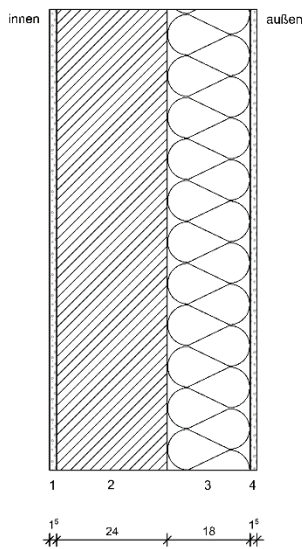
| Kalksandstein | |
|----------------------------------|----------------------------|
| Planstein KSL-P St 12 DM RDK 2,0 | |
| f_k | 5,60 [N/mm ²] |
| f_d | 0,32 [kN/cm ²] |
| Wichte | 20,00 [kN/m ³] |
| Geschosse darüber | 4 [-] |
| Wand eigengewicht $g_{Ed,ges}$ | 51,98 [kN/m] |
| Lasten aus Decken p_{Ed} | 183,00 [kN/m] |
| a | 17,50 [cm] |
| Φ_1 | 0,60 [-] |
| Φ_2 | 0,70 [-] |
| ρ_2 | 0,75 [-] |
| h_{ef} | 2,06 [m] |
| erf. t | 12,34 [cm] |
| gew. t | 17,50 [cm] |
| η | 0,71 [-] |

GWP



KS 24 cm

Wandaufbau

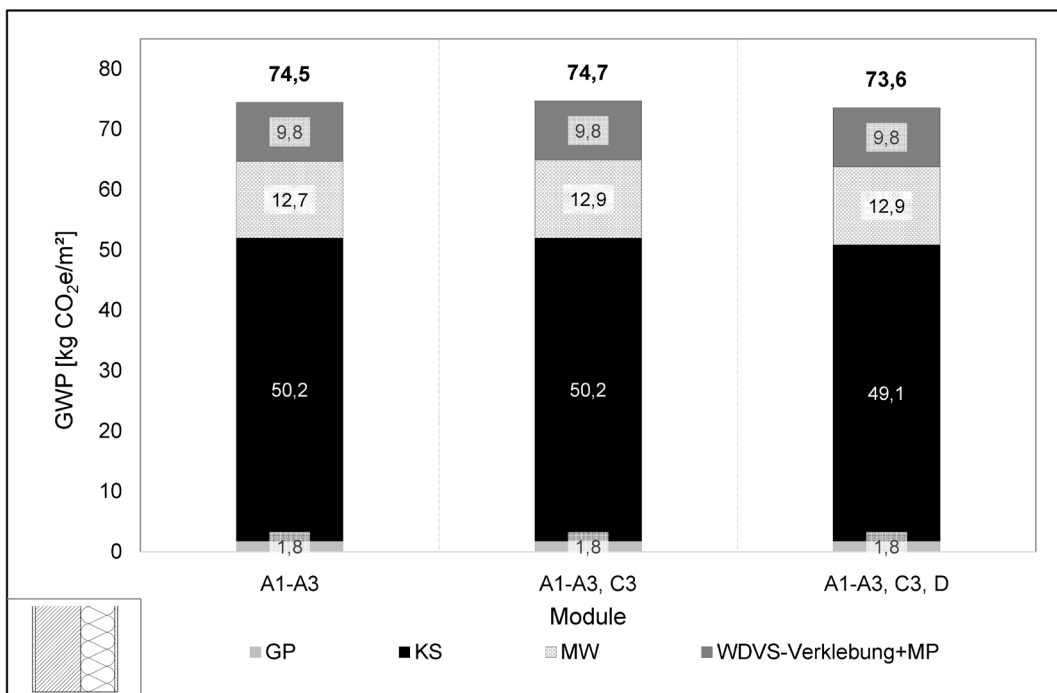
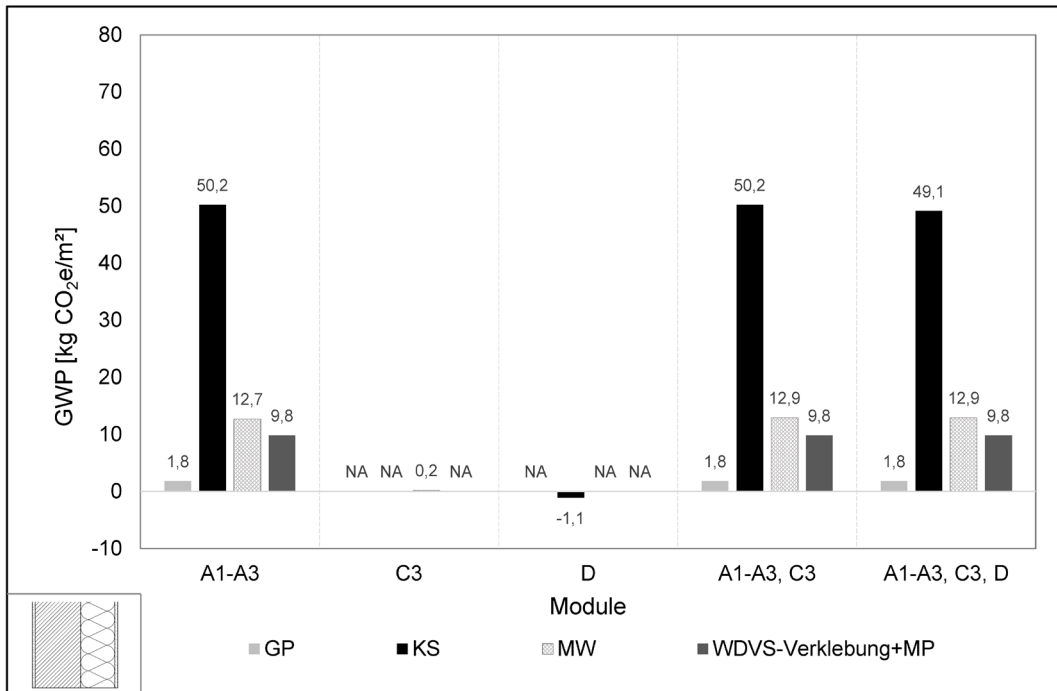


| Schicht | | EPD | t [cm] | ρ [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$] | ME [je m ²] | λ [$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$] |
|---------|--------------------------------------|------|-----------|--|----------------------------|---|
| 1 | Gipsputz (GP) | [58] | 1,50 | 1200 | 0,015 m ³ | 0,350 |
| 2 | Kalksandstein (KS) | [50] | 24,00 | 1800 | 0,24 m ³ | 0,990 |
| 3 | Mineralwolle (MW) | [55] | 18,00 | 20 | 0,18 m ³ | 0,035 |
| 4 | WDVS-Verklebung + mineralischer Putz | [57] | 1,50 | 1100 | 1 m ² | 0,700 |

Nachweis

| | |
|--|----------------------------|
| Kalksandstein | |
| Planstein KSL-P St 12 DM RDK 1,8 | |
| f_k | 5,60 [N/mm ²] |
| f_d | 0,32 [kN/cm ²] |
| Wichte | 18,00 [kN/m ³] |
| Geschosse darüber | 4 [-] |
| Wand eigengewicht $g_{\text{Ed, ges}}$ | 64,15 [kN/m] |
| Lasten aus Decken p_{Ed} | 183,00 [kN/m] |
| a | 24,00 [cm] |
| Φ_1 | 0,60 [-] |
| Φ_2 | 0,73 [-] |
| ρ_2 | 0,90 [-] |
| h_{ef} | 2,48 [m] |
| erf. t | 12,98 [cm] |
| gew. t | 24,00 [cm] |
| η | 0,54 [-] |

GWP



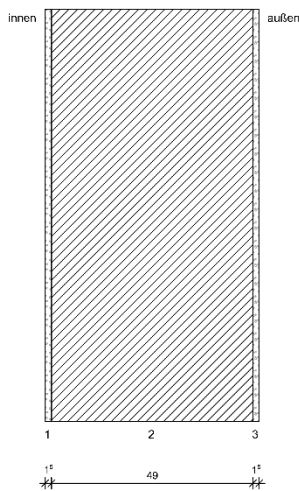
Unter Anbetracht der aktuellen Datenlage, dass 3 von 4 EPDs der hier betrachteten Baustoffe für die Module C3 und D keine Werte ausweisen, haben die Module C3 und D derzeit einen zu vernachlässigenden Einfluss auf die GWP-Betrachtung der beiden KS-Wandsysteme. Ca. 2/3 des GWP ergeben sich allein aus der KS-Wandschicht.

6.2.2 Hochlochziegel

Für die Außenwandsysteme aus ungefüllten Hochlochziegeln wurden 2 Konfigurationen untersucht. Zunächst wurde ein monolithischer Wandaufbau bewertet, bei dem die tragende Schicht vollständig die dämmende Funktion übernimmt. Darüber hinaus wurde ein Wandsystem mit dünnerer Tragschicht und zusätzlichem WDVS betrachtet.

Hochlochziegel monolithisch

Wandaufbau

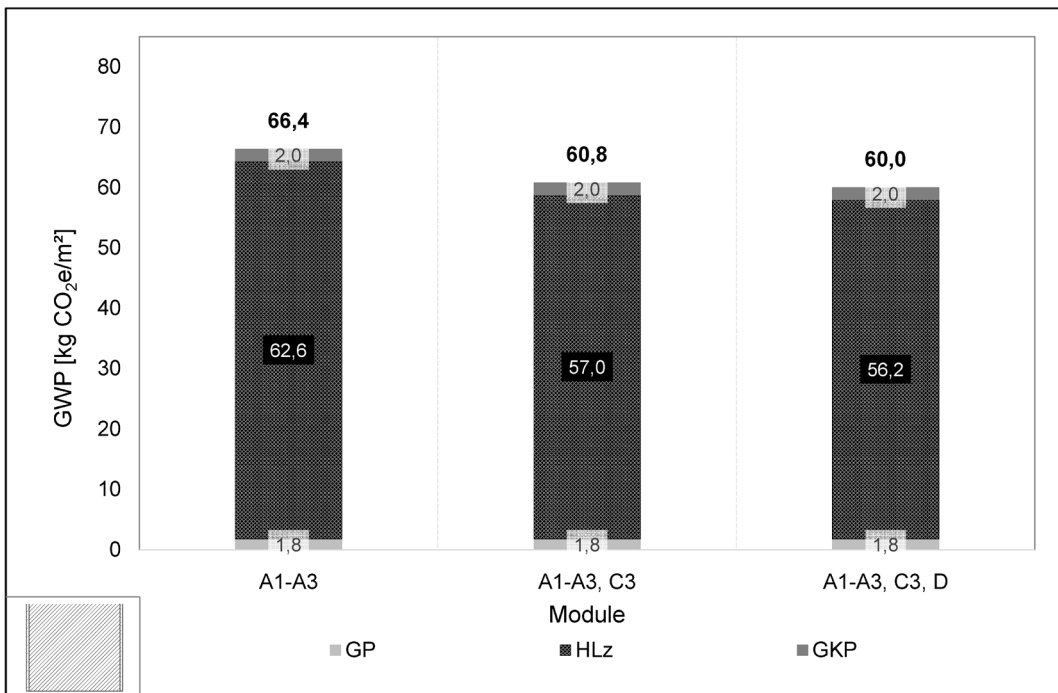
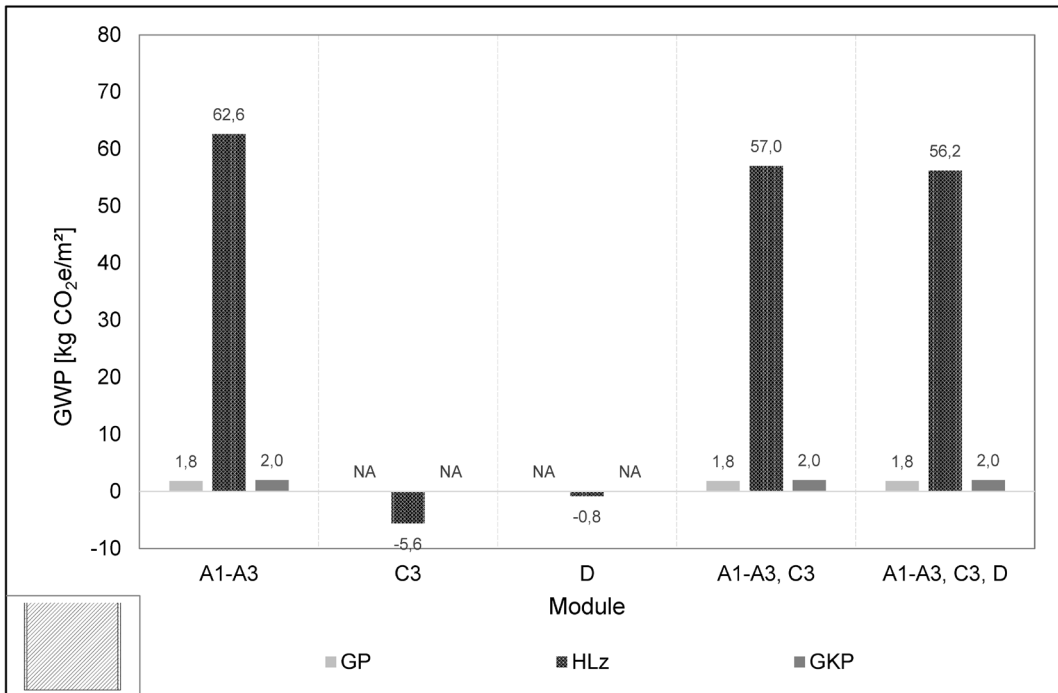


| Schicht | EPD | t [cm] | ρ [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$] | ME [je m ²] | λ [$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$] |
|------------------------|------|-----------|--|---|---|
| 1 Gipsputz (GP) | [58] | 1,50 | 1000 | 0,015 m ³ | 0,400 |
| 2 HLZA ungefüllt (HLz) | [51] | 49,00 | 650 | $0,49 \cdot \frac{650}{575} \text{m}^3$ | 0,090 |
| 3 Gips-Kalk-Putz (GKP) | [59] | 1,50 | 1100 | 0,015 m ³ | 0,700 |

Nachweis

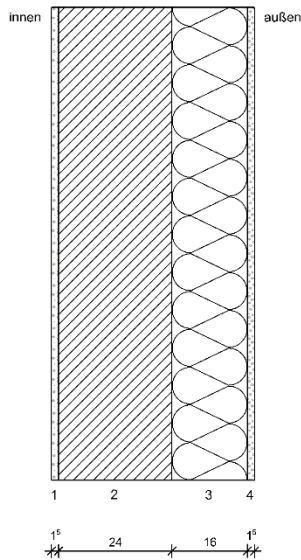
| HLZA 49cm ungefüllt St 10 NMII RDK 0,65 | |
|--|----------------------------|
| f_k | 3,50 [N/mm ²] |
| f_d | 0,20 [kN/cm ²] |
| Wichte | 6,50 [kN/m ³] |
| Geschosse darüber | 4 [-] |
| Wandeingengewicht $g_{\text{Ed,ges}}$ | 47,30 [kN/m] |
| Lasten aus Decken p_{Ed} | 183,00 [kN/m] |
| $a (2/3 \cdot t)$ | 32,67 [cm] |
| Φ_1 | 0,40 [-] |
| Φ_2 | 0,53 [-] |
| ρ_2 | 1,00 [-] |
| h_{ef} | 2,75 [m] |
| erf. t | 29,03 [cm] |
| gew. t | 49,00 [cm] |
| η | 0,59 [-] |

GWP



Hochlochziegel mit WDVS

Wandaufbau

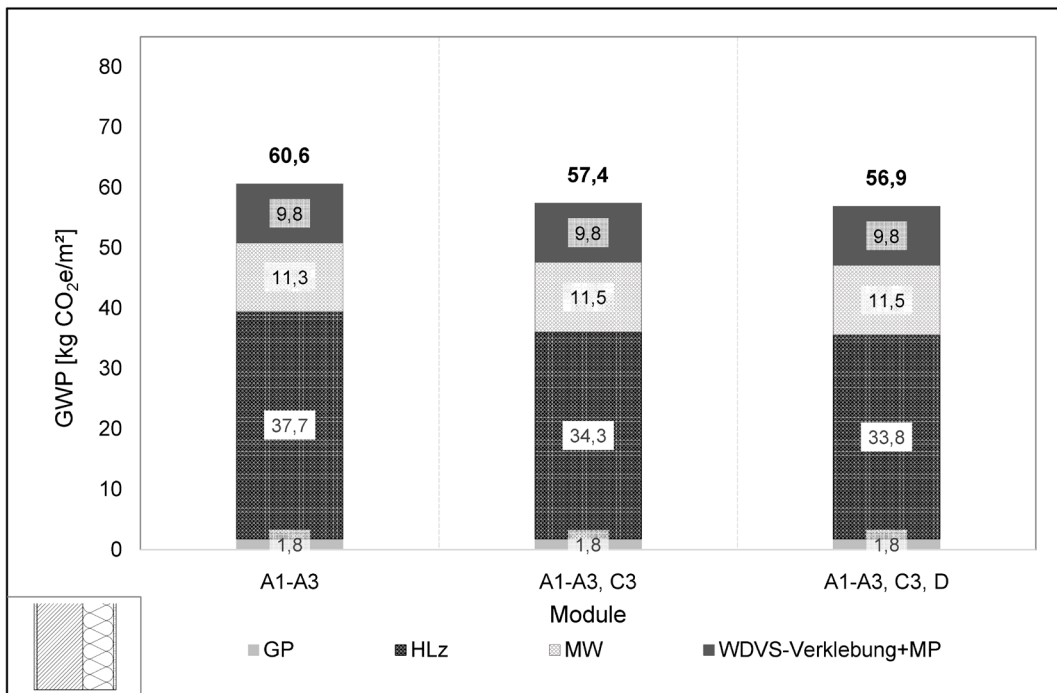
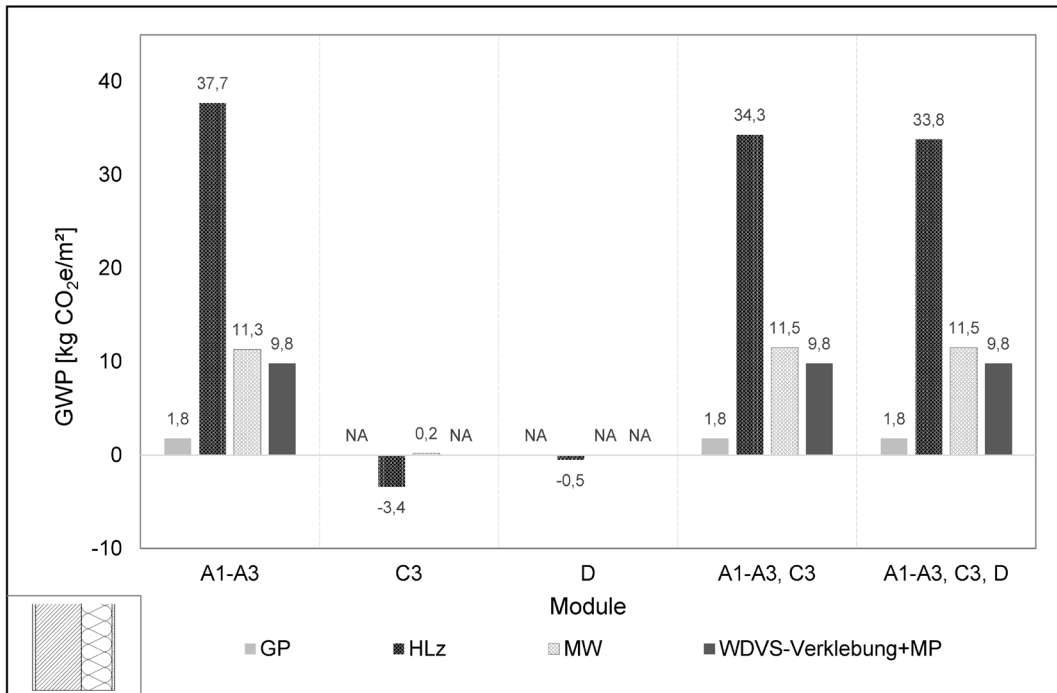


| Schicht | | EPD | t [cm] | ρ [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$] | ME [je m ²] | λ [$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$] |
|---------|--------------------------------------|------|-----------|--|---|---|
| 1 | Gipsputz (GP) | [58] | 1,50 | 1000 | 0,015 m ³ | 0,400 |
| 2 | HLZA ungefüllt (HLz) | [51] | 24,00 | 800 | $0,24 \cdot \frac{800}{575} \text{m}^3$ | 0,390 |
| 3 | Mineralwolle (MW) | [55] | 16,00 | 20 | 0,16 m ³ | 0,035 |
| 4 | WDVS-Verklebung + mineralischer Putz | [57] | 1,50 | 1100 | 1 m ² | 0,700 |

Nachweis

| | |
|--|----------------------------|
| HLZA 24cm ungefüllt St 10 NMII RDK 0,80 | |
| f_k | 3,50 [N/mm ²] |
| f_d | 0,20 [kN/cm ²] |
| Wichte | 8,00 [kN/m ³] |
| Geschosse darüber | 4 [-] |
| Wandeingengewicht $g_{Ed,ges}$ | 28,51 [kN/m] |
| Lasten aus Decken p_{Ed} | 183,00 [kN/m] |
| a | 24,00 [cm] |
| Φ_1 | 0,60 [-] |
| Φ_2 | 0,73 [-] |
| ρ_2 | 0,90 [-] |
| h_{ef} | 2,48 [m] |
| erf. t | 17,77 [cm] |
| gew. t | 24,00 [cm] |
| η | 0,74 [-] |

GWP

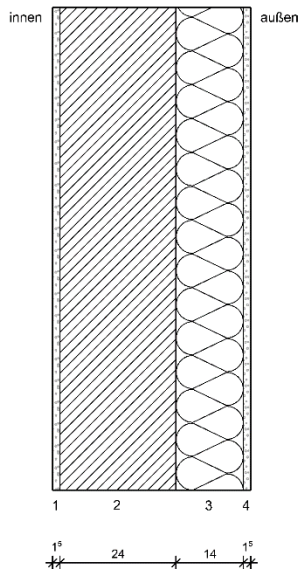


Interessant bei der Betrachtung der beiden HLz-Systeme ist, dass beide ein ähnliches GWP ausweisen und die Module C3 und D, auch aufgrund der aktuellen Datenlage (3 von 4 EPDs der hier betrachteten Baustoffe weisen keine Werte für C3 und D aus), nur leichte Korrekturen vornehmen. In Anbetracht der Diskussion um einfaches und nicht-mehrschichtiges Bauen steht ein 49er monolithischer Wandaufbau einem mehrschichtig verklebten WDVS auch seitens der GWP-Betrachtungen in nichts nach.

6.2.3 Porenbeton

Für eine typische Steifigkeitsklasse von Porenbetonsteinen ist unter den gegebenen Randbedingungen eine Wandstärke von 24 cm erforderlich. Diese wird durch eine 14 cm dicke WDVS-Schicht ergänzt.

Wandaufbau

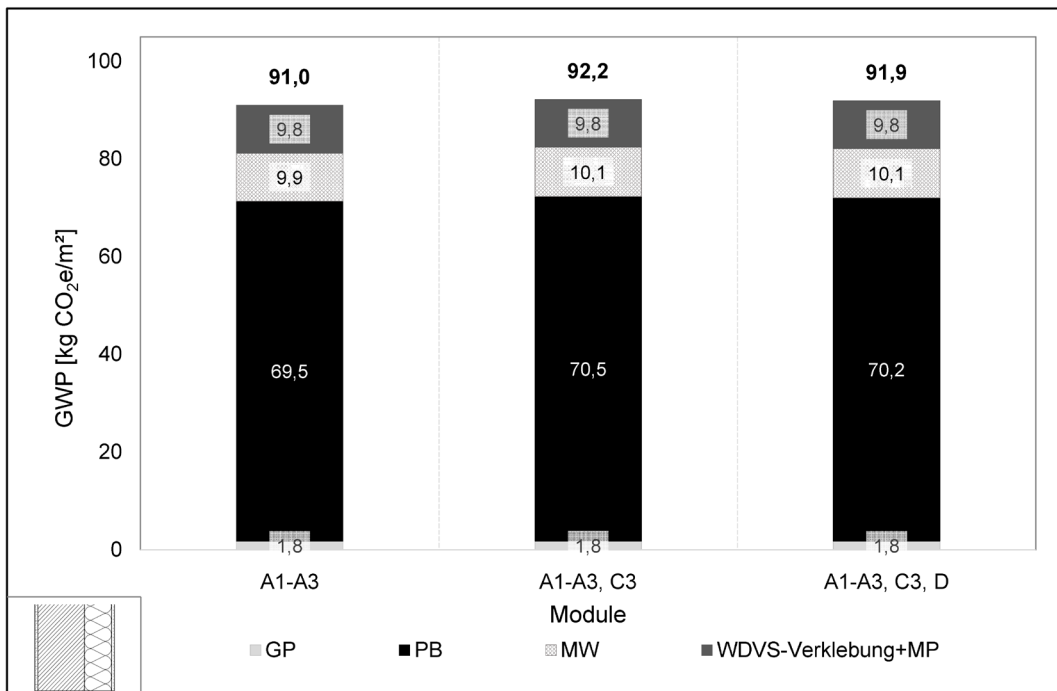
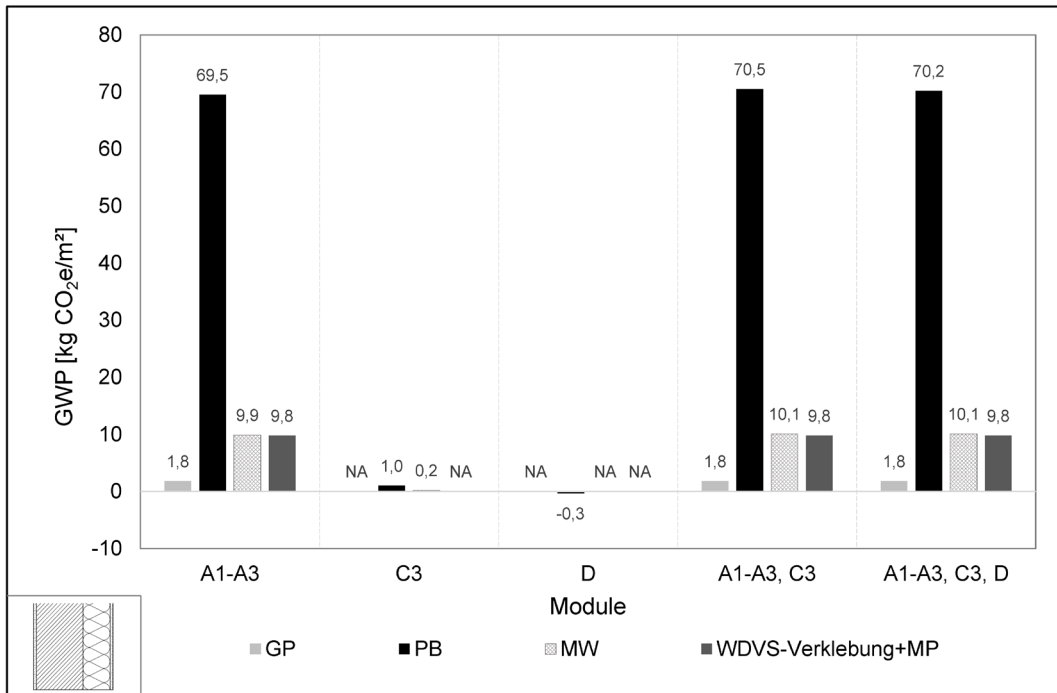


| Schicht | | EPD | t [cm] | ρ [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$] | ME [je m ²] | λ [$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$] |
|---------|--------------------------------------|------|-----------|--|---|---|
| 1 | Gipsputz (GP) | [58] | 1,50 | 1000 | 0,015 m ³ | 0,400 |
| 2 | Porenbeton (PB) | [52] | 24,00 | 650 | $0,24 \cdot \frac{650}{500} \text{m}^3$ | 0,180 |
| 3 | Mineralwolle (MW) | [55] | 14,00 | 20 | 0,14 m ³ | 0,035 |
| 4 | WDVS-Verklebung + mineralischer Putz | [57] | 1,50 | 1100 | 1 m ² | 0,700 |

Nachweis

| Porenbeton St 6 DM RDK 0,65 | |
|--------------------------------|----------------------------|
| f_k | 4,10 [N/mm ²] |
| f_d | 0,23 [kN/cm ²] |
| Wichte | 6,50 [kN/m ³] |
| Geschosse darüber | 4 [-] |
| Wandeigengewicht $g_{Ed,ges}$ | 23,17 [kN/m] |
| Lasten aus Decken p_{Ed} | 183,00 [kN/m] |
| a | 24,00 [cm] |
| Φ_1 | 0,60 [-] |
| Φ_2 | 0,73 [-] |
| ρ_2 | 0,90 [-] |
| h_{ef} | 2,48 [m] |
| erf. t | 14,79 [cm] |
| gew. t | 24,00 [cm] |
| η | 0,62 [-] |

GWP

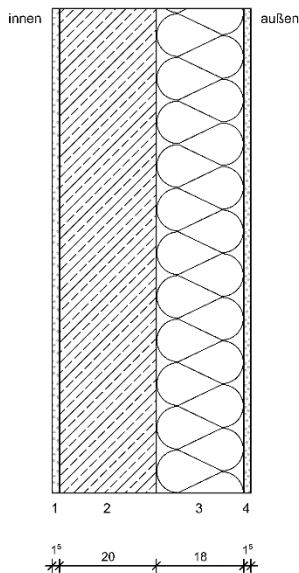


Das Einbeziehen der Module C3 und D, auch aufgrund der aktuellen Datenlage (3 von 4 EPDs der hier betrachteten Baustoffe weisen keine Werte für C3 und D aus), führt lediglich zu leichten Korrekturen der GWP Betrachtungen. Ca. 3/4 des GWP ergeben sich allein aus der PB-Wandschicht.

6.2.4 Stahlbeton

Für eine baustellengerechte Ausführbarkeit in Ortbetonbauweise wird bei der Stahlbetonwand eine Wandstärke von 20 cm angesetzt. Diese wird durch eine 18 cm dicke WDVS-Schicht ergänzt. Die notwendige Längs- und Querbewehrung wird auf Grundlage der erforderlichen Mindestbewehrung zur Rissbreitenbeschränkung ermittelt und in die GWP Betrachtungen mit einbezogen.

Wandaufbau



| Schicht | | EPD | t [cm] | ρ [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$] | ME [je m ²] | λ [$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$] |
|---------|---|--------------|-------------|--|---|---|
| 1 | Gipsputz (GP) | [58] | 1,50 | 1200 | 0,015 m ³ | 0,350 |
| 2 | Beton C20/25 Bewehrung | [47] [29] | 20,00 Ø8 | 2400 7850 | 0,200 m ³ 10,72 cm ² | 2,100 |
| 3 | Mineralwolle (MW) | [55] | 18,00 | 20 | 0,18 m ³ | 0,035 |
| 4 | WDVS-Verklebung + mineralischer Putz | [57] | 1,50 | 1100 | 1 m ² | 0,700 |

Nachweis

Ohne expliziten Nachweis wird die Mindestbewehrung für Gesamtwandlängen unter 6 m gewählt.

$$a_{s,\min} \geq \max \left\{ \begin{array}{l} 0,15 \cdot \frac{|N_{Ed}|}{f_{yd}} = 0,15 \cdot \frac{(183 + 1,35 \cdot 4 \cdot 0,2 \cdot 2,75 \cdot 25)}{43,5} = 0,89 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}} \\ 0,003 \cdot A_c = 0,003 \cdot 20 \cdot 100 = 6 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}} \end{array} \right.$$

Bewehrungswahl je Seite:

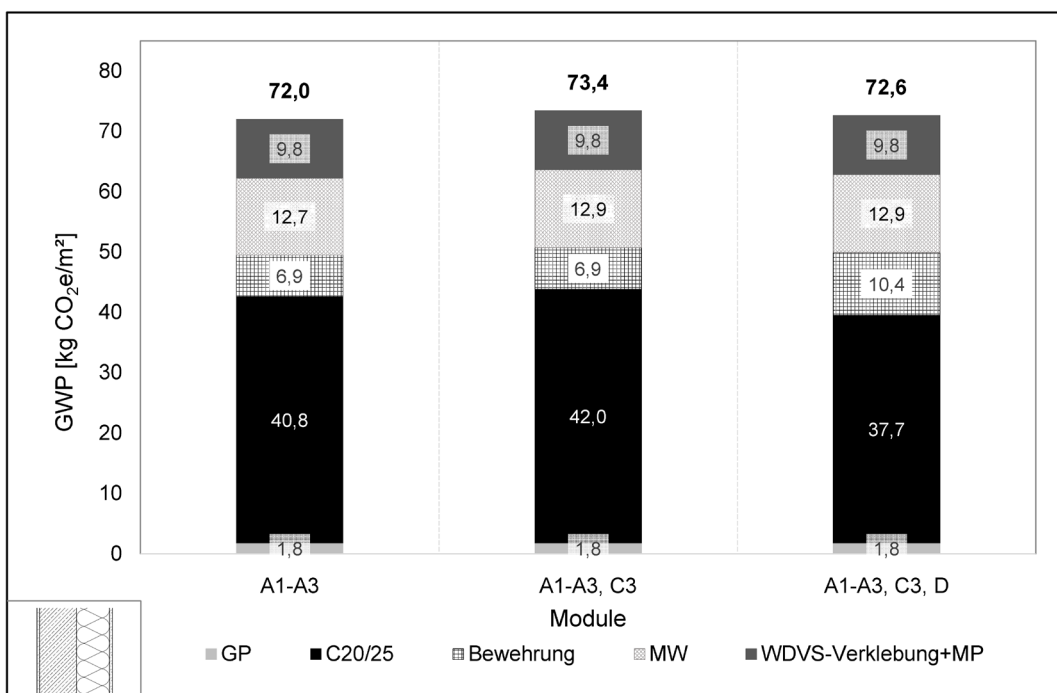
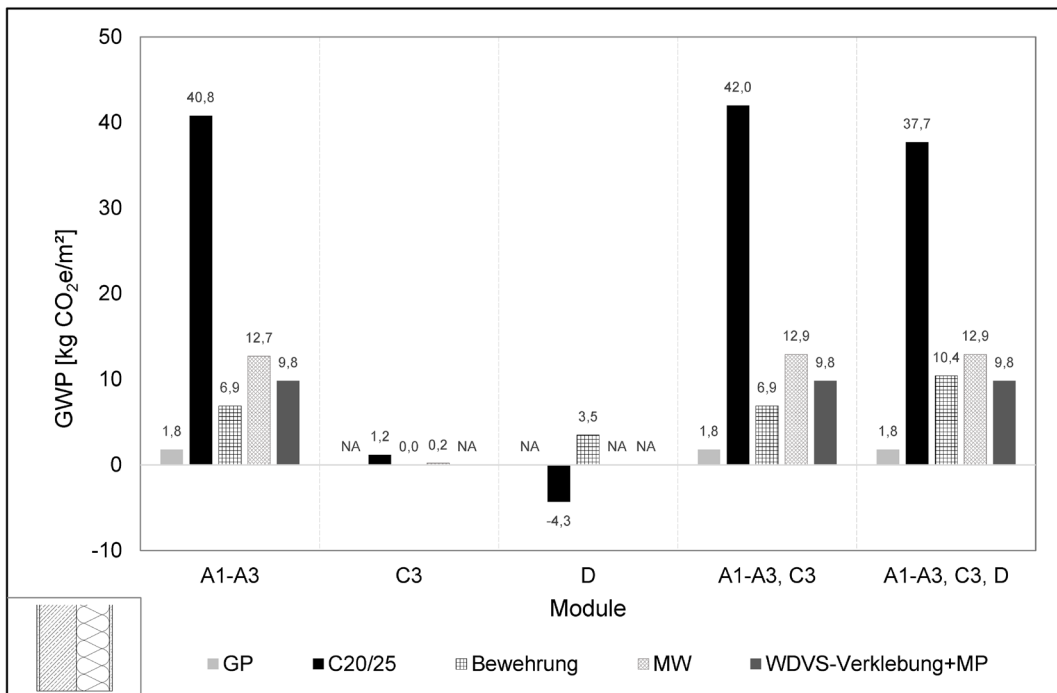
$$\text{längs } \text{Ø}8/15: a_{s,l} = 3,35 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$\text{quer } \text{Ø}8/25: a_{s,q} = 2,01 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Die gewählte Bewehrung erfüllt das Kriterium der Mindestbewehrung und ergibt sich dann je m² Wandfläche zu

$$a_{s,\text{vorh}} = 2 \cdot (3,35 + 2,01) = 10,72 \text{ cm}^2$$

GWP



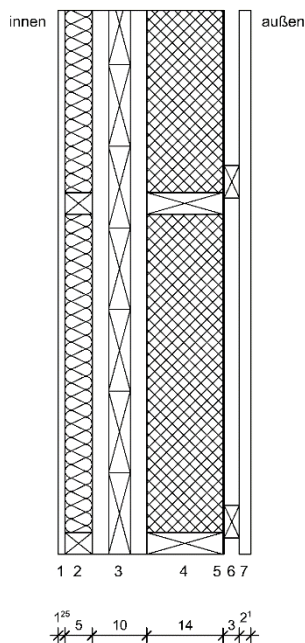
Das Modul C3 weist nur kleinere Korrekturen des GWP aus, auch aufgrund der aktuellen Datenlage (3 von 5 EPDs der hier betrachteten Baustoffe weisen keine Werte für C3 aus). Für Modul D ergeben sich sowohl Gutschriften für die Verwendung von Betonabbruch, als auch Belastungen (positive Werte). Ca. 50 % des GWP bei Betrachtung der Module A1-A3+C3+D ergibt sich aus dem Anteil des Betons (hier C20/25). Die anteilig notwendige Bewehrung ist seitens des GWP als getrennte Position ausgewiesen, muss aber natürlich für den Konstruktionswerkstoff Stahlbeton zusammen betrachtet werden. Zieht man beide Positionen zusammen, ergibt sich ein Anteil am gesamten GWP von ca. 2/3 aus Stahlbeton.

6.2.5 Brettsperrholz

Der Wandaufbau gliedert sich von innen nach außen über eine innenseitige Gipskartonplatte, Mineralwolle, die massive Brettsperrholzschrift, eine darauffolgende Rahmenständerkonstruktion zur Aufnahme der außenseitigen Dämmschicht (Holzfaserdämmung) und einer hinterlüfteten Holzschalung. Der Rahmenbereich in Schicht 4 alle 62,5 cm mit einer Rahmenbreite von 4 cm macht lediglich 6,4 % der Wandfläche aus, daher wird dieser hier nicht gesondert ausgewiesen.

Der tabellarische Nachweis erfolgt auf der nächsten Seite, wobei der Schubkorrekturbeiwert für das 3-lagige Brettsperrholz in Anlehnung an [93] verwendet wird. Zu beachten ist das abweichend verwendete Deckeneigengewicht (s. Kap. 6.1.1).

Wandaufbau



| Schicht | | EPD | t [cm] | ρ [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$] | ME [je m ²] | λ [$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$] |
|---------|------------------------|------|-----------|--|----------------------------|---|
| 1 | Gipskartonplatte (GKB) | [60] | 1,25 | 800 | 1 m ² | 0,250 |
| 2 | Mineralwolle (MW) | [55] | 5,00 | 20 | 0,05 m ³ | 0,035 |
| 3 | Brettsperrholz (BSP) | [53] | 10,00 | 500 | 0,10 m ³ | 0,130 |
| 4 | Holzfaserdämmung (HDP) | [54] | 14,00 | 160 | 0,14 m ³ | 0,040 |
| 5 | Dampfbremse (PE) | [62] | 0,02 | - | 1 m ² | - |
| 6 | Luftschicht belüftet | - | 3,00 | - | - | - |
| 7 | Holzschalung (HS) | [61] | 2,10 | 600 | 0,021 m | - |

Nachweis

| Eingangswerte C24 | |
|-------------------|----------------------------|
| Wichte | 5,0 [kN/m ³] |
| $f_{c,0,k}$ | 21,0 [N/mm ²] |
| $f_{c,0,d}$ | 12,9 [N/mm ²] |
| $E_{0,mean}$ | 11000 [N/mm ²] |
| $E_{0,05}$ | 9167 [N/mm ²] |
| $G_{0,mean}$ | 690 [N/mm ²] |
| $G_{0,05}$ | 575 [N/mm ²] |
| $G_{R,mean}$ | 50 [N/mm ²] |
| $G_{R,0,05}$ | 41,7 [N/mm ²] |

| Beiwerte | |
|---------------------|--------------------------|
| γ_m | 1,3 [-] |
| k_{mod} | 0,8 [-] |
| β_c | 0,1 [-] |
| κ (3 Lagen) | 0,196 [-] |
| Anzahl Geschosse | 4 [-] |
| $g_{k,1,Holzdecke}$ | 1,5 [kN/m ²] |
| $\rho_{Ed,Decken}$ | 105 [kN/m] |

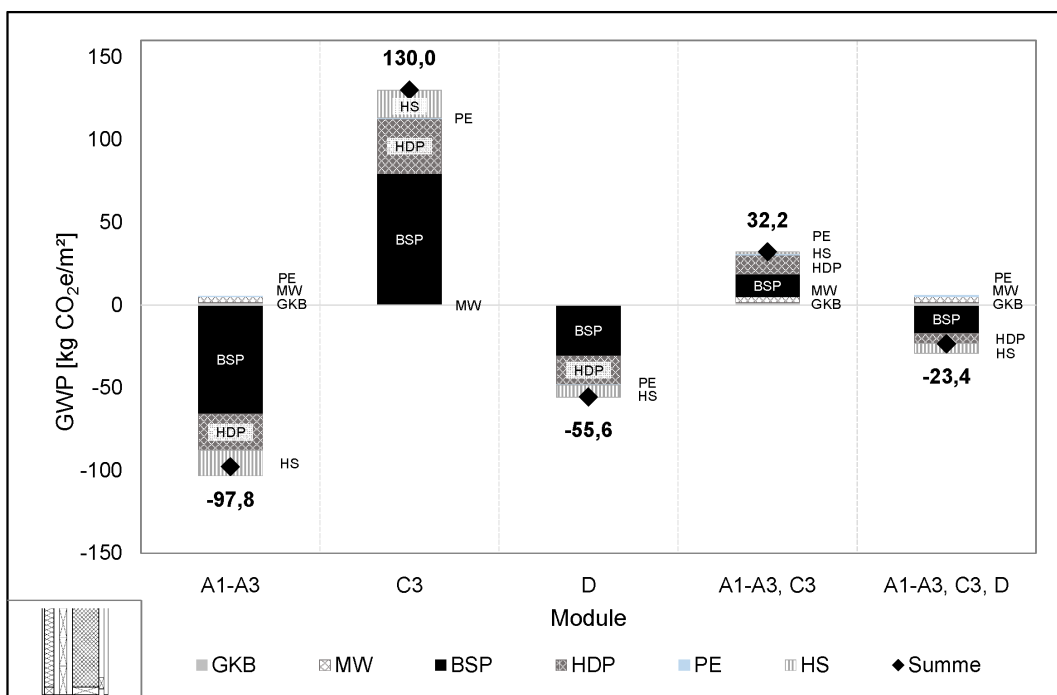
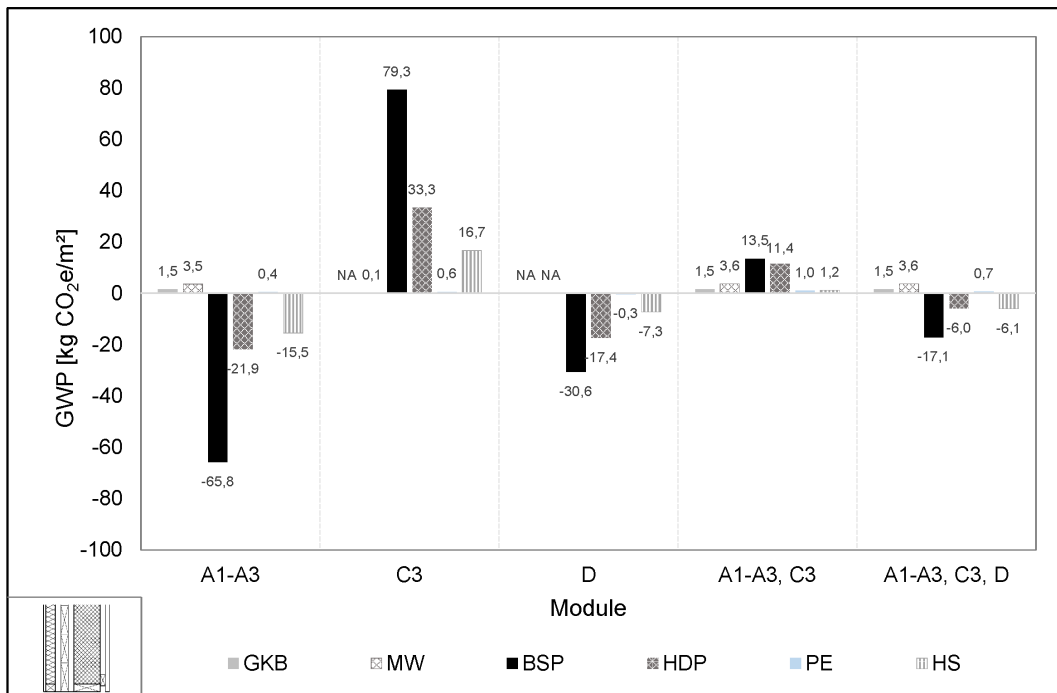
| BSP100 3s | |
|-------------------|--------------|
| t_1 | 30 [mm] |
| t_2 | 40 [mm] |
| t_3 | 30 [mm] |
| $g_{Ek,Wand,ges}$ | 5,500 [kN/m] |

| Schwellenpressung | |
|-------------------|---------------------------|
| $f_{c,90,k}$ | 2,5 [N/mm ²] |
| $f_{c,90,d}$ | 1,5 [N/mm ²] |
| $A_{90,ef}$ | 1000,0 [cm ²] |
| η | 0,733 <1,0 |

| Querschnittswerte | |
|-------------------|---------------------------|
| $A_{0,net}$ | 600,0 [cm ²] |
| GA | 43400,0 [kN] |
| $GA_{0,05}$ | 36166,7 [kN] |
| $GA_{0,05,s}$ | 7088,7 [kN] |
| $I_{0,net}$ | 7800,0 [cm ⁴] |
| $W_{0,net}$ | 1560,0 [cm ³] |
| $i_{y,net}$ | 3,6 [cm] |
| EI_{net} | 858,0 [kNm ²] |
| $EI_{0,05,net}$ | 715,0 [kNm ²] |

| Nachweisführung | |
|-----------------|------------|
| k_{cs} | 1,064 [-] |
| λ | 81,1 [-] |
| λ_{rel} | 1,236 [-] |
| k | 1,311 [-] |
| k_c | 0,572 [-] |
| η | 0,254 <1,0 |

GWP



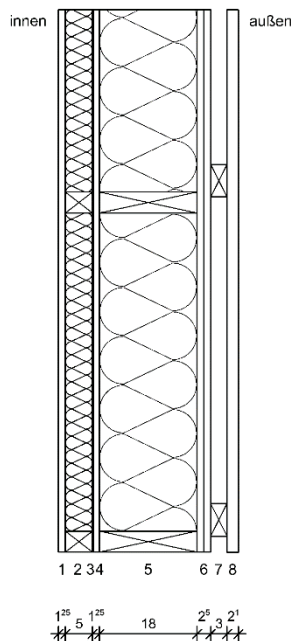
Für die Module A1-A3 resultieren aus der Gipskartonplatte (GKB), der innenseitigen Mineralwolle (MW) und der Dampfbremse (PE) positive und aus der Brettsperrholzschicht (BSP), der Holzfaserdämmung (HDP) und der Holzschalung (HS) negative GWP-Werte. In Summe ergibt sich für die Module A1-A3 ein negativer GWP-Wert, der sich maßgeblich durch den im Holz eingelagerten Kohlenstoff ergibt. Für biogene Werkstoffe ist jedoch stets Modul C3 (Freisetzen des gebundenen Kohlenstoffs) zu berücksichtigen, wodurch eine deutliche Korrektur in den positiven Bereich stattfindet. Modul D wiederum erfasst die potenzielle Gutschrift einer energetischen Verwertung der Holzwerkstoffe.

6.2.6 Holzständer

Der Wandaufbau gliedert sich von innen nach außen über eine Beplankung mit Gipskartonplatten, einer dünnen Mineralwollschicht, einer Dampfsperre, die Holzständer mit beidseitiger Beplankung in der Ebene der 18 cm dicken Mineralwolldämmung sowie einer hinterlüfteten Holzschalung. Der Rahmenbereich alle 62,5 cm mit einer Rahmenbreite von 6 cm macht lediglich 9,6 % der Wandfläche aus, daher wird dieser hier nicht gesondert ausgewiesen.

Für den Nachweis wird davon ausgegangen, dass die Beplankung das System ausreichend aussteift und die einzelnen Ständer als nicht knickgefährdet eingestuft werden können. Zu beachten ist das abweichend verwendete Deckeneigengewicht (s. Kap. 6.1.1).

Wandaufbau



| Schicht | | EPD | t [cm] | ρ [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$] | ME [je m ²] | λ [$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$] |
|---------|------------------------|------|-----------|--|----------------------------|---|
| 1 | Gipskartonplatte (GKB) | [60] | 1,25 | 800 | 1 m ² | 0,250 |
| 2 | Mineralwolle (MW) | [55] | 5,00 | 20 | 0,050 m ³ | 0,040 |
| 3 | Dampfbremse (PE) | [62] | 0,05 | - | 1 m ² | - |
| 4 | Gipskartonplatte (GKB) | [60] | 1,25 | 800 | 1 m ² | 0,250 |
| 5 | Mineralwolle (MW) | [55] | 18,00 | 20 | 0,180 m ³ | 0,035 |
| 6 | Gipskartonplatte (GKB) | [60] | 2·1,25 | 800 | 2·1 m ² | 0,250 |
| 7 | Luftschicht belüftet | - | 3,00 | - | - | - |
| 8 | Holzschalung (HS) | [61] | 2,10 | 600 | 0,021 m | - |

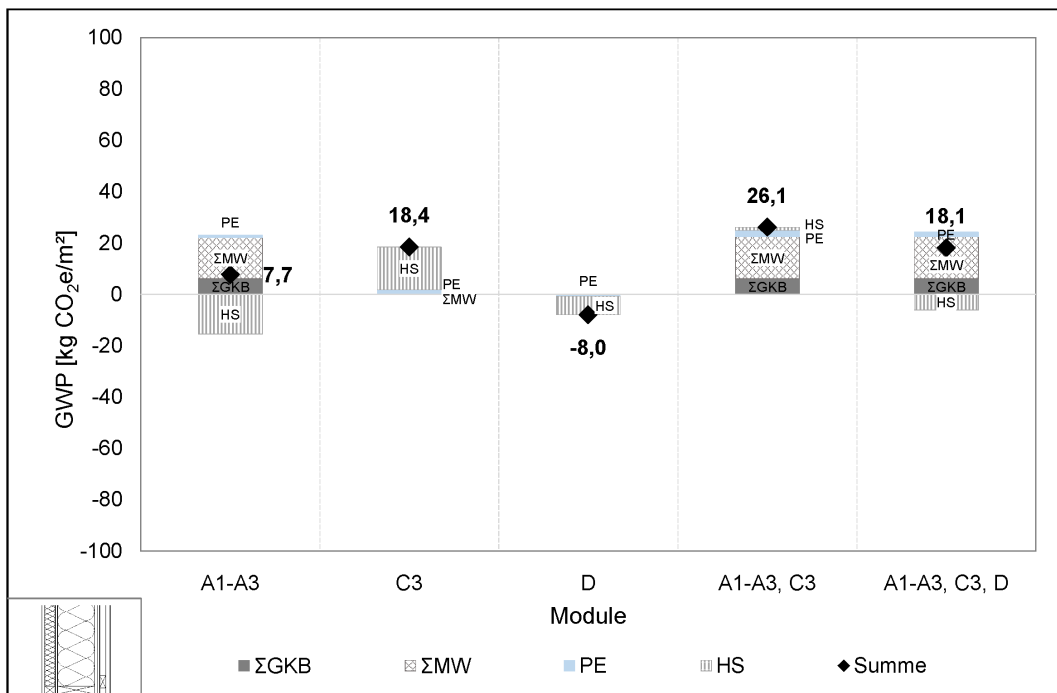
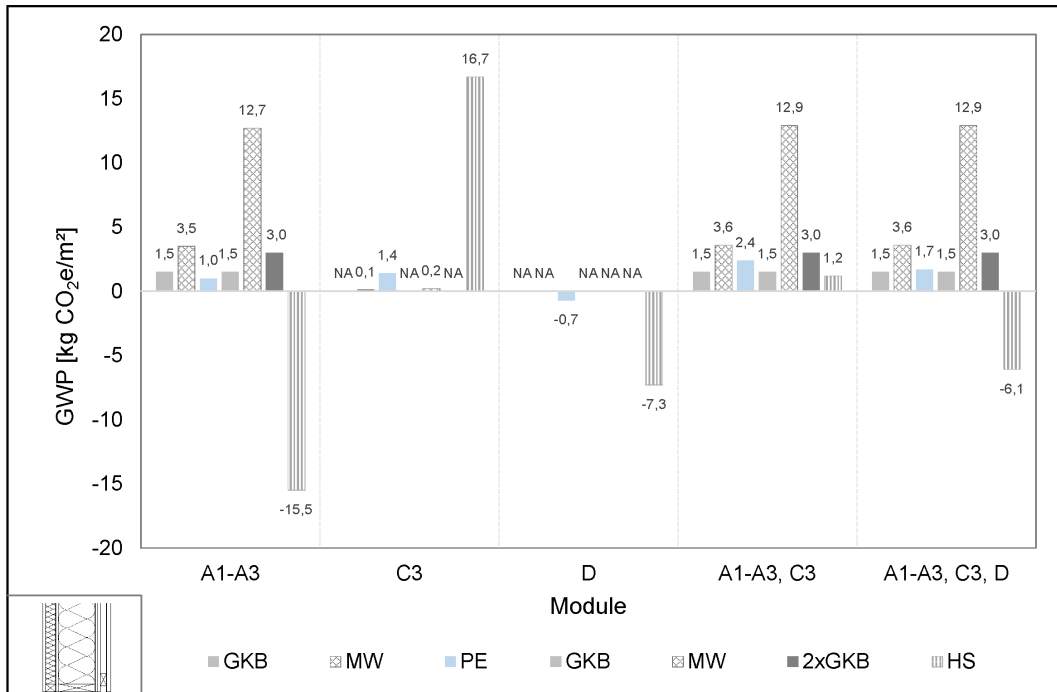
Nachweis

Die Belastung wird vereinfacht aus der Bemessung der Brettsperrholzwand (s. Kap 6.2.5) übernommen, wodurch die Last je Ständer wie folgt resultiert:

$$N_{Ed} = (105 + 1,35 \cdot 5,5) \cdot \frac{62,5}{100} = 70,27 \text{ kN}$$

| | |
|--------------------------------|-------------------------|
| C24 Nadelholz | |
| Zentrische Druckkraft N_{Ed} | 70,27 kN |
| h | 18 cm |
| b | 6 cm |
| A | 108 cm ² |
| σ_{Ed} | 6,51 N/mm ² |
| Holzgüte | C24 |
| $f_{c,0,k}$ | 21 N/mm ² |
| γ_M | 1,3 - |
| k_{mod} | 0,8 - |
| $f_{c,0,d}$ | 12,92 N/mm ² |
| η | 0,50 - |

GWP



Für die Module A1-A3 resultiert aus der Holzschalung (HS) ein negativer GWP-Wert, alle anderen Bauteilkomponenten haben positive GWP-Werte inne, sodass sich insgesamt für die Module A1-A3 ein positiver GWP-Wert ergibt. Für biogene Werkstoffe wie die HS ist jedoch stets Modul C3 (Freisetzen des gebundenen Kohlenstoffs) zu berücksichtigen, woraus ein höherer positiver GWP-Wert folgt. Modul D wiederum erfasst die potenzielle Gutschrift einer energetischen Verwertung der HS bzw. das Recyclingpotenzial der PE-Folie.

6.3 Fazit

Abb. 10 stellt das GWP aller Wandsysteme (s. Kap. 6.1 & 6.2) vergleichend einander gegenüber.

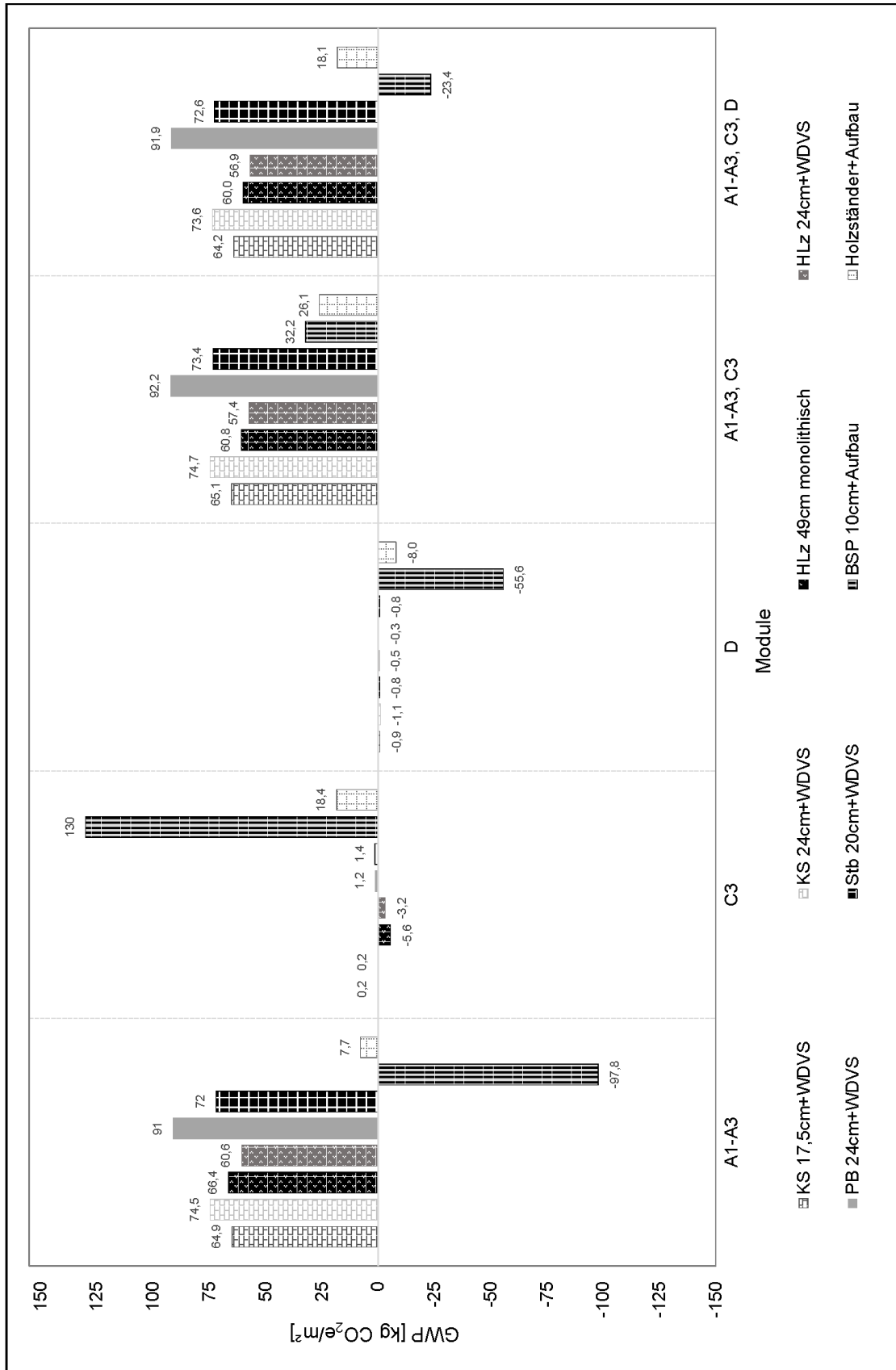


Abb. 10: Gegenüberstellung aller betrachteten Wandsysteme (s. Kap. 6.1 & 6.2)

Wie bereits in den jeweiligen Abschnitten in Kap. 5.2 beschrieben, zeigen sich für die mineralisch basierten Wandsysteme durchweg positive GWP-Werte. Diese ergeben sich aus den Modulen A1-A3 mit leichten Korrekturen aus den Modulen C3 und D (auch aufgrund der aktuellen Datenlage und den teilweise nicht hinterlegten Werten für einige der verwendeten Materialien in den Wandaufbauten). Positiv fallen die beiden Hochlochziegel Wandaufbauten auf. Das sehr ähnliche Ergebnis lässt sich durch weitere Betrachtungen, wie Einfachheit der Konstruktion, vertiefend diskutieren. Negativ fällt die Beurteilung bzgl. des Wandaufbaus mit Porenbeton (s. Kap. 6.2.3) in der Gesamtbetrachtung aus. Betrachtet man zusätzliche Themen wie Langlebigkeit und Dauerhaftigkeit der Konstruktion sollte insbesondere das hier verwendete WDVS kritisch hinterfragt werden, auch wenn Erfahrungen von über 50 Jahren mit WDVS vorliegen [90]. Zusätzlich lassen sich Themen wie, sortenreine Trennbarkeit, Abfallaufkommen und Recyclingpotenzial diskutieren.

Die betrachtete Massivholzwandkonstruktion (s. Kap. 6.2.5) zeigt über alle betrachteten Module A1-A3, C3, D ein negatives GWP. Die Holzständerkonstruktion (s. Kap. 6.2.6) schneidet bei Betrachtung der Module A1-A3, C3 am besten ab, weist in Modul aber geringere Gutschriften im Vergleich zur Massivholzwand auf. Beide Wandaufbauten verzichten auf jegliche Verklebungen und sind somit sortenrein trennbar. Auch lässt sich diskutieren, inwiefern das für biogene Werkstoffe derzeit obligatorische Modul C3 (Freisetzen des gebundenen Kohlenstoffs) zu berücksichtigen ist, wenn das Holzelement einer Wiederverwendung bzw. Nachnutzung zugeführt wird. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass der Ansatz von Gutschriften in Modul D mit Bedacht erfolgen sollte. Für das End-of-Life-Szenario sind stets Unwägbarkeiten möglich (u.a. Szenariowechsel, Änderung der Gutschriftgrundlagen wie z.B. Änderung des Strommix, welcher Basis für die Quantifizierung der Gutschriften von Holzwerkstoffen ist), welche die GWP-Bewertung von Modul D beeinflussen und in der Planungsphase nur schwierig abzusehen sind.

7 Literaturverzeichnis

Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 15804:2022-03 (2022) *Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [2] United Nations Environment Programme (2022) *2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*.
- [3] Statistisches Bundesamt (2021) *Abfallaufkommen (einschließlich gefährlicher Abfälle)* [online]. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallbilanz-pdf-5321001.html> [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [4] Destatis (2017) *Umweltnutzung und Wirtschaft: Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen – Teil 4: Rohstoffe, Wassereinsatz, Abwasser, Abfall, Umweltschutzmaßnahmen*.
- [5] Bundestag (2019) *Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG)*.
- [6] Forster, P. et al. (2007) *Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing* in: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the IPCC Fourth Assessment Report*. Cambridge University Press.
- [7] DIN EN 14025:2011-10 (2011) *Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Typ III Umweltdeklarationen - Grundsätze und Verfahren*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [8] Thornton Tomasetti (2019) *Where is the embodied carbon* [online]. <https://www.thorntontomasetti.com/capability/embodied-carbon> [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [9] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen *ÖKOBAUDAT – Informationsportal nachhaltiges Bauen* [online]. <https://www.oekobaudat.de/> [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [10] IBU - Institut Bauen und Umwelt e.V. *EPD Datenbank* [online]. <https://ibu-epd.com/> [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [11] Institut zur Prüfung und Zertifizierung von Bauprodukten, Sicherheitstechnik und Schutzausrüstung (ift) Rosenheim (2022) *EPD Datenbank* [online]. <https://www.ift-rosenheim.de/erstellte-epds> [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [12] InformationsZentrum Beton GmbH *Umweltproduktdeklarationen* [online]. <https://www.beton.org/wissen/nachhaltigkeit/umweltproduktdeklarationen> [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [13] EPD International AB *EPD Library* [online]. <https://www.environdec.com/library> [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [14] Gibbons, O. P.; Orr, J. J. (2022) *How to calculate embodied carbon*. 2. Aufl. London: The Institution of Structural Engineers.
- [15] Bundesinstitut für Bau-, Stadt und Raumforschung *eLCA (browserbasierte Software)* [online]. <https://www.bauteileditor.de/> [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [16] Sphera Solutions GmbH *GaBi Databases* [online]. <https://sphera.com/product-sustainability-gabi-data-search/> [Zugriff am: 27. Feb. 2023].

- [17]ecoinvent *ecoinvent Database* [online]. <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/> [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [18] *Building Life Cycle Assessment software* [Software]. <https://www.oneclicklca.com/> [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [19] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung *Ökobilanzdaten gemäß EN 15804+A2* [online]. <https://www.oekobaudat.de/service/artikel/oekobilanzdaten-gemaess-en-15804-a2.html> [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [20] Figl, H. (2019) *ÖKOBAUDAT – Grundlage für die Gebäudeökobilanzierung*. 2. Aufl. Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR).
- [21] Thünen-Institut für Holzforschung (2020) *Brettschichtholz - Standardformen (Durchschnitt DE) – Repräsentativ für Deutschland* [online]. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=a432f3fd-de60-4a11-9acb-b9a21731bacf&version=00.00.022&stock=OBD_2021_II&lang=de [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [22] DIN CEN/TR 15941:2010 (2010) *Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Methoden für Auswahl und Verwendung von generischen Daten*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [23] Binderholz GmbH (2019) *EPD-BBS-20190164-IBA1-DE – binderholz Brettschichtholz BSH* [online]. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=d3dbba95-2921-4fa5-9b20-32f37c6c0793&version=00.04.000&stock=OBD_2021_II&lang=de [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [24] Gantner, J. (2018) *Projektbericht: Einfluss von EPDs im DGNB System am Beispiel eines Bürogebäudes in Massivbauweise*.
- [25] London Energy Transformation Initiative (2020) *Embodied Carbon Primer*. <https://www.leti.london/ecp>.
- [26] Thünen-Institut für Holzforschung (2020) *EPD: Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE) – Repräsentativ für Deutschland* [online]. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=1a70d292-a82c-42a6-a378-d3cbd9a9af4e&version=00.00.027&stock=OBD_2021_II&lang=de [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [27] bauforumstahl e.V. (2018) *EPD: Baustähle: Offene Walzprofile und Grobbleche – Durchschnitt für BauforumStahl-Mitglieder* [online]. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=5cb2c568-76fe-4803-8b46-0084e79800c8&version=00.14.000&stock=OBD_2021_II&lang=de [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [28] InformationsZentrum Beton GmbH (2018) *EPD: Beton der Druckfestigkeitsklasse C 30/37 – Durchschnitt für Deutschland* [online]. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=b6096c9c-1248-4ce1-9c2d-f4a48aade80f&version=00.03.000&stock=OBD_2021_II&lang=de [Zugriff am: 27. Feb. 2023].

- [29] ArcelorMittal Europe (2022) *EPD-ARM-20210338-CBB1-EN - Reinforcing steel in Bars (Rebars) – Repräsentativ für Hersteller* [online]. <https://epd-online.com/PublishedEpd/Detail/14933>.
- [30] ArcelorMittal (2019) *EPD-ARM-20190015-CBD1-EN - Structural steel sections and merchant bars – Repräsentativ für Hersteller* [online]. <https://epd-online.com/PublishedEpd/Detail/10906>.
- [31] ArcelorMittal Europe (2021) *EPD-ARC-202101132-CBB1-EN - XCarb™ Recycled and renewably produced structural steel sections and merchant bars – Repräsentativ für Hersteller* [online]. <https://epd-online.com/PublishedEpd/Detail/14498>.
- [32] ArcelorMittal (2020) *EPD-ARC-20190180-CBD1-EN - Structural Hollow Section – Repräsentativ für Hersteller* [online]. <https://epd-online.com/PublishedEpd/Detail/12312>.
- [33] Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. [Hrsg.] (2022) *Beton-Kalender 2020 – Nachhaltigkeit, Digitalisierung, Instandhaltung*. Ernst & Sohn GmbH & Co. KG.
- [34] ArcelorMittal Europe (2021) *EPD-ARC-20210245-CBA1-EN - XCarb® Recycled and renewably produced Reinforcing steel in bars – Spezifisch (Werkstandort Polen)* [online]. <https://epd-online.com/PublishedEpd/Detail/14755>.
- [35] thinkstep (2017) *EPD: Bewehrungsstahl – generischer Datensatz (20% Sicherheitszuschlag)* [online]. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=e9ae96ee-ba8d-420d-9725-7c8abd06e082&version=20.19.120&stock=OBD_2021_II&lang=de [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [36] Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e. V. *Jahresbericht 2021 (BTB)*.
- [37] Haist, M.; Bergmeister, K.; Curbach, M. (2022) *Nachhaltig konstruieren und bauen mit Beton* in: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. [Hrsg.] *Beton-Kalender 2020: Nachhaltigkeit, Digitalisierung, Instandhaltung*. Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, S. 421–531.
- [38] Wiens, U. (2022) *Nachhaltig bauen mit Beton – Planungshilfe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb)* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 117, H. 1, S. 58–65. <https://doi.org/10.1002/best.202100097>
- [39] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2022) *EPD: Portlandzement (CEM I)* [online]. <https://epd-online.com/PublishedEpd/Detail/16002> [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [40] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2022) *EPD: Hochofenzement (CEM III/A)* [online]. <https://epd-online.com/PublishedEpd/Detail/16003> [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [41] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2020) *Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien*.
- [42] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2022) *EPD: Zement* [online]. <https://epd-online.com/PublishedEpd/Detail/15284> [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [43] Bosold, D.-I. D.; Grünwald, D.-I. A. (2020) *Risse im Beton – Zement-Merkblatt Betontechnik*.
- [44] Weisner, D.-I. (. A.; Richter, D.-I. T. (2020) *Massige Bauteile aus Beton – Zement-Merkblatt Betontechnik*.
- [45] Herget, C. et al. (2022) *Kalksteinmehl als Betonzusatzstoff - Vorschlag für die Anrechenbarkeit auf den Zementgehalt und Potenzial zur CO₂ - Reduktion im*

- Betonbau* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 117, H. 2, S. 109–118.
<https://doi.org/10.1002/best.202100073>
- [46] European Cement Research Academy (2017) *Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing – Trying to Look Ahead*.
- [47] InformationsZentrum Beton GmbH (2018) *EPD: Beton der Druckfestigkeitsklasse C 20/25 – Durchschnitt für Deutschland* [online].
https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=d9fd76f0-190d-437d-bb07-549963b32d65&version=00.03.000&stock=OBD_2021_II&lang=de
[Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [48] InformationsZentrum Beton GmbH (2018) *EPD: Beton der Druckfestigkeitsklasse C 45/55 – Durchschnitt für Deutschland* [online].
https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=a3662e98-9dc9-412f-9603-47f653f3db7f&version=00.04.000&stock=OBD_2021_II&lang=de
[Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [49] Hjulsbro Steel AB (2020) *EPD: S-P-02400 - PC-strand – Prestressed steel for reinforcement of concrete – spezifisch für Hersteller* [online].
<https://www.environdec.com/library/epd2400> [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [50] Xella Baustoffe GmbH (2019) *EPD: Kalksandstein – durchschnittlicher Datensatz* [online]. <https://epd-online.com/PublishedEpd/Detail/10895> [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [51] Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V. (2021) *EPD: Mauerziegel (ungefüllt) – Durchschnitt für Verbandsmitglieder* [online].
https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=08dd0308-eebf-4db1-82ee-b340d070c9b9&version=00.06.000&stock=OBD_2021_II&lang=de
[Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [52] thinkstep (2018) *EPD: Porenbeton P4 05 unbewehrt – generischer Datensatz (10% Sicherheitszuschlag)* [online].
https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=1a43ae76-2dc9-4a3a-9926-47e7137e773d&version=20.19.120&stock=OBD_2021_II&lang=de
[Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [53] Thünen-Institut für Holzforschung (2020) *EPD: Brettsperrholz (Durchschnitt DE) – Repräsentativ für Deutschland* [online].
https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=7f12b868-0c13-4a5d-bfe7-0f05734cca89&version=00.00.021&stock=OBD_2021_II&lang=de
[Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [54] Thünen-Institut für Holzforschung (2020) *EPD: Holzfaserdämmstoff Trockenverfahren (Durchschnitt DE) – Repräsentativ für Deutschland* [online].
https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=51a420d8-6366-4e14-83db-ecfe0721774d&version=00.00.050&stock=OBD_2021_II&lang=en
[Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [55] thinkstep (2018) *EPD: Mineralwolle (Fassaden-Dämmung) – generischer Datensatz (10% Sicherheitszuschlag)* [online].
https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=f8afef87-5de3-4996-838c-1f2af9ef81df&version=20.20.020&stock=OBD_2021_II&lang=de
[Zugriff am: 27. Feb. 2023].

- [56] FMI Fachverband Mineralwolleindustrie e.V. (2021) *EPD: Mineralwolle – Repräsentativ für Verbandsmitglieder* [online]. <https://epd-online.com/PublishedEpd/Detail/13320> [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [57] thinkstep (2018) *EPD: WDVS-Verklebung + mineralische Putzbeschichtung – generischer Datensatz (10% Sicherheitszuschlag)* [online]. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=e5cd5727-a516-4081-8fdf-4fc0ce142d90&version=20.20.020&stock=OBD_2021_II&lang=de [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [58] thinkstep (2018) *EPD: Gipsputz (Gips) – generischer Datensatz (10% Sicherheitszuschlag)* [online]. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=b7fb8ab4-e1e2-4a0b-a9c4-abd6cfa6c7f3&version=20.19.120&stock=OBD_2021_II&lang=de [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [59] thinkstep (2018) *EPD: Gipsputz (Gips-Kalk-Putz) – generischer Datensatz (10% Sicherheitszuschlag)* [online]. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=0b0d0210-c31d-4fc7-b11a-9cdf0a87ed6&version=20.19.120&stock=OBD_2021_II&lang=de [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [60] thinkstep (2018) *EPD: Gipskartonplatte (Feuerschutz)(Dicke 0,0125 m) – generischer Datensatz (10% Sicherheitszuschlag)* [online]. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=da72684f-471c-425b-817d-69f262323f04&version=20.20.010&stock=OBD_2021_II&lang=de [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [61] Thünen-Institut für Holzforschung (2020) *EPD: Nadelschnittholz - getrocknet (Durchschnitt DE) – Repräsentativ für Deutschland* [online]. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=07a5482a-fa4a-484d-8929-b6f6dfd6be3e&version=00.00.027&stock=OBD_2021_II&lang=de [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [62] thinkstep (2018) *EPD: Dampfbremse PE (Dicke 0,0002 m) – generischer Datensatz (10% Sicherheitszuschlag)* [online]. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=99792cbc-c5f4-4d2d-bc9e-3790509891a0&version=20.20.010&stock=OBD_2021_II&lang=de [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [63] thinkstep (2018) *EPD: Zementestrich – generischer Datensatz (10% Sicherheitszuschlag)* [online]. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=0973f221-2284-4892-ae3d-1b8c2986b6dd&version=20.19.120&stock=OBD_2021_II&lang=de [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [64] thinkstep (2018) *EPD: Splitt (getrocknet) – generischer Datensatz (10% Sicherheitszuschlag)* [online]. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=7502766c-df2f-4f8d-8d45-17bb6938eac8&version=20.19.120&stock=OBD_2021_II&lang=de [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [65] Rudolf Hensel GmbH (2019) *EPD: Brandschutzanstrich – spezifischer Datensatz* [online]. <https://epd-online.com/PublishedEpd/Detail/11143> [Zugriff am: 27. Feb. 2023].

- [66] Etex Building Performance International (2019) *EPD: Brandschutzverkleidung – spezifischer Datensatz* [online]. <https://epd-online.com/PublishedEpd/Detail/10989> [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [67] Arnold, W. et al. (2020) *Setting carbon targets – an introduction to the proposed SCORS rating scheme* [online]. *The Structural Engineer* (10). [https://www.istructe.org/journal/volumes/volume-98-\(2020\)/issue-10/setting-carbon-targets-an-introduction-to-scors/](https://www.istructe.org/journal/volumes/volume-98-(2020)/issue-10/setting-carbon-targets-an-introduction-to-scors/).
- [68] UN Environment and International Energy Agency (2017) *2017 Global Status Report: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector*.
- [69] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2015) *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) – Büro- und Verwaltungsgebäude*. V2015 BNB_BN 1.1.1.
- [70] Bundesinstitut für Bau-, Stadt und Raumforschung (2015) *Entwicklung einer Methodik zur Festlegung von Benchmarks für LCA und LCC im Rahmen der BNB-Systementwicklung – BNB-Referenzmodell*. 10.08.17.7-14.19.
- [71] DGNB GmbH (2018) *DGNB System – Kriterienkatalog Gebäude Neubau – ENV1.1 / Ökobilanz des Gebäudes*.
- [72] DGNB GmbH (2018) *DGNB System – Kriterienkatalog Gebäude Neubau*.
- [73] BMWSB (2023) *Neuregelungen und Übergangsregelung des QNG-Update 2023* [online]. <https://www.nachhaltigesbauen.de/austausch/beg/hinweise-zum-qng-update-2023/> [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [74] BMWSB (2023) *Anhangdokument 3.2.1.2 - LCA-Anforderungswert Nichtwohngebäude* [online]. <https://www.nachhaltigesbauen.de/austausch/beg/> [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [75] BMWSB (2023) *Siegelvarianten, registrierte Bewertungssysteme und akkreditierte Zertifizierungsstellen für das QNG* [online]. <https://www.nachhaltigesbauen.de/austausch/beg/siegelvarianten-bewertungssysteme/> [Zugriff am: 27. Feb. 2023].
- [76] Royal Institute of British Architects (2021) *RIBA 2030 Climate Challenge*. Version 2.
- [77] Royal Institution of Chartered Surveyors (2017) *Whole life carbon assessment for the built environment – RICS professional statement*.
- [78] SIA 2040:2017 (2017) *SIA-Effizienzpfad Energie*. SIA Zürich.
- [79] Ministère de la transition écologique (2022) *Décret numéro 2022-305*.
- [80] Ministère de la transition écologique (2022) *Guide RE 2020 - Réglementation environnementale – Éco-construire pour le confort de tous*.
- [81] Danish Energy Agency (2021) *Written evidence from the Danish Energy Agency*. SBE0015.
- [82] Ministry of the Interior and Housing (2021) *National Strategy for Sustainable Construction*.
- [83] Winter, S.; Hamm, P.; Richter, A. (2010) *Schwingungs- und Dämpfungsverhalten von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken – Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 15283*.
- [84] Deutsches Institut für Bautechnik (01.03.2021) *aBG-Z-19.51-2313 (Rudolf Hensel GmbH) – Ausführung der reaktiven Brandschutzbeschichtung "HENSOTHERM 421 KS" auf Stahlbauteilen*. <https://www.rudolf-hensel.de/produkte/hensotherm-421-ks-brandschutz-stahlzuglieder/>.

- [85] DIN EN 1996-3:2010-12 (2010) *Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 3: Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrte Mauerwerksbauten*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [86] DIN EN 1996-3/NA:2019-12 (2019) *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 3: Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrte Mauerwerksbauten*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [87] DIN EN 1992-1-1:2011-01 (2011) *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [88] DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04 (2013) *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: Beuth Verlag GmbH.
- [89] DIN EN 1995-1-1:2010-12 (2010) *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [90] DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08 (2013) *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [91] ÖNORM B 1995-1-1:2019-06 (2019) *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [92] Asam, C. (2017) *Dämmmaßnahmen an Gebäudefassaden – Eine Zusammenfassung derzeit aktueller Diskussionspunkte*. Bonn: Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR).
- [93] Wallner-Novak, M. et al. (2018) *Brettsperrholz Bemessung Band II – Informationen für die Berechnung und konstruktive Gestaltung von Holztragwerken*. Wien: ProHolz Austria.
- [94] Deutsches Institut für Bautechnik (11.09.2019) *ETA-11/0189 (W. u. J. Derix GmbH & Co.) – Massives plattenförmiges Holzbauelement zur Verwendung als tragendes Bauteil in Bauwerken*.

8 Anhang

8.1 Deckensysteme

8.1.1 Stahlbetonflachdecke

Randbedingungen:

- Geometrie:
 - Decke Stahlbeton $h = 26 \text{ cm}$
 - Randbalken Stahlbeton $h/b = 50/73,5 \text{ cm}$
 - Unterzüge im Bereich des Kerns $h/b = 25/50 \text{ cm}$
- Material: Betongüte C30/37 sowie Bewehrung
- Betondeckung $c_{\text{nom}} = 2,5 \text{ cm}$
- Berechnung: Modellierung in InfoGraph
 - Belastungsbeginn nach 28 t
 - $T_{\infty} = 30.000 \text{ d}$
 - Schachbrettartige Anordnung der Nutzlasten
 - An Deckenrand (Achse 6) Einspannung modelliert um Durchlaufwirkung abzubilden
 - Auflager (Stützen) in z-Richtung fest, sonst frei
 - Wände in starke Richtung (lokal x) und z-Richtung fest

Bemessung:

- Maßgebender Nachweis: Durchstanzen und Verformung zum Zeitpunkt $t = \infty$
- Nichtlineare Berechnung zur Verformungsüberprüfung ($u_{\text{max}} = 27 \text{ mm}$)
- Genauere Betrachtung der Schwingungen nicht erforderlich ($f_{1,\text{starr}} = 8,2 \text{ Hz}$)
- Bewehrungswahl gemäß Schnittgrößen nach Zustand I
 - Grundbewehrung $\text{Ø}10/12$
 - In Durchstanzbereichen z.T. Grundbewehrung ausgespart
 - Verwendung von Dübelleisten
 - Zulagebewehrung grundsätzlich $\text{Ø}8$ mit variierenden Abständen

Mengenermittlung:

Decke

| | | |
|--|---------------|--|
| Bewehrung gesamt (Pos. 1-25, 48-49, Dübelleisten) | 20,617 | t |
| Bewehrung je m²_{NGF} | 0,0262 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrungsvolumen je m ² _{NGF} | 0,0033 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Bruttovolumen Betonplatte | 204,2 | m ³ |
| Bruttovolumen Beton-UZ am Kern in Achse B/C | 0,504 | m ³ |
| Bruttovolumen Beton je m ² _{NGF} | 0,2606 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Nettovolumen Beton je m²_{NGF} | 0,2573 | m³/m²_{NGF} |

Beispielhafte Berechnung des GWP des Betonanteils der Decke für A1-A3:

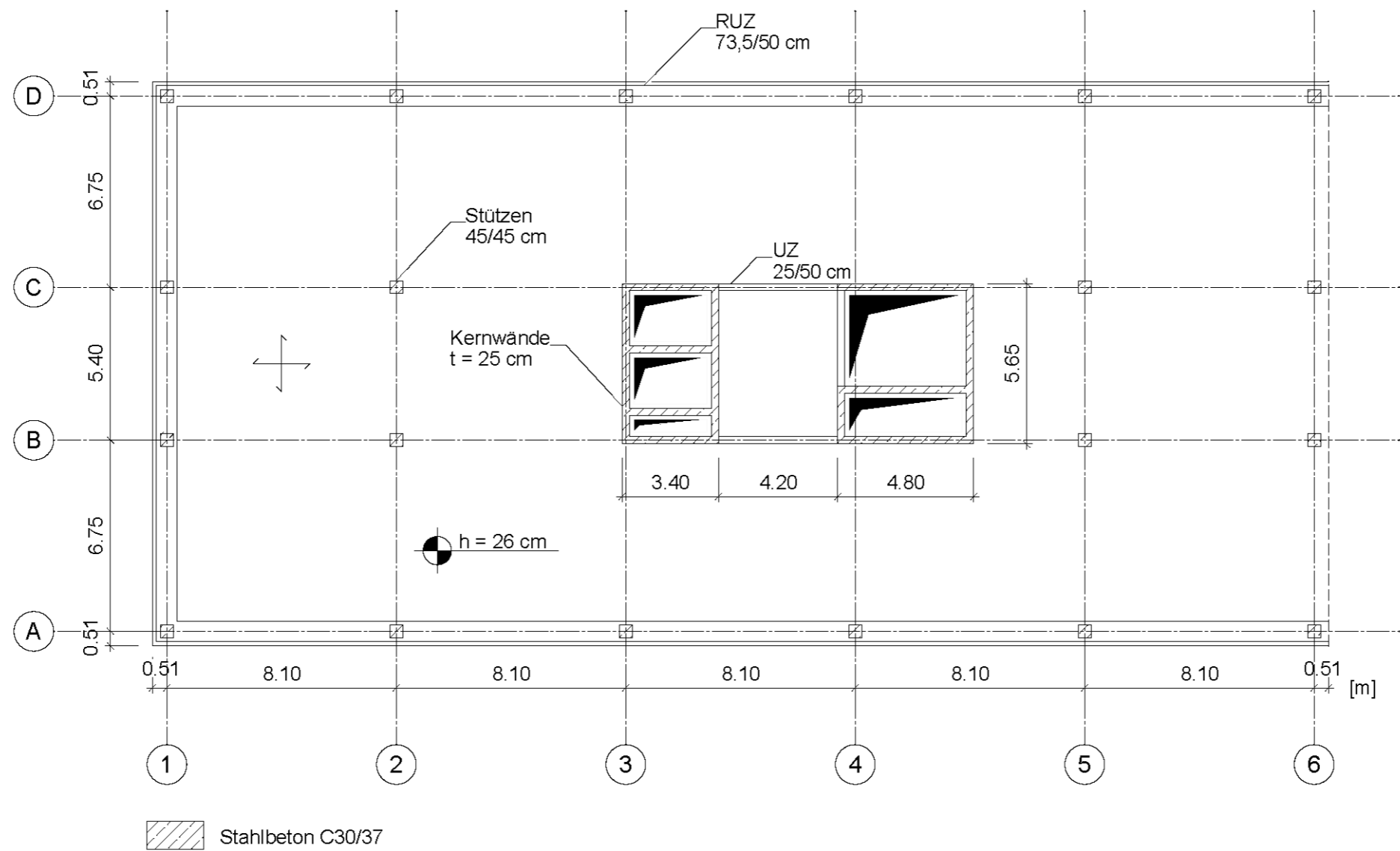
$$\text{GWP [kg CO}_2\text{e]} = \text{GWP}_i \left[\frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{m}^3} \right] \cdot \text{ME}[\text{m}^3]$$

$$\text{GWP} = 252 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{m}^3} \cdot 0,2573 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2} = 64,8 \frac{\text{kg CO}_2\text{e}}{\text{m}^2}$$

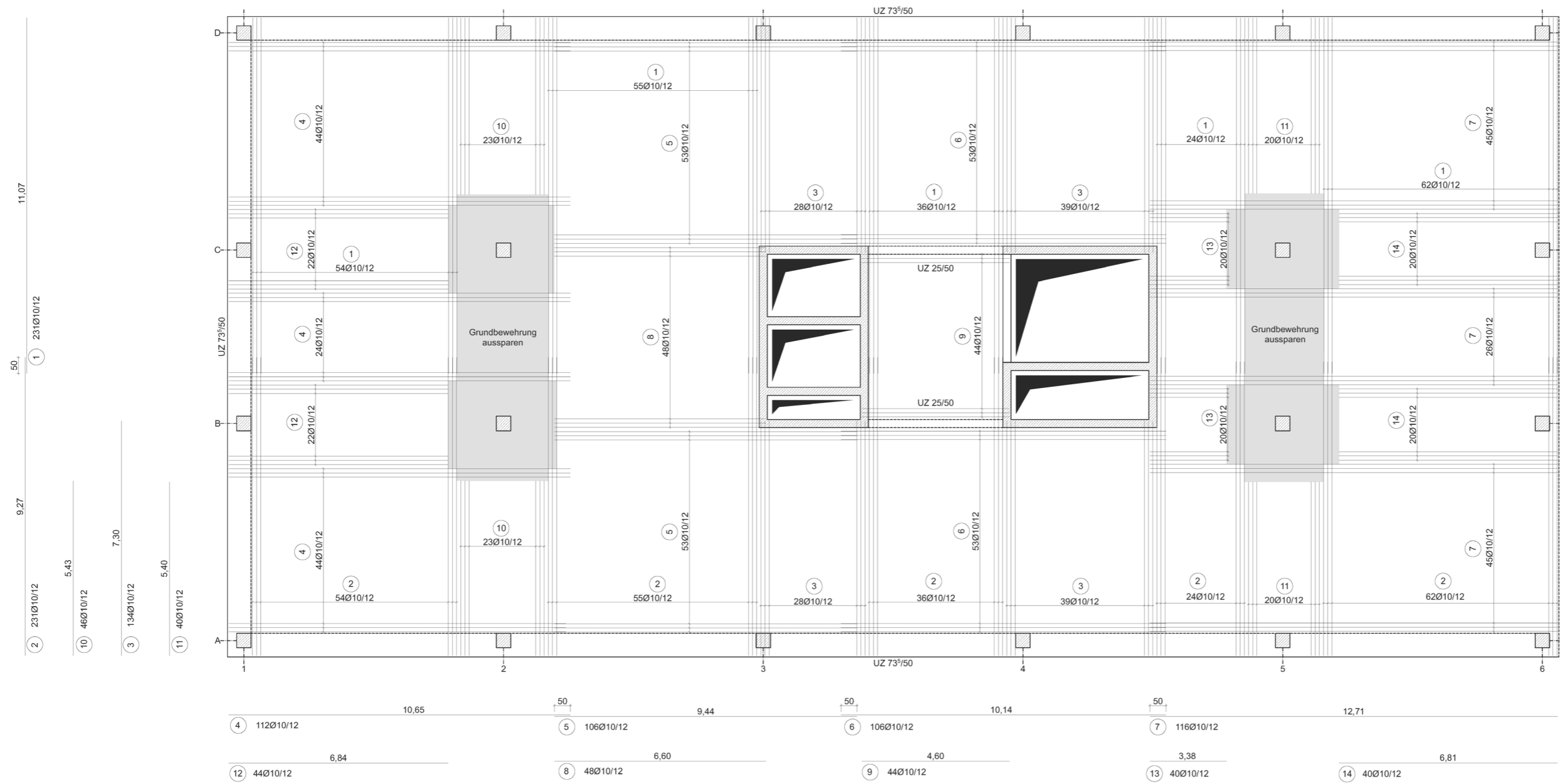
mit GWP_i entsprechend [28]

Randunterzug

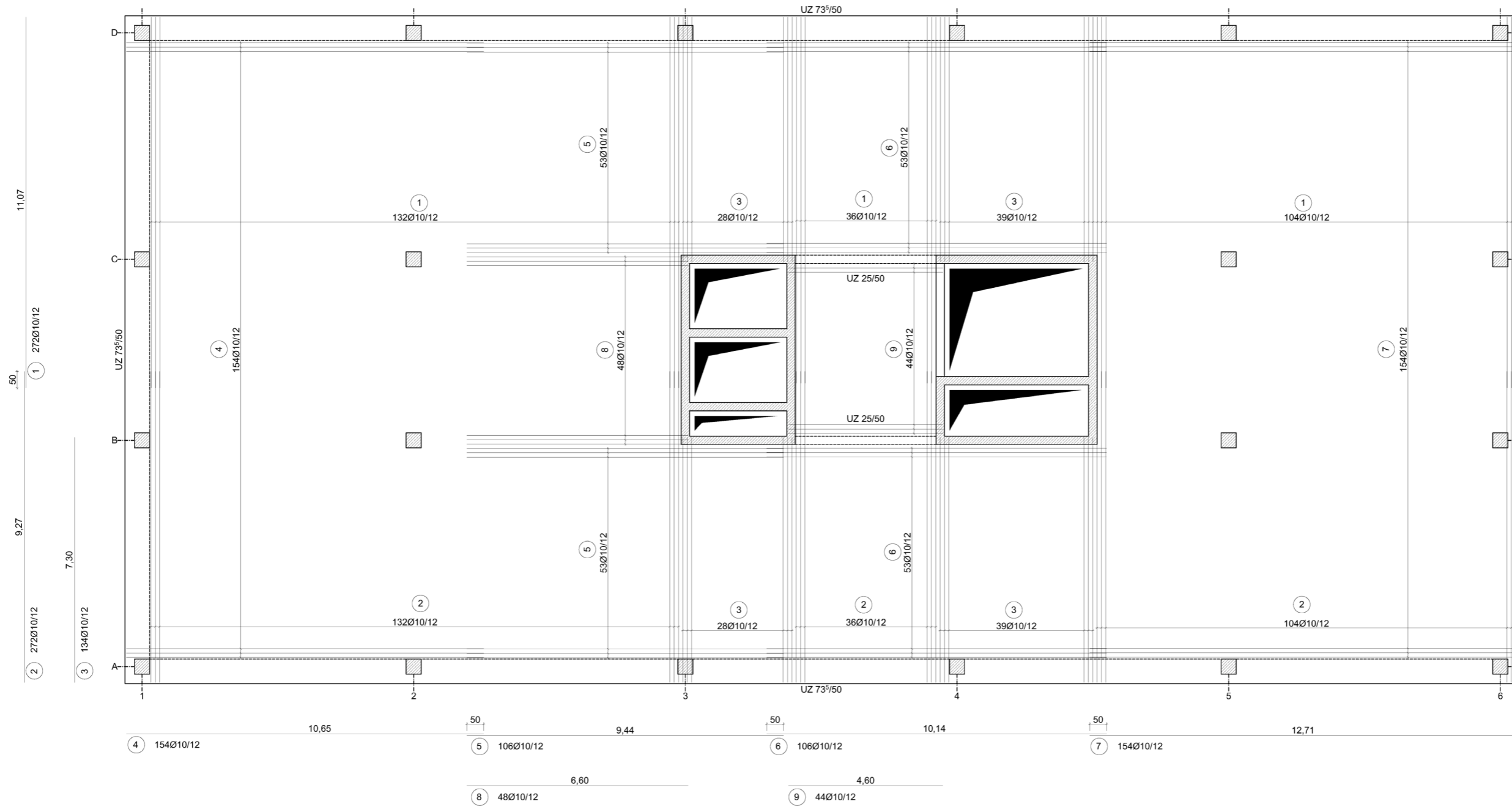
| | | |
|---|---------------|--|
| Bewehrung gesamt (Pos. 26-47) | 3,071 | t |
| Bewehrung je m²_{NGF} | 0,0039 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrungsvolumen je m ² _{NGF} | 0,0005 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Bruttovolumen Randunterzug (exkl. Betonplatte, Länge = 99,9 m) | 17,6 | m ³ |
| Bruttovolumen Beton je m ² _{NGF} | 0,0224 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Nettovolumen Beton je m²_{NGF} | 0,0219 | m³/m²_{NGF} |



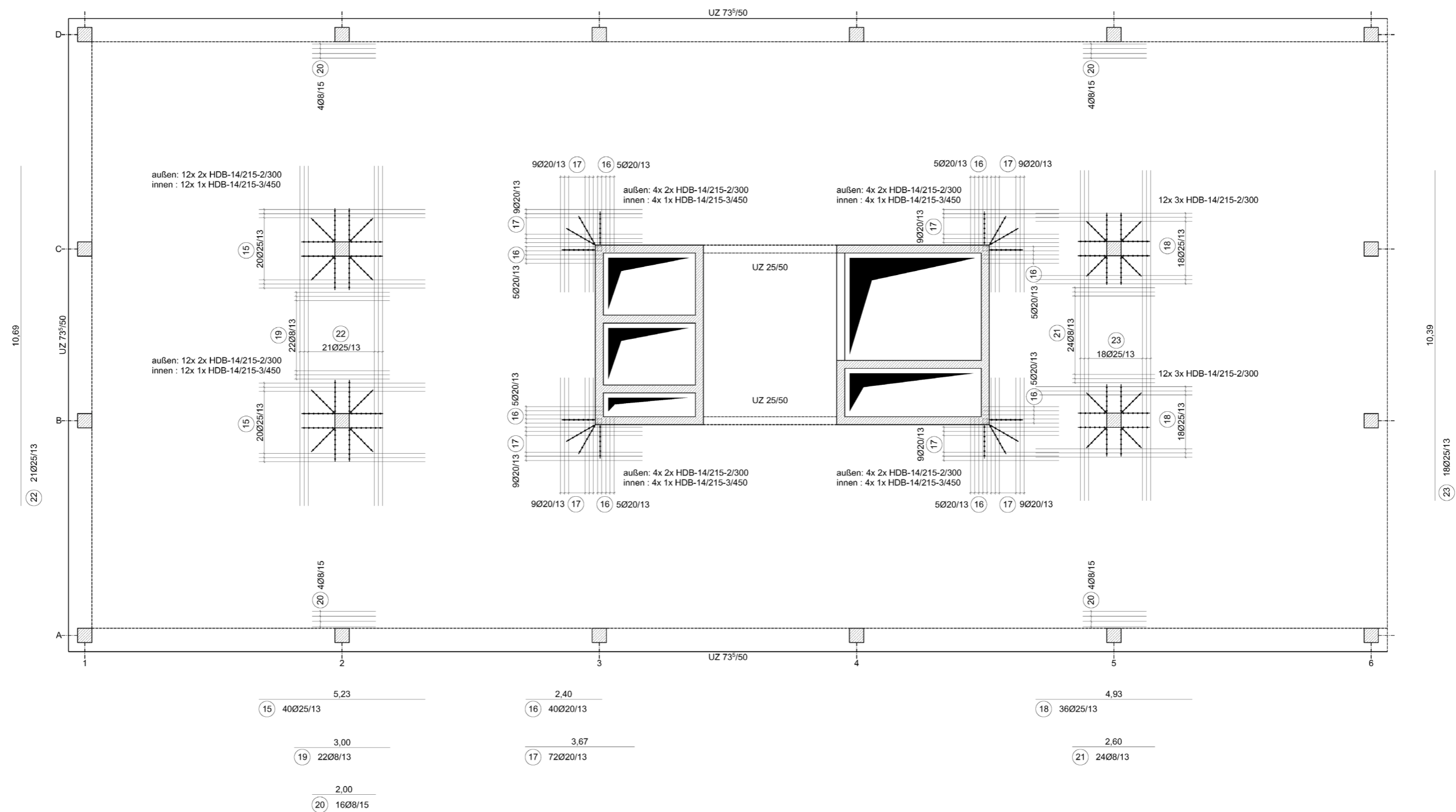
OBERE BEWEHRUNGSLAGE



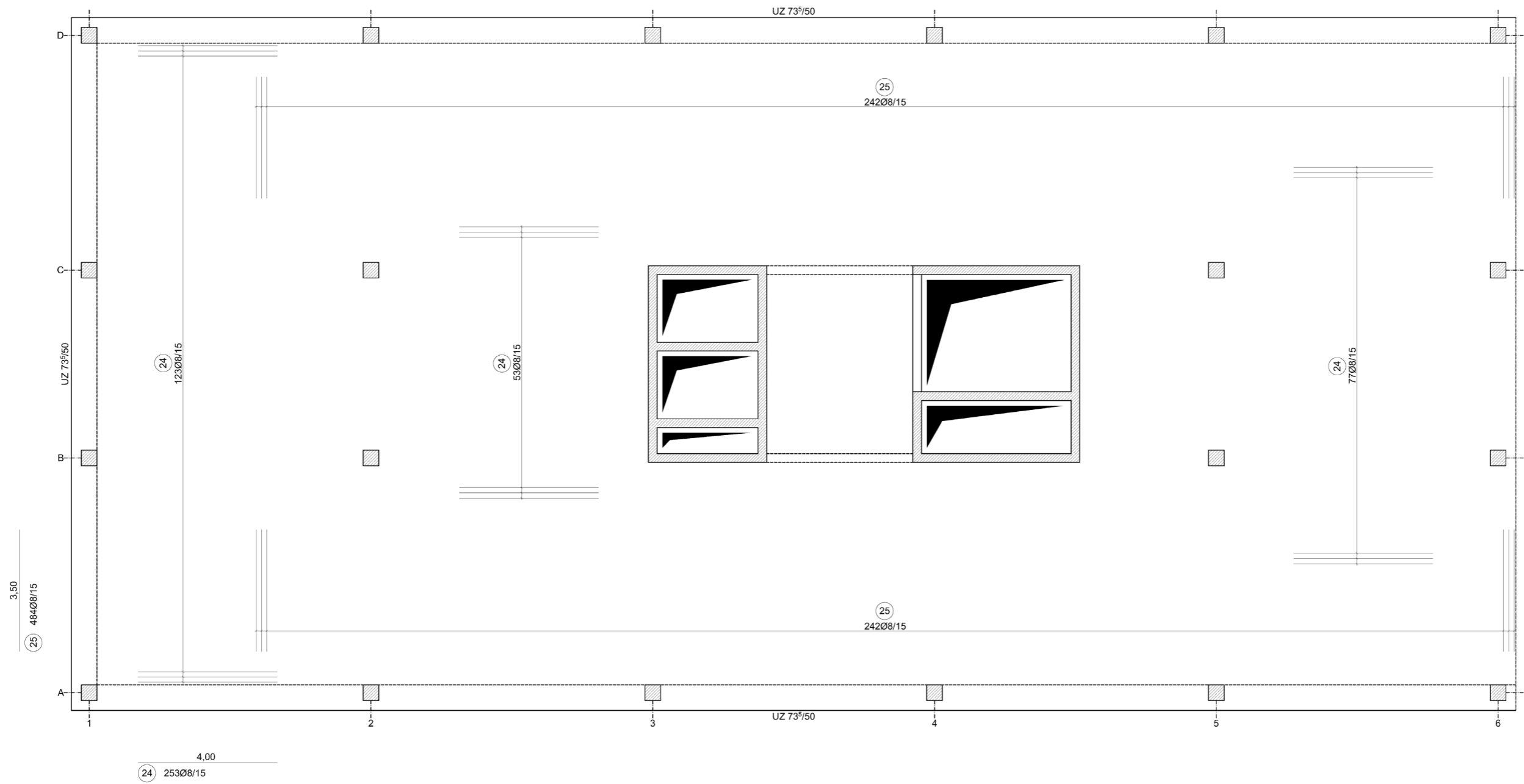
UNTERE BEWEHRUNGSLAGE



OBERE ZULAGEBEWEHRUNG

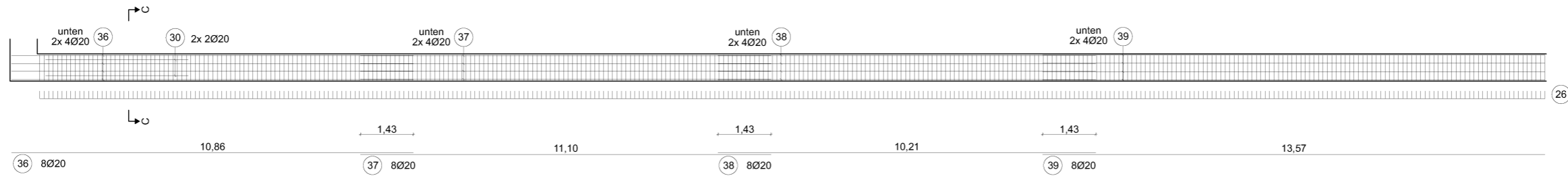


UNTERE ZULAGEBEWEHRUNG

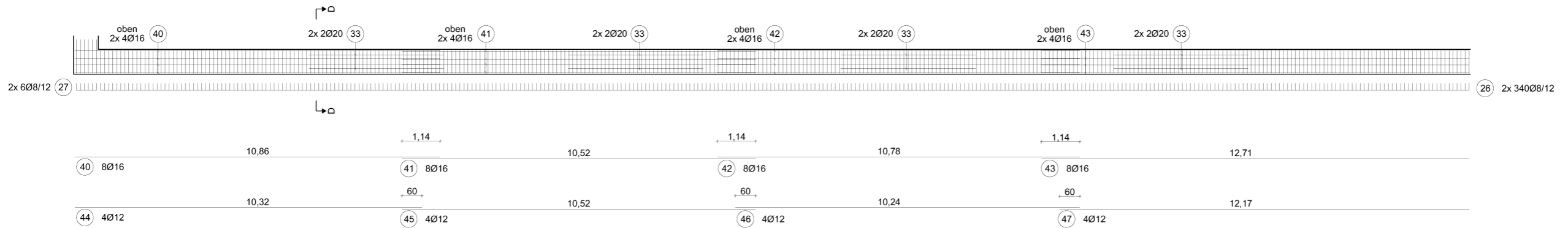


BALKENBEWEHRUNG

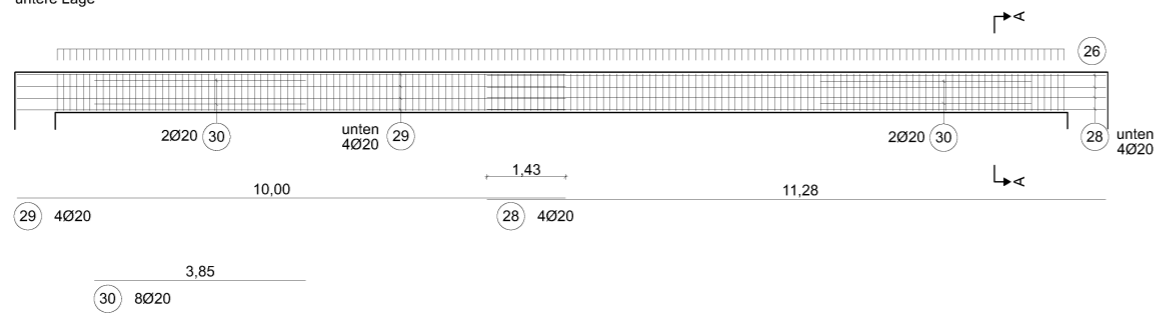
Achse A
untere Lage



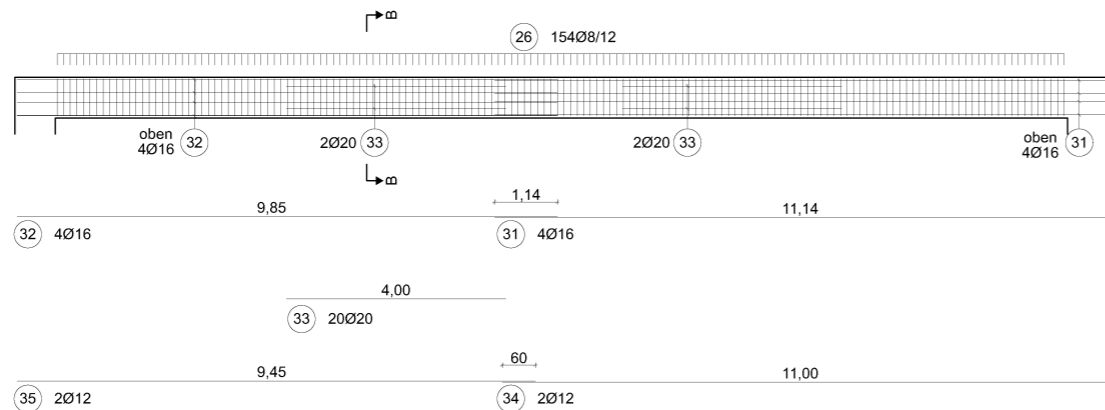
Obere Lage:



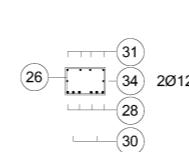
Achse 1
untere Lage



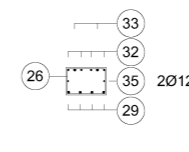
Obere Lage:



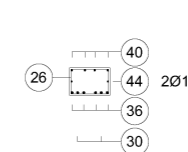
Schnitt A-A: Feldbereich



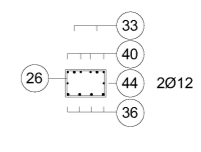
Schnitt B-B: Stützbereich



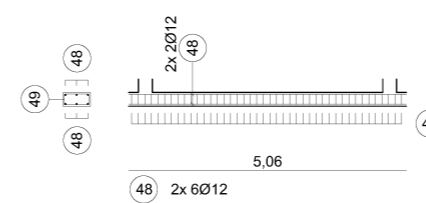
Schnitt C-C: Feldbereich



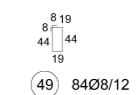
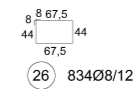
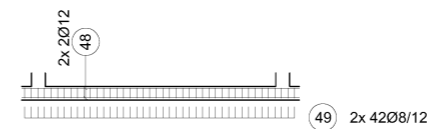
Schnitt D-D: Stützbereich



Achse B,C
untere Lage



obere Lage



Stahlliste Stahlbetonflachdecke

| POS. [-] | Stück [-] | Länge [m] | Ø [mm] | Gesamtlänge [m] | Gesamtvolumen [m³] | Gewicht [kg] | Bezeichnung |
|------------------|--------------|---------------|------------|--------------------|-----------------------|--|---|
| 1 | 503 | 11,07 | 10 | 5.568,2 | 0,44 | 3.433 | Grundbewehrung oben + unten |
| 2 | 503 | 9,27 | 10 | 4.662,8 | 0,37 | 2.875 | Grundbewehrung oben + unten |
| 3 | 268 | 7,30 | 10 | 1.956,4 | 0,15 | 1.206 | Grundbewehrung oben + unten |
| 4 | 266 | 10,65 | 10 | 2.832,9 | 0,22 | 1.747 | Grundbewehrung oben + unten |
| 5 | 212 | 9,44 | 10 | 2.001,3 | 0,16 | 1.234 | Grundbewehrung oben + unten |
| 6 | 212 | 10,14 | 10 | 2.149,7 | 0,17 | 1.325 | Grundbewehrung oben + unten |
| 7 | 270 | 12,71 | 10 | 3.431,7 | 0,27 | 2.116 | Grundbewehrung oben + unten |
| 8 | 96 | 6,60 | 10 | 633,6 | 0,05 | 391 | Grundbewehrung oben + unten |
| 9 | 88 | 4,60 | 10 | 404,8 | 0,03 | 250 | Grundbewehrung oben + unten |
| 10 | 46 | 5,43 | 10 | 249,8 | 0,02 | 154 | Grundbewehrung oben |
| 11 | 40 | 5,40 | 10 | 216,0 | 0,02 | 133 | Grundbewehrung oben |
| 12 | 44 | 6,84 | 10 | 301,0 | 0,02 | 186 | Grundbewehrung oben |
| 13 | 40 | 3,38 | 10 | 135,2 | 0,01 | 83 | Grundbewehrung oben |
| 14 | 40 | 6,81 | 10 | 272,4 | 0,02 | 168 | Grundbewehrung oben |
| 15 | 40 | 5,23 | 25 | 209,2 | 0,10 | 806 | Zulagen oben x-Richtung |
| 16 | 40 | 2,40 | 20 | 96,0 | 0,03 | 237 | Zulagen oben x-y-Richtung |
| 17 | 72 | 3,67 | 20 | 264,2 | 0,08 | 652 | Zulagen oben x-y-Richtung |
| 18 | 36 | 4,93 | 25 | 177,5 | 0,09 | 684 | Zulagen oben x-Richtung |
| 19 | 22 | 3,00 | 8 | 66,0 | 0,00 | 26 | Zulagen oben x-Richtung |
| 20 | 16 | 2,00 | 8 | 32,0 | 0,00 | 13 | Zulagen oben x-Richtung |
| 21 | 24 | 2,60 | 8 | 62,4 | 0,00 | 25 | Zulagen oben x-Richtung |
| 22 | 21 | 10,69 | 25 | 224,5 | 0,11 | 865 | Zulagen oben y-Richtung |
| 23 | 18 | 10,39 | 25 | 187,0 | 0,09 | 721 | Zulagen oben y-Richtung |
| 24 | 253 | 4,00 | 8 | 1.012,0 | 0,05 | 399 | Zulagen unten x-Richtung |
| 25 | 484 | 3,50 | 8 | 1.694,0 | 0,09 | 668 | Zulagen unten y-Richtung |
| 26 | 834 | 2,39 | 8 | 1.993,3 | 0,10 | 787 | Bügelbewehrung Randbalken Regelbereich x+y |
| 27 | 12 | 2,12 | 8 | 25,4 | 0,00 | 10 | Bügelbewehrung Randbalken außen x |
| 28 | 4 | 11,28 | 20 | 45,1 | 0,01 | 111 | Grundbewehrung unten Randbalken y |
| 29 | 4 | 10,00 | 20 | 40,0 | 0,01 | 99 | Grundbewehrung unten Randbalken y |
| 30 | 8 | 3,85 | 20 | 30,8 | 0,01 | 76 | Zulagebewehrung Feldbereich Randbalken x+y |
| 31 | 4 | 11,14 | 16 | 44,6 | 0,01 | 70 | Grundbewehrung oben Randbalken y |
| 32 | 4 | 9,85 | 16 | 39,4 | 0,01 | 62 | Grundbewehrung oben Randbalken y |
| 33 | 20 | 4,00 | 20 | 80,0 | 0,03 | 197 | Zulagebewehrung Stützbereich Randbalken x+y |
| 34 | 2 | 11,00 | 12 | 22,0 | 0,00 | 20 | konstruktive Bewehrung Randbalken y |
| 35 | 2 | 9,45 | 12 | 18,9 | 0,00 | 17 | konstruktive Bewehrung Randbalken y |
| 36 | 8 | 10,86 | 20 | 86,9 | 0,03 | 214 | Grundbewehrung unten Randbalken x |
| 37 | 8 | 11,10 | 20 | 88,8 | 0,03 | 219 | Grundbewehrung unten Randbalken x |
| 38 | 8 | 10,21 | 20 | 81,7 | 0,03 | 201 | Grundbewehrung unten Randbalken x |
| 39 | 8 | 13,57 | 20 | 108,6 | 0,03 | 268 | Grundbewehrung unten Randbalken x |
| 40 | 8 | 10,86 | 16 | 86,9 | 0,02 | 137 | Grundbewehrung oben Randbalken x |
| 41 | 8 | 10,52 | 16 | 84,2 | 0,02 | 133 | Grundbewehrung oben Randbalken x |
| 42 | 8 | 10,78 | 16 | 86,2 | 0,02 | 136 | Grundbewehrung oben Randbalken x |
| 43 | 8 | 12,71 | 16 | 101,7 | 0,02 | 160 | Grundbewehrung oben Randbalken x |
| 44 | 4 | 10,32 | 12 | 41,3 | 0,00 | 37 | konstruktive Bewehrung Randbalken x |
| 45 | 4 | 10,52 | 12 | 42,1 | 0,00 | 37 | konstruktive Bewehrung Randbalken x |
| 46 | 4 | 10,24 | 12 | 41,0 | 0,00 | 36 | konstruktive Bewehrung Randbalken x |
| 47 | 4 | 12,17 | 12 | 48,7 | 0,01 | 43 | konstruktive Bewehrung Randbalken x |
| 48 | 12 | 5,06 | 12 | 60,7 | 0,01 | 54 | Längsbewehrung Unterzug Kern |
| 49 | 84 | 1,42 | 8 | 119,3 | 0,01 | 47 | Bügelbewehrung Unterzug Kern |
| HDB-14/215-3/450 | 40 | 0,65 | 14 | 25,8 | 0,00 | 34 | Dübelleiste, Gewicht um 10% wegen Köpfen erhöht |
| HDB-14/215-2/300 | 152 | 0,43 | 14 | 65,4 | 0,01 | 87 | Dübelleiste, Gewicht um 10% wegen Köpfen erhöht |
| Summe | 4916 | 378,54 | 712 | 32.349,0 | 3,02 | 23.688 [kg] 23,69 [t] | |

8.1.2 Stahlbetonrippendecke

Randbedingungen:

- Geometrie:
 - Deckenplatte Stahlbeton $h = 12 \text{ cm}$
 - Deckenrippen Stahlbeton $b/h = 25/40 \text{ cm}$ (inkl. Platte), Achsabstand 85 cm
 - Unterzüge innen und am Rand Stahlbeton $h/b = 55/60 \text{ cm}$
 - Unterzüge im Bereich des Kerns $h/b = 25/50 \text{ cm}$
- Material: Betongüte C30/37 sowie Bewehrung
- Betondeckung $c_{\text{nom}} = 2,5 \text{ cm}$
- Berechnung: Modellierung in InfoGraph
 - Belastungsbeginn nach 28 t
 - $T_{\infty} = 30.000 \text{ d}$
 - Schachbrettartige Anordnung der Nutzlasten
 - An Deckenrand (Achse 6) Einspannung modelliert um Durchlaufwirkung abzubilden
 - Auflager (Stützen) in z-Richtung fest, sonst frei
 - Wände in starke Richtung (lokal x) und z-Richtung fest

Bemessung:

- Maßgebender Nachweis: Verformung
- Nichtlineare Berechnung zur Verformungsüberprüfung ($u_{\text{max}} = 28 \text{ mm}$)
- Genauere Betrachtung der Schwingungen nicht erforderlich ($f_{1,\text{starr}} = 12,1 \text{ Hz}$)
- Bewehrungswahl gemäß Schnittgrößen nach Zustand I
 - Grundbewehrung $\text{Ø}8/18$
 - Zulagebewehrung $\text{Ø}8/25$
 - Einheitliche Bewehrung aller Rippen

Mengenermittlung:

Decke (ohne Rippen)

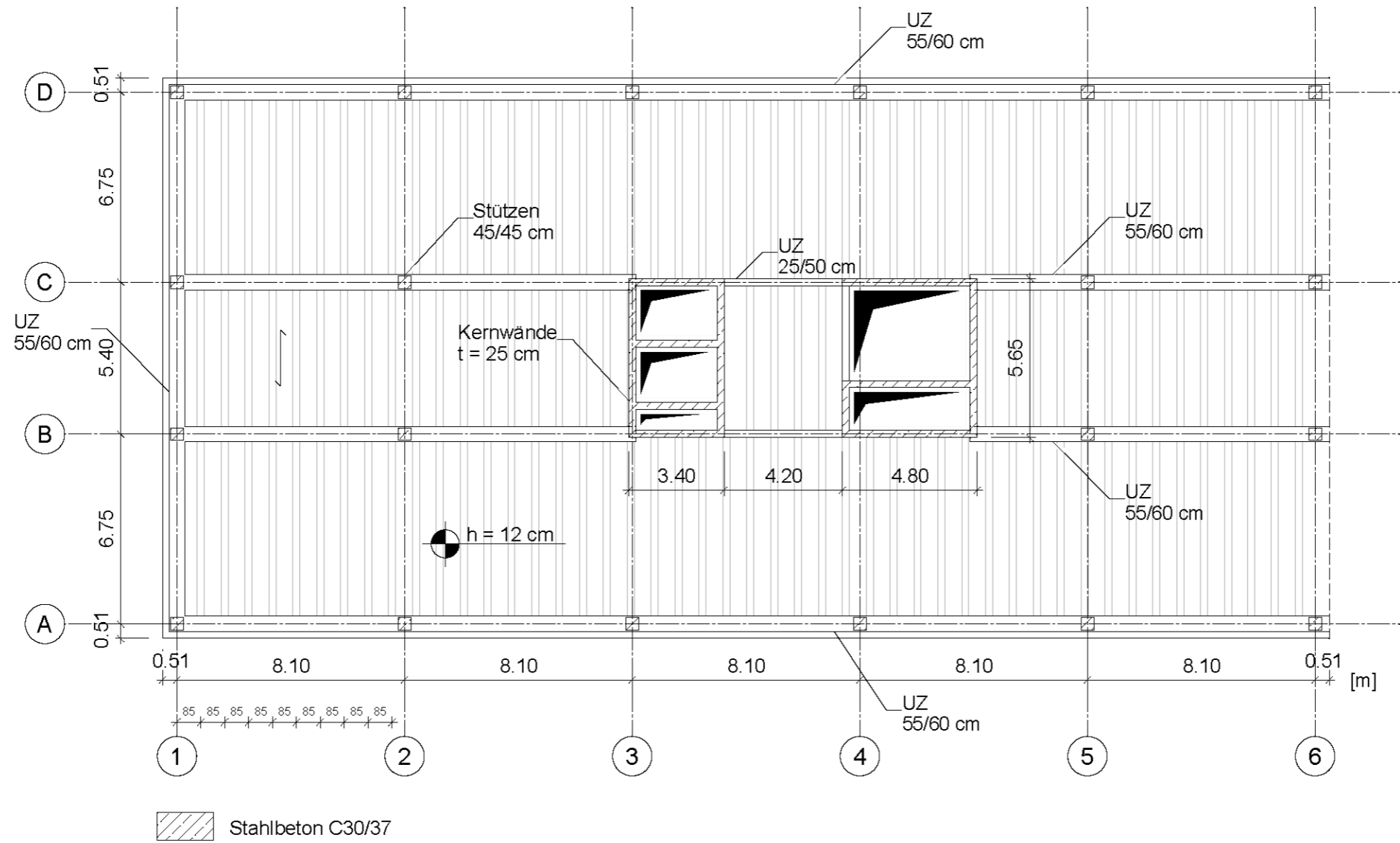
| | | |
|--|---------------|--|
| Bewehrung gesamt (Pos. 1-11, 53-55) | 6,813 | t |
| Bewehrung je m²_{NGF} | 0,0087 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrungsvolumen je m ² _{NGF} | 0,0011 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Bruttovolumen Betonplatte | 94,3 | m ³ |
| Bruttovolumen Beton-UZ am Kern in Achse B/C | 0,798 | m ³ |
| Bruttovolumen Beton je m ² _{NGF} | 0,1210 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Nettovolumen Beton je m²_{NGF} | 0,1199 | m³/m²_{NGF} |

Rippen

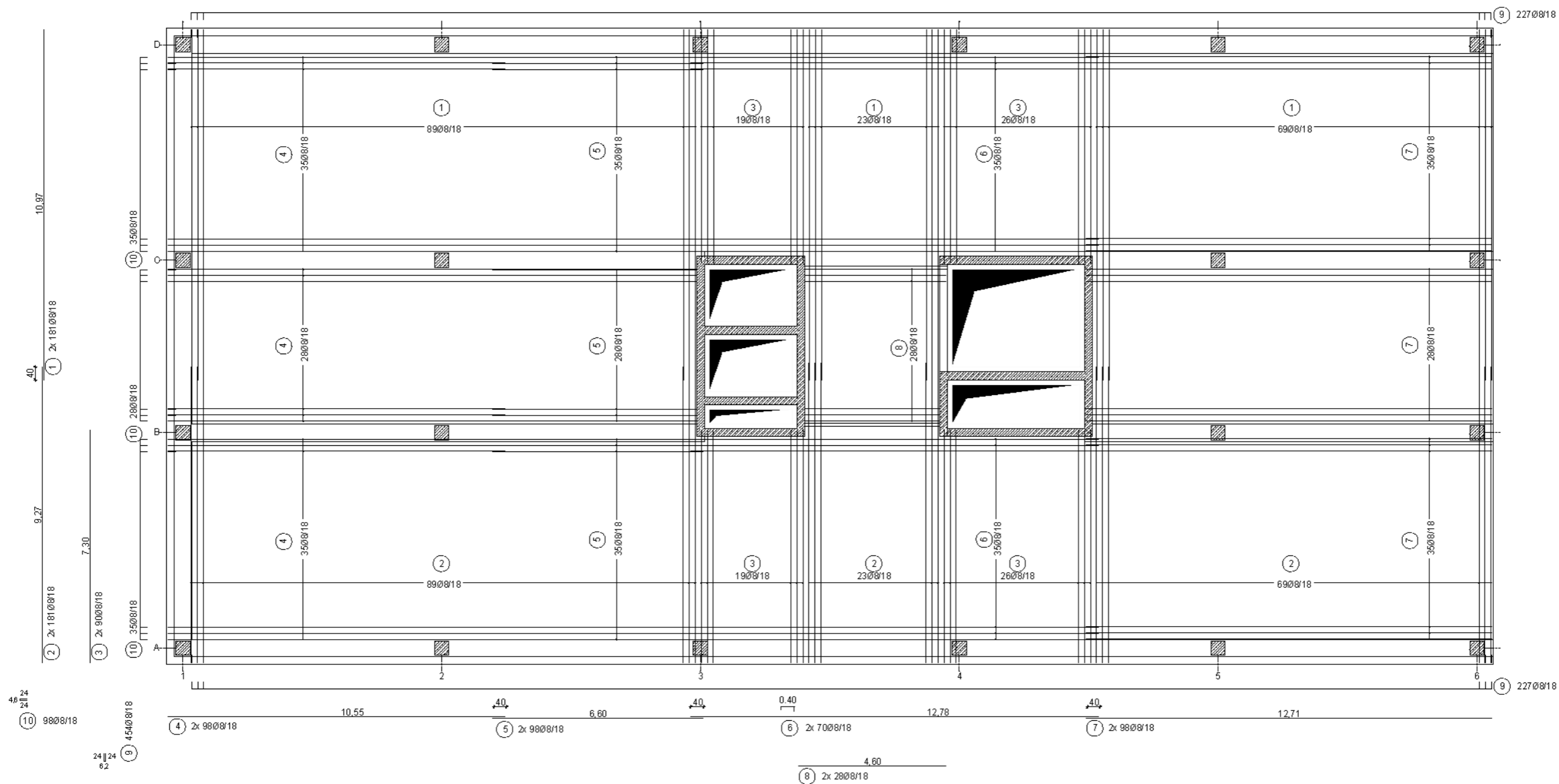
| | | |
|--|---------------|--|
| Bewehrung gesamt (Pos. 12-17, 57) | 8,888 | t |
| Bewehrung je m²_{NGF} | 0,0113 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrungsvolumen je m ² _{NGF} | 0,0015 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Bruttovolumen Betonrippe (exkl. Betonplatte, Länge = 779,5 m) | 54,565 | m ³ |
| Bruttovolumen Beton je m ² _{NGF} | 0,0695 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Nettovolumen Beton je m²_{NGF} | 0,0680 | m³/m²_{NGF} |

Randträger und Innenträger

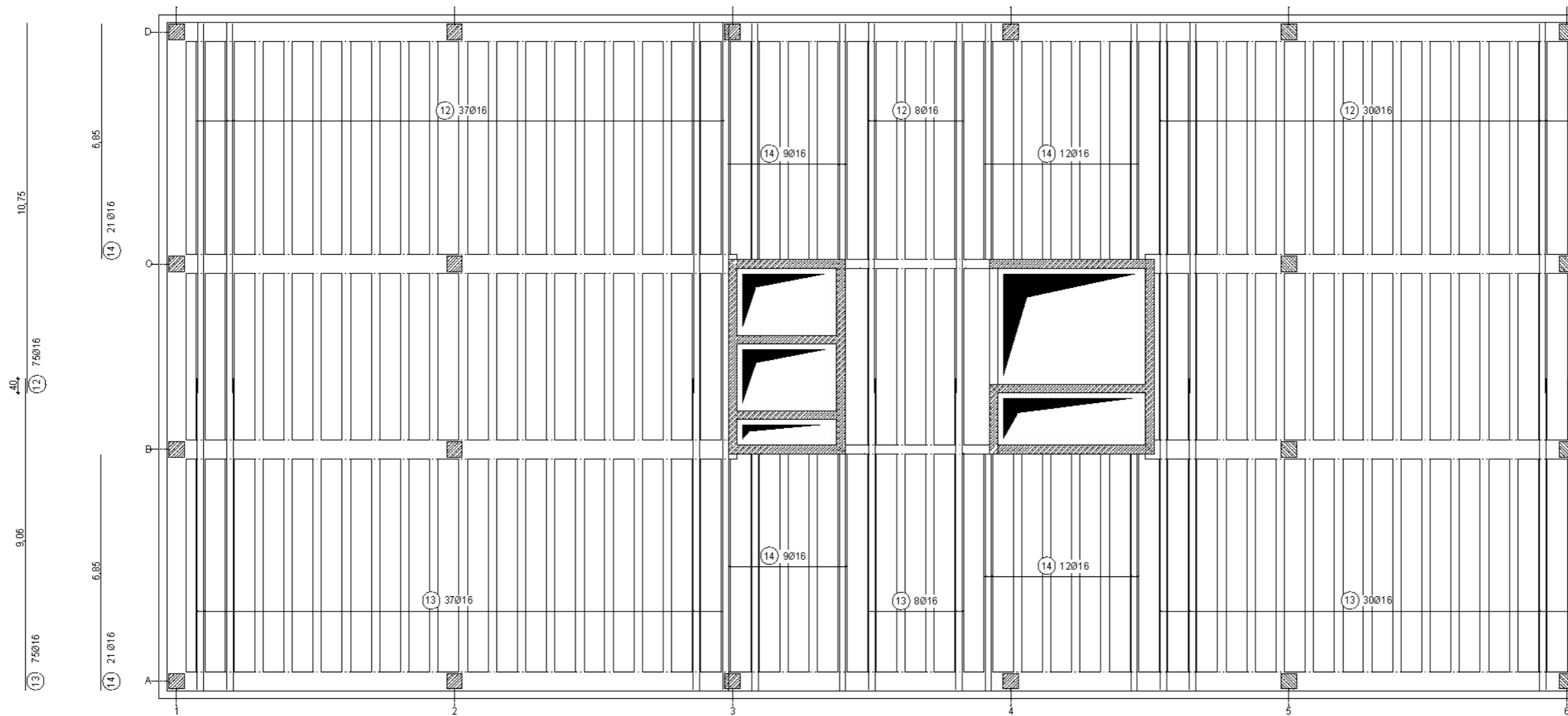
| | | |
|---|---------------|--|
| Bewehrung gesamt (Pos. 18-52, 56) | 6,963 | t |
| Bewehrung je m²_{NGF} | 0,0089 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrungsvolumen je m ² _{NGF} | 0,0011 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Bruttovolumen Beton (exkl. Betonplatte, Länge = 156,1 m) | 41,2 | m ³ |
| Bruttovolumen Beton je m ² _{NGF} | 0,0524 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Nettovolumen Beton je m²_{NGF} | 0,0513 | m³/m²_{NGF} |



UNTERE + OBERE BEWEHRUNGSLAGE



UNTERE RIPPENBEWEHRUNG

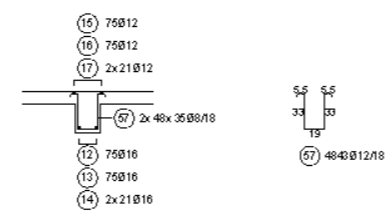


OBERE RIPPENBEWEHRUNG

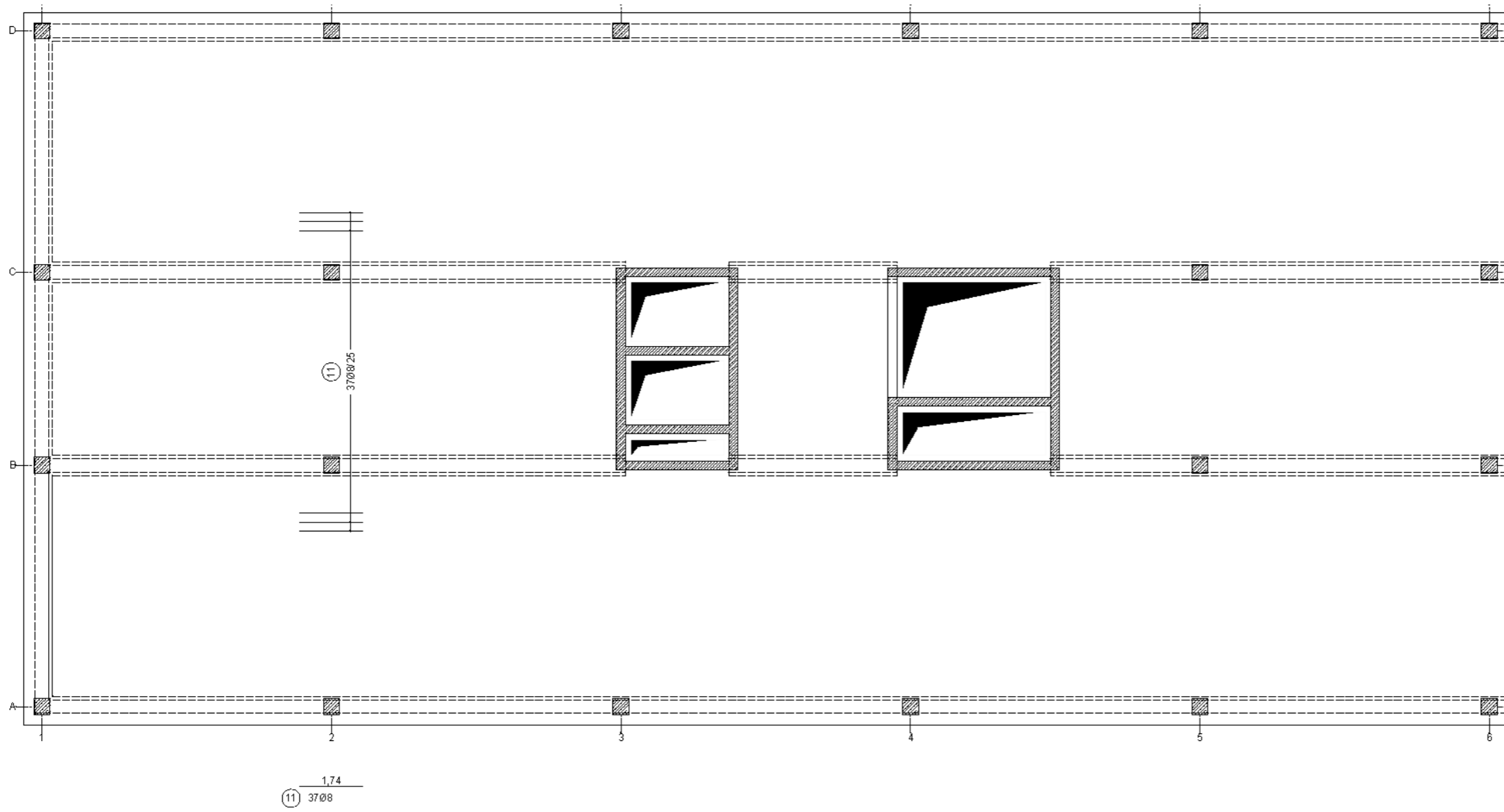
analog mit
 (15) 75Ø12
 (16) 75Ø12
 (17) 2x 21Ø12

SCHNITT DURCH DIE RIPPENBEWEHRUNG

Achsabstand der Rippen 85 cm

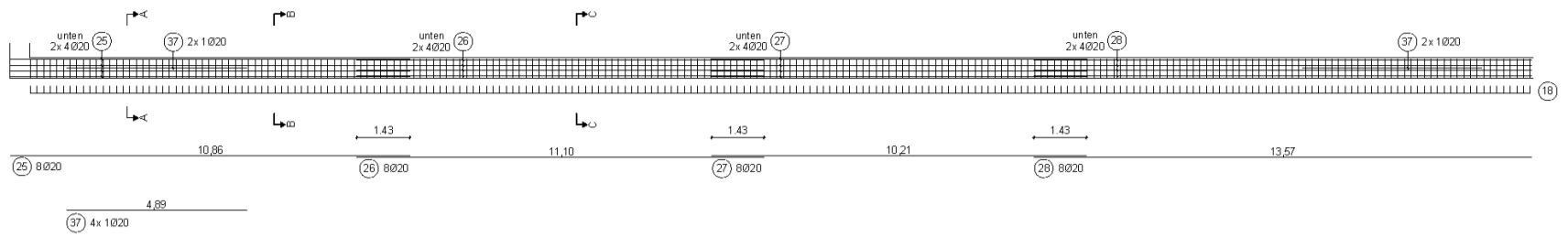


ZULAGEBEWEHRUNG OBERE LAGE

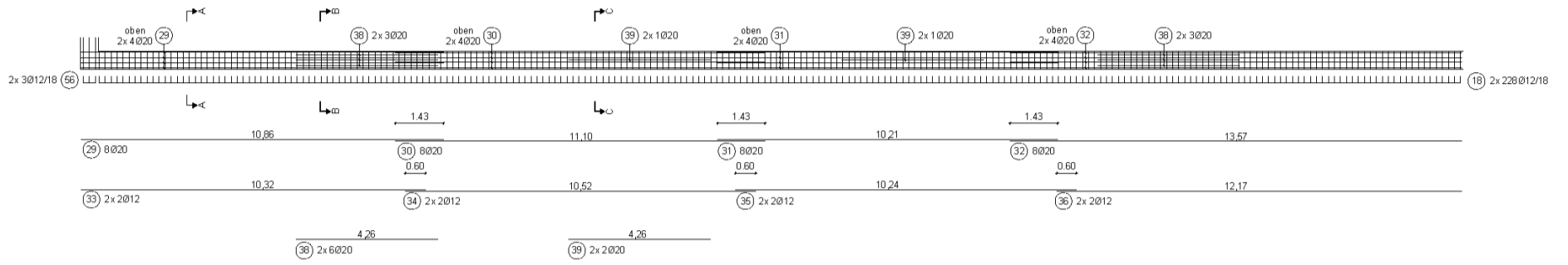


BALKENBEWEHRUNG

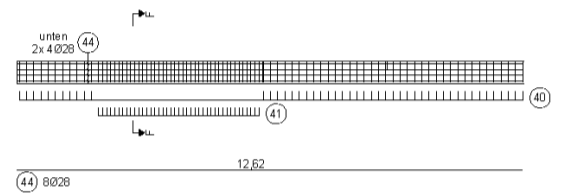
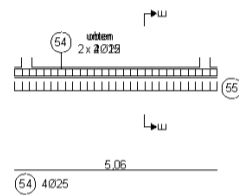
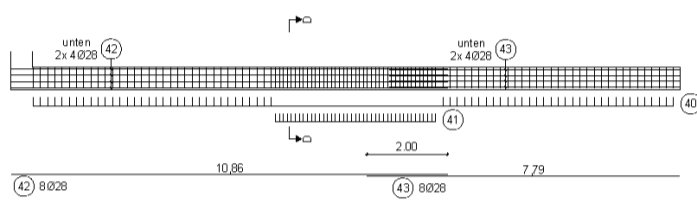
Achse A=D
untere Lage



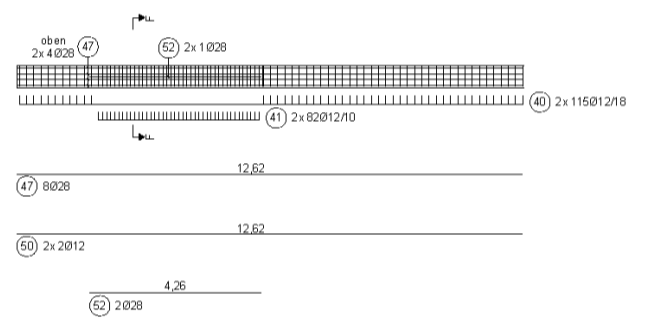
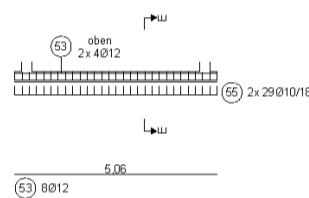
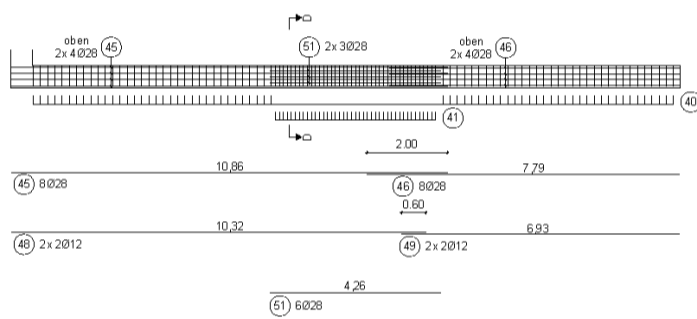
obere Lage



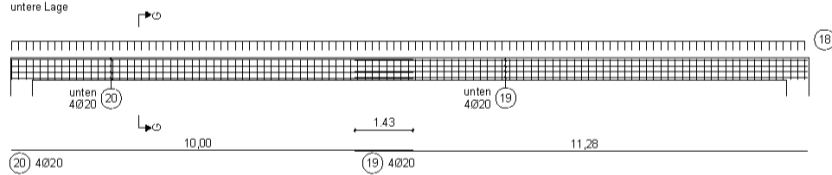
Achse B=C
untere Lage



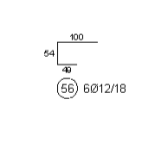
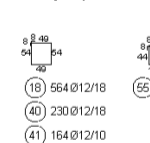
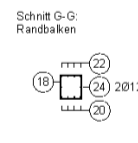
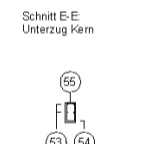
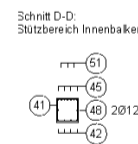
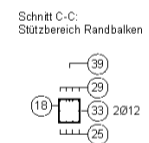
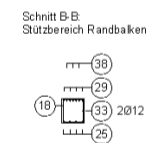
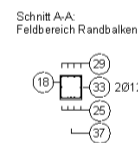
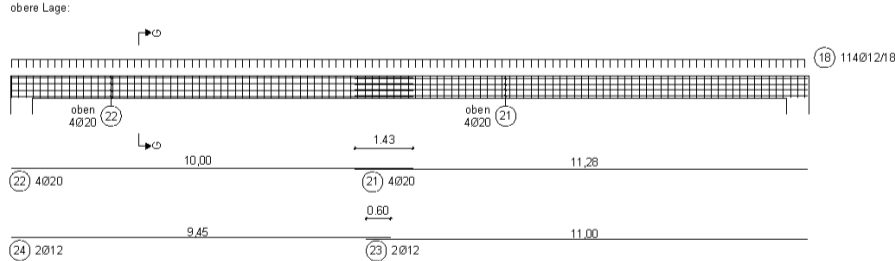
obere Lage



Achse 1
untere Lage



obere Lage:



Stahlliste Stahlbetonrippendecke

| POS. [-] | Stück [-] | Länge [m] | Ø [mm] | Gesamtlänge [m] | Gesamtvolumen [m³] | Gewicht [kg] | Bezeichnung |
|--------------|--------------|---------------|------------|--------------------|-----------------------|-----------------|---|
| 1 | 362 | 10,97 | 8 | 3.971,1 | 0,20 | 1.567 | Grundbewehrung o+u |
| 2 | 362 | 9,27 | 8 | 3.355,7 | 0,17 | 1.324 | Grundbewehrung o+u |
| 3 | 180 | 7,30 | 8 | 1.314,0 | 0,07 | 518 | Grundbewehrung o+u |
| 4 | 196 | 10,55 | 8 | 2.067,8 | 0,10 | 816 | Grundbewehrung o+u |
| 5 | 196 | 6,60 | 8 | 1.293,6 | 0,07 | 510 | Grundbewehrung o+u |
| 6 | 140 | 12,78 | 8 | 1.789,2 | 0,09 | 706 | Grundbewehrung o+u |
| 7 | 196 | 12,71 | 8 | 2.491,2 | 0,13 | 983 | Grundbewehrung o+u |
| 8 | 56 | 4,60 | 8 | 257,6 | 0,01 | 102 | Grundbewehrung o+u |
| 9 | 354 | 0,542 | 8 | 191,9 | 0,01 | 76 | Kappen y-Richtung |
| 10 | 98 | 0,53 | 8 | 51,5 | 0,00 | 20 | Kappen x-Richtung |
| 11 | 37 | 1,74 | 8 | 64,4 | 0,00 | 25 | Zulage oben |
| 12 | 75 | 10,75 | 16 | 806,3 | 0,16 | 1.273 | Rippenbewehrung unten |
| 13 | 75 | 9,06 | 16 | 679,5 | 0,14 | 1.072 | Rippenbewehrung unten |
| 14 | 42 | 6,85 | 16 | 287,7 | 0,06 | 454 | Rippenbewehrung unten |
| 15 | 75 | 10,75 | 12 | 806,3 | 0,09 | 716 | Rippenbewehrung oben |
| 16 | 75 | 9,06 | 12 | 679,5 | 0,08 | 603 | Rippenbewehrung oben |
| 17 | 42 | 6,85 | 12 | 287,7 | 0,03 | 255 | Rippenbewehrung oben |
| 18 | 564 | 2,22 | 12 | 1.252,1 | 0,14 | 1.112 | Bügel Randbalken |
| 19 | 4 | 11,28 | 20 | 45,1 | 0,01 | 111 | Grundbewehrung unten Randbalken y |
| 20 | 4 | 10,00 | 20 | 40,0 | 0,01 | 99 | Grundbewehrung unten Randbalken y |
| 21 | 4 | 11,28 | 20 | 45,1 | 0,01 | 111 | Grundbewehrung oben Randbalken y |
| 22 | 4 | 10,00 | 20 | 40,0 | 0,01 | 99 | Grundbewehrung oben Randbalken y |
| 23 | 2 | 11,00 | 12 | 22,0 | 0,00 | 20 | konstruktive Bewehrung Randbalken y |
| 24 | 2 | 9,45 | 12 | 18,9 | 0,00 | 17 | konstruktive Bewehrung Randbalken y |
| 25 | 8 | 10,86 | 20 | 86,9 | 0,03 | 214 | Grundbewehrung unten Randbalken x |
| 26 | 8 | 11,10 | 20 | 88,8 | 0,03 | 219 | Grundbewehrung unten Randbalken x |
| 27 | 8 | 10,21 | 20 | 81,7 | 0,03 | 201 | Grundbewehrung unten Randbalken x |
| 28 | 8 | 13,57 | 20 | 108,6 | 0,03 | 268 | Grundbewehrung unten Randbalken x |
| 29 | 8 | 10,86 | 20 | 86,9 | 0,03 | 214 | Grundbewehrung oben Randbalken x |
| 30 | 8 | 10,52 | 20 | 84,2 | 0,03 | 208 | Grundbewehrung oben Randbalken x |
| 31 | 8 | 10,21 | 20 | 81,7 | 0,03 | 201 | Grundbewehrung oben Randbalken x |
| 32 | 8 | 13,57 | 20 | 108,6 | 0,03 | 268 | Grundbewehrung oben Randbalken x |
| 33 | 4 | 10,32 | 12 | 41,3 | 0,00 | 37 | konstruktive Bewehrung Randbalken x |
| 34 | 4 | 10,52 | 12 | 42,1 | 0,00 | 37 | konstruktive Bewehrung Randbalken x |
| 35 | 4 | 10,24 | 12 | 41,0 | 0,00 | 36 | konstruktive Bewehrung Randbalken x |
| 36 | 4 | 12,17 | 12 | 48,7 | 0,01 | 43 | konstruktive Bewehrung Randbalken x |
| 37 | 4 | 4,89 | 20 | 19,6 | 0,01 | 48 | Zulagebewehrung Feldbereich Randbalken x |
| 38 | 12 | 4,26 | 20 | 51,1 | 0,02 | 126 | Zulagebewehrung Stützbereich Randbalken x |
| 39 | 4 | 4,26 | 20 | 17,0 | 0,01 | 42 | Zulagebewehrung Stützbereich Randbalken x |
| 40 | 230 | 2,22 | 12 | 510,6 | 0,06 | 453 | Bügel Innenbalken |
| 41 | 164 | 2,22 | 12 | 364,1 | 0,04 | 323 | Bügel Innenbalken |
| 42 | 8 | 10,86 | 28 | 86,9 | 0,05 | 420 | Grundbewehrung unten Innenbalken |
| 43 | 8 | 7,79 | 28 | 62,3 | 0,04 | 301 | Grundbewehrung unten Innenbalken |
| 44 | 8 | 12,62 | 20 | 101,0 | 0,03 | 249 | Grundbewehrung unten Innenbalken |
| 45 | 8 | 10,86 | 28 | 86,9 | 0,05 | 420 | Grundbewehrung oben Innenbalken |
| 46 | 8 | 7,79 | 28 | 62,3 | 0,04 | 301 | Grundbewehrung oben Innenbalken |
| 47 | 8 | 12,62 | 28 | 101,0 | 0,06 | 488 | Grundbewehrung oben Innenbalken |
| 48 | 4 | 10,32 | 12 | 41,3 | 0,00 | 37 | konstruktive Bewehrung Innenbalken |
| 49 | 4 | 6,93 | 12 | 27,7 | 0,00 | 25 | konstruktive Bewehrung Innenbalken |
| 50 | 4 | 12,62 | 12 | 50,5 | 0,01 | 45 | konstruktive Bewehrung Innenbalken |
| 51 | 6 | 4,26 | 28 | 25,6 | 0,02 | 124 | Zulagebewehrung Stützbereich Innenbalken |
| 52 | 2 | 4,26 | 28 | 8,5 | 0,01 | 41 | Zulagebewehrung Stützbereich Innenbalken |
| 53 | 8 | 5,06 | 12 | 40,5 | 0,00 | 36 | Längsbewehrung Unterzug Kern oben |
| 54 | 4 | 5,06 | 25 | 20,2 | 0,01 | 78 | Längsbewehrung Unterzug Kern unten |
| 55 | 58 | 1,42 | 10 | 82,4 | 0,01 | 51 | Bügel Kern |
| 56 | 6 | 2,03 | 8 | 12,2 | 0,00 | 5 | Randstecker |
| 57 | 4843 | 1,05 | 12 | 5.085,2 | 0,58 | 4.515 | Bügel Rippen |
| Summe | 8626 | 463,69 | 899 | 24.529,9 | 2,31 | 22.664 | [kg] |
| | | | | | | 22,66 | [t] |

8.1.3 Spannbetonhohlplatte mit Stahlträgern

Randbedingungen:

- Geometrie:
 - Hohlziele $h = 26 \text{ cm}$, $b = 1,2 \text{ m}$ (Standardmaß), Zuschnitt der Endträger
 - 4 Öffnungen $\varnothing 18 \text{ cm}$ je Element
 - 5 Litzen, $A_p = 93 \text{ mm}^2$
 - Rand-/Innenträger gemäß Zeichnungen, $t_{OG} = t_{UG} = 20 \text{ mm}$, $t_{Steg} = 15 \text{ mm}$
- Material:
 - Hohlziele: Betongüte C45/55 (Zementklasse N), Spannstahl 1570/1770
 - Rand-/Innenträger: Stahlgüte S235, Kammerbeton C20/25 sowie Bewehrung
- Betondeckung der Litzen: $c_{nom} = 4,0 \text{ cm}$
- Berechnung: tabellarisch als Einfeldträger nach DIN EN 1992-1 und DIN EN 1168
 - Belastungsbeginn nach 28 t
 - $T_\infty = 30.000 \text{ d}$, Nachweisführung für $t = 0$ und $t = \infty$
 - $\gamma_c = 1,35$ (Herstellung im Werk)
 - Spannkraftverluste K+S und Relaxation: 10 % (Annahme)

Bemessung:

- Maßgebender Nachweis: Nachweis der Stahlspannung und Nachweis der Betonspannung am unteren QS-Rand im Bereich der Endverankerung
- Verformung Innenträger ($u_{max, IT} = 10,5 \text{ mm}$)
- Verformung Randträger ($u_{max, RT} = 6,1 \text{ mm}$)
- Genauere Betrachtung der Schwingungen nicht erforderlich ($f_{1, starr} = 9,3 \text{ Hz}$)

Mengenermittlung:

Spannbetonhohlplatten

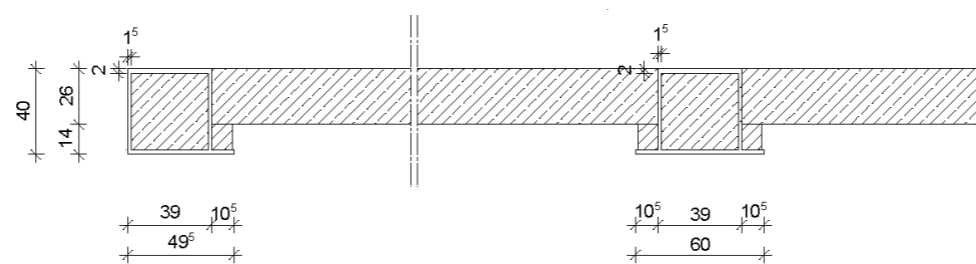
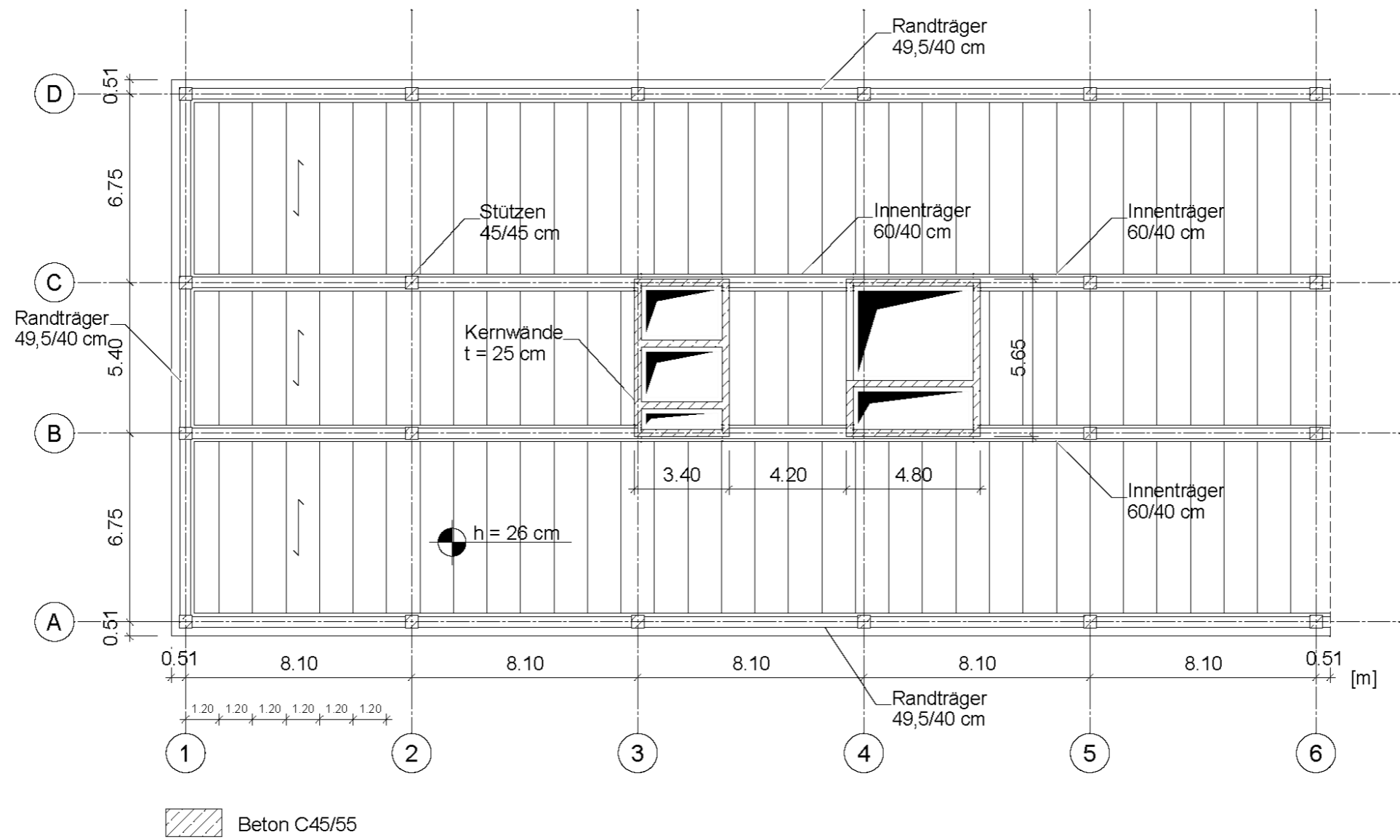
| | | |
|--|---------------|--|
| Spannstahl gesamt | 2,389 | t |
| Spannstahl je m²_{NGF} | 0,003 | t/m²_{NGF} |
| Spannstahlvolumen je m ² _{NGF} | 0,0004 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Bruttovolumen Betonplatte | 137,3 | m ³ |
| Bruttovolumen Beton je m ² _{NGF} | 0,1748 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Nettovolumen Beton je m²_{NGF} | 0,1744 | m³/m²_{NGF} |

Innenträger

| | | |
|--|---------------|--|
| Gesamtgewicht Stahl | 15,518 | t |
| Gesamtgewicht Stahl je m²_{NGF} | 0,0198 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrung gesamt (Pos.14-18) | 1,47 | t |
| Bewehrung je m²_{NGF} | 0,0019 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrungsvolumen je m ² _{NGF} | 0,0002 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Bruttovolumen Beton (exkl. Betonplatte, Länge = 64,6 m) | 8,1396 | m ³ |
| Bruttovolumen Beton je m ² _{NGF} | 0,0103 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Nettovolumen Beton je m²_{NGF} | 0,0101 | m³/m²_{NGF} |

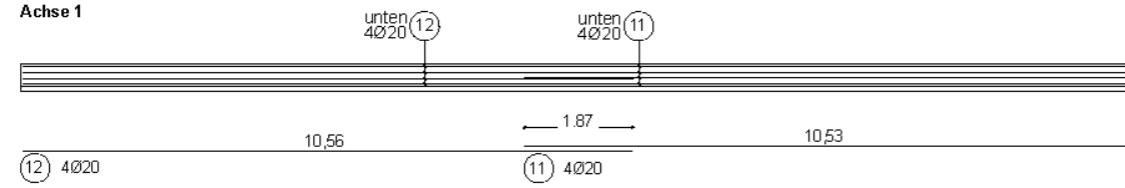
Randträger

| | | |
|--|---------------|--|
| Gesamtgewicht Stahl | 22,35 | t |
| Gesamtgewicht Stahl je m²_{NGF} | 0,0285 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrung gesamt (Pos.11-13, 19) | 0,908 | t |
| Bewehrung je m²_{NGF} | 0,0012 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrungsvolumen je m ² _{NGF} | 0,0001 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Bruttovolumen Beton (exkl. Betonplatte, Länge = 99,9 m) | 13,3067 | m ³ |
| Bruttovolumen Beton je m ² _{NGF} | 0,0169 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Nettovolumen Beton je m²_{NGF} | 0,0168 | m³/m²_{NGF} |

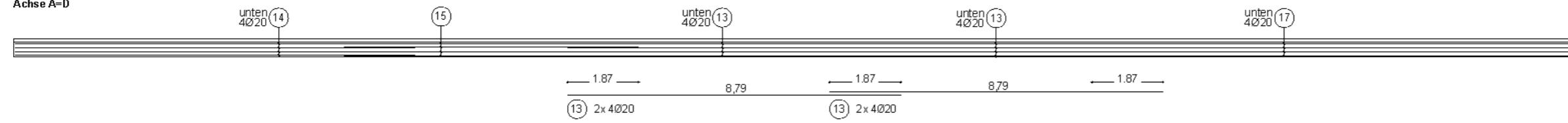


BALKENBEWEHRUNG

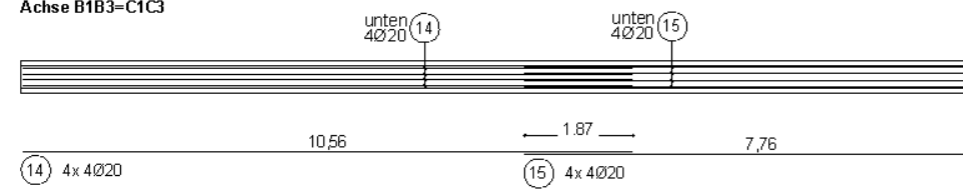
Achse 1



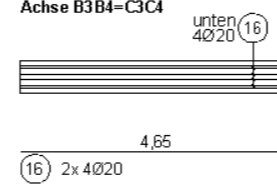
Achse A=D



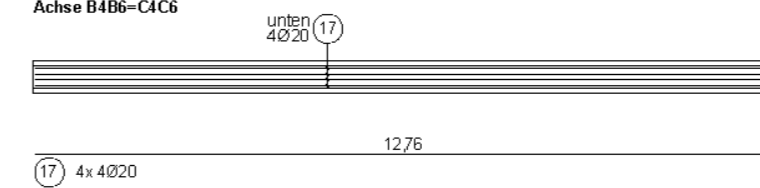
Achse B1B3=C1C3



Achse B3B4=C3C4



Achse B4B6=C4C6



Schnitt A-A (Randträger)



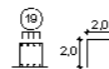
Schnitt B-B



Über Innen- und Randstützen
18 x 4Ø16 L=4m



Über Eckstützen
2 x 4Ø16 L=4m



Stahlliste Spannbetonhohlplatte mit Stahlträgern

| POS. [-] | Stück [-] | Länge [m] | Ø [mm] | Gesamtlänge [m] | Gesamtvolumen [m³] | Gewicht [kg] | Bezeichnung |
|--------------|--------------|--------------|------------|--------------------|-----------------------|-----------------|--|
| 11 | 4 | 10,53 | 20 | 42,1 | 0,01 | 104 | Balkenbewehrung Achse 1 |
| 12 | 4 | 10,56 | 20 | 42,2 | 0,01 | 104 | Balkenbewehrung Achse 1 |
| 13 | 16 | 8,79 | 20 | 140,6 | 0,04 | 347 | Balkenbewehrung Achse AD |
| 14 | 16 | 10,56 | 20 | 169,0 | 0,05 | 417 | Balkenbewehrung Achse ABCD |
| 15 | 16 | 7,76 | 20 | 124,2 | 0,04 | 306 | Balkenbewehrung Achse ABCD |
| 16 | 8 | 4,65 | 20 | 37,2 | 0,01 | 92 | Balkenbewehrung Achse BC |
| 17 | 16 | 12,76 | 20 | 204,2 | 0,06 | 503 | Balkenbewehrung Achse ABCD |
| 18 | 72 | 4,00 | 16 | 288,0 | 0,06 | 455 | Stützbewehrungzulage Balken |
| 19 | 8 | 4,00 | 16 | 32,0 | 0,01 | 51 | Stützbewehrungzulage Balken Eckstützen |
| Summe | 160 | 73,61 | 172 | 1.079,5 | 0,30 | 2.378 | [kg] |
| | | | | | | 2,38 | [t] |

8.1.4 Stahlbetonverbunddecke

Randbedingungen:

- Geometrie:
 - Deckenplatte Stahlbeton $h = 16 \text{ cm}$
 - Stahlträger HEA 280 über 8,10 m gespannt
 - Vollständige Verdübelung, zweireihig
 - Stahlträger HEA 400 als Randträger und Träger in Zahlenachsen
- Material: Betongüte C30/37 sowie Bewehrung, Stahlgüte S235
- Betondeckung: $c_{\text{nom}} = 2,5 \text{ cm}$
- Berechnung: tabellarisch als Einfeldträger nach DIN EN 1994-1
 - Belastungsbeginn nach 28 t
 - $T_{\infty} = 30.000 \text{ d}$, Nachweisführung für $t = 0$ und $t = \infty$

Bemessung:

- Maßgebender Nachweis: Verformung
- Verformung Decke und Stahlträger über Diagonale ($u_{\text{max}, t_{\infty}} = 43,09 \text{ mm}$)
- Genauere Betrachtung der Schwingungen nicht erforderlich ($f_{1, \text{starr}} = 7,6 \text{ Hz}$)
- Bewehrungswahl
 - Grundbewehrung $\text{Ø}8/14$
 - Zulagebewehrung durch Quertragfähigkeit der Platte zwischen HEA 280
 - im Feldbereich $\text{Ø}8/13$
 - im Stützbereich $\text{Ø}12/13,5$

Mengenermittlung:

Decke

| | | |
|--|---------------|--|
| Bewehrung gesamt (Pos. 1-13) | 14,38 | t |
| Bewehrung je m²_{NGF} | 0,0183 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrungsvolumen je m ² _{NGF} | 0,0023 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Bruttovolumen Betonplatte | 125,7 | m ³ |
| Bruttovolumen Beton je m ² _{NGF} | 0,16 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Nettovolumen Beton je m²_{NGF} | 0,1577 | m³/m²_{NGF} |

Verbundträger

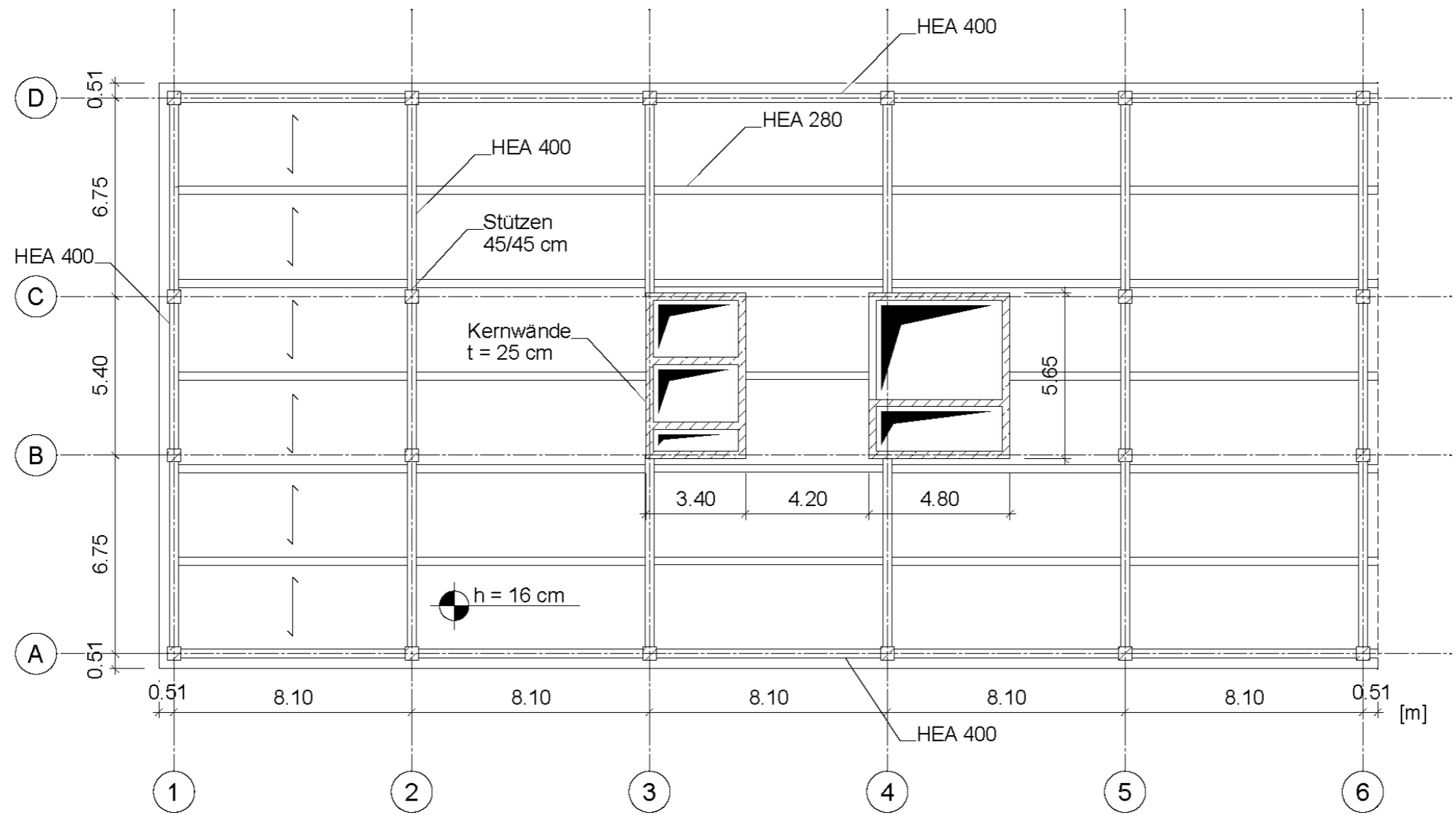
| | | |
|---|---------------|--------------------------------------|
| Gesamtgewicht Stahl (Länge = 194,3 m) | 14,845 | t |
| Gesamtgewicht Stahl je m²_{NGF} | 0,0189 | t/m²_{NGF} |

Rand-/Innenträger

| | | |
|---|---------------|--------------------------------------|
| Gesamtgewicht Stahl (Länge = 183,6 m) | 22,913 | t |
| Gesamtgewicht Stahl je m²_{NGF} | 0,0292 | t/m²_{NGF} |

Brandschutzanstrich

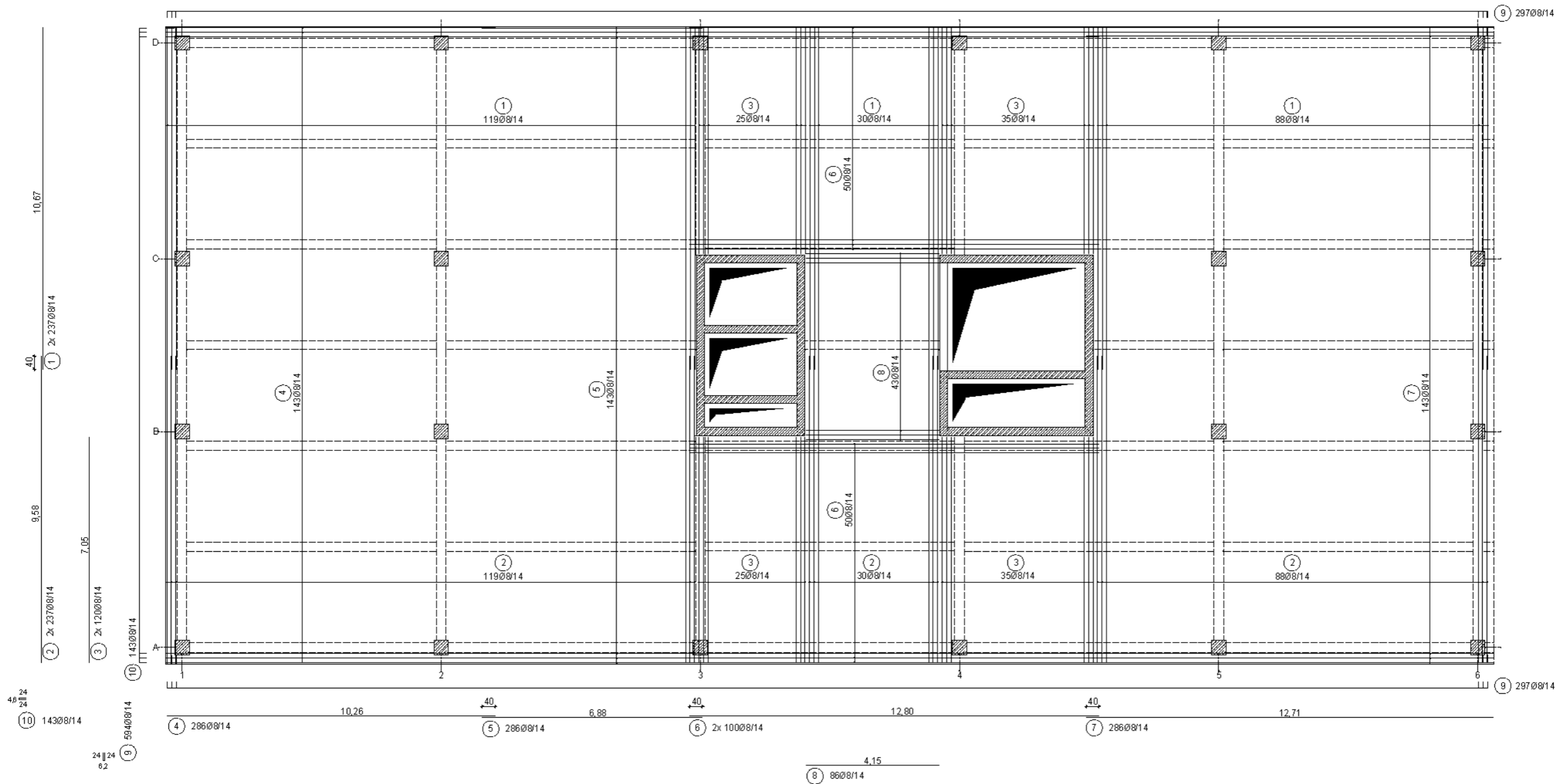
| | HEA 280 | HEA 400 |
|--|---------------|---------------|
| Querschnittsfläche [cm ²] | 97,3 | 159 |
| Profilmfaktor [m ⁻¹] | 136 | 101 |
| Anstrichfläche [m ² /m] | 1,33 | 1,61 |
| Verbrauch [kg/m ²] | 3,315 | 2,718 |
| Gesamtgewicht Anstrich [t] je m²_{NGF} | 0,0011 | 0,0010 |



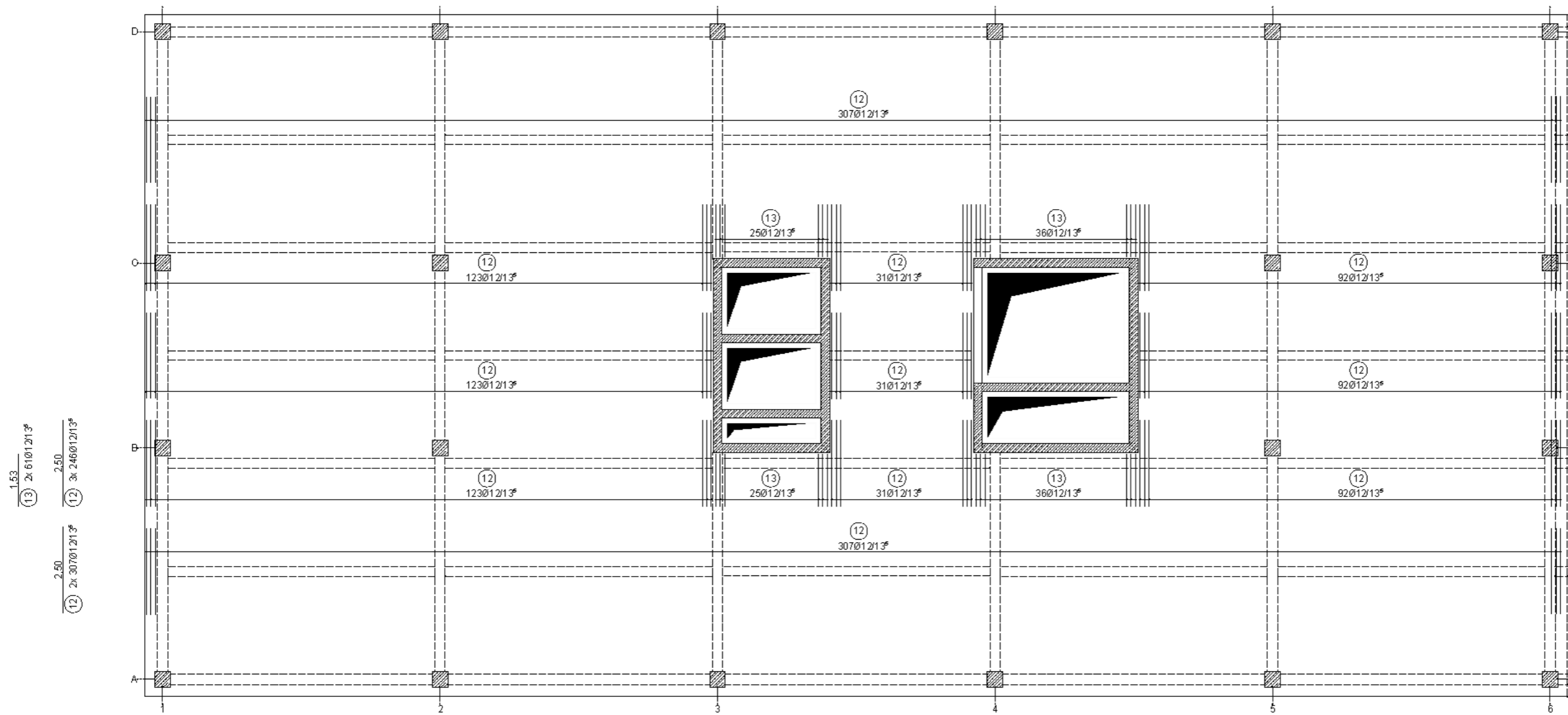
 Stahlbeton C30/37

 Stahl S235

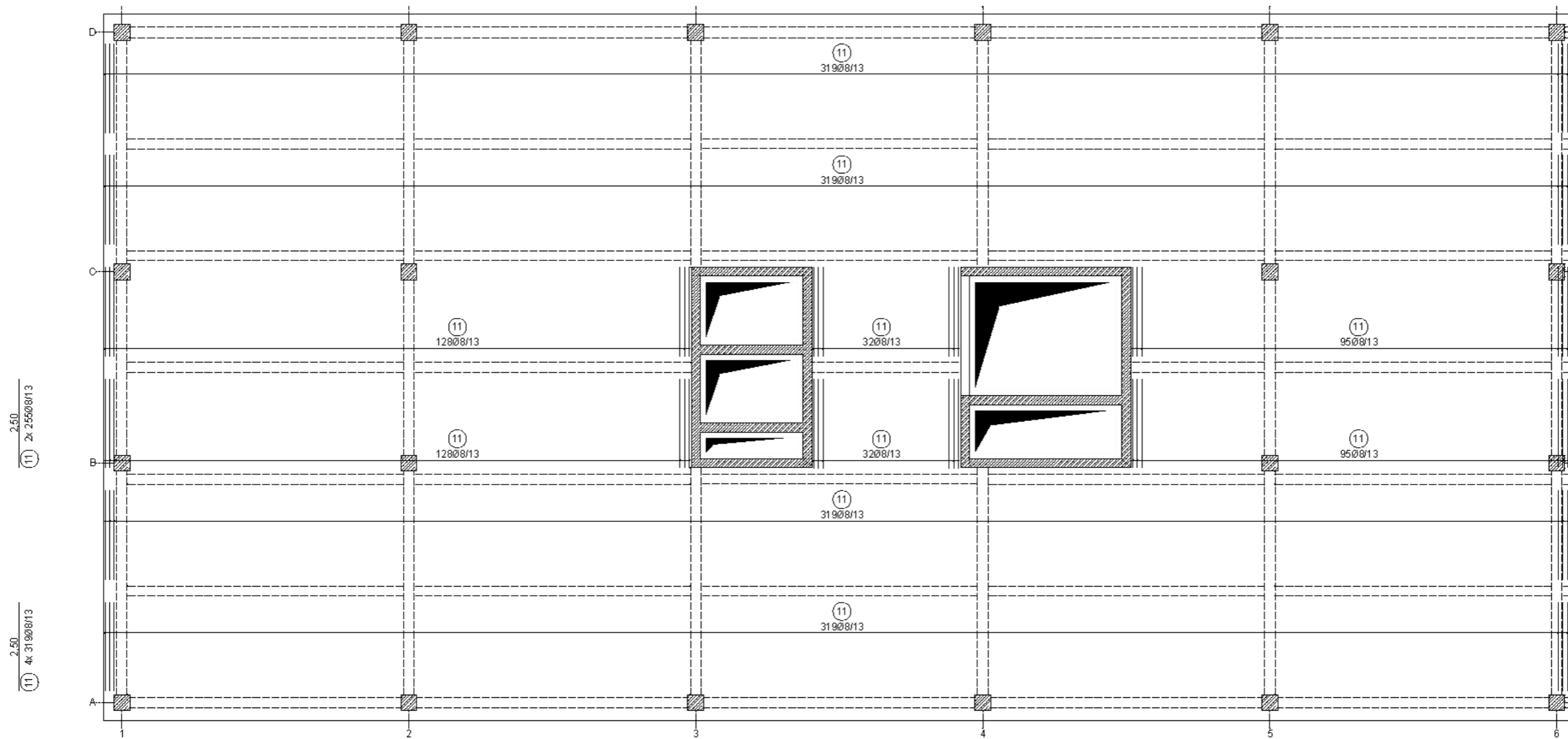
OBERE + UNTERE BEWEHRUNGSLAGE



OBERE ZULAGEBEWEHRUNG



UNTERE ZULAGEBEWEHRUNG



Stahlliste Stahlbetonverbunddecke

| POS. [-] | Stück [-] | Länge [m] | Ø [mm] | Gesamtlänge [m] | Gesamtvolumen [m³] | Gewicht [kg] | Bezeichnung |
|--------------|--------------|--------------|------------|--------------------|-----------------------|--|-----------------------|
| 1 | 474 | 10,67 | 8 | 5.057,6 | 0,25 | 1.996 | Grundbewehrung o+u |
| 2 | 474 | 9,58 | 8 | 4.540,9 | 0,23 | 1.792 | Grundbewehrung o+u |
| 3 | 240 | 7,05 | 8 | 1.692,0 | 0,09 | 668 | Grundbewehrung o+u |
| 4 | 286 | 10,26 | 8 | 2.934,4 | 0,15 | 1.158 | Grundbewehrung o+u |
| 5 | 286 | 6,88 | 8 | 1.967,7 | 0,10 | 776 | Grundbewehrung o+u |
| 6 | 200 | 12,80 | 8 | 2.560,0 | 0,13 | 1.010 | Grundbewehrung o+u |
| 7 | 286 | 12,71 | 8 | 3.635,1 | 0,18 | 1.434 | Grundbewehrung o+u |
| 8 | 86 | 4,15 | 8 | 356,9 | 0,02 | 141 | Grundbewehrung o+u |
| 9 | 594 | 0,542 | 8 | 321,9 | 0,02 | 127 | Kappen y-Richtung |
| 10 | 143 | 0,53 | 8 | 75,2 | 0,00 | 30 | Kappen x-Richtung |
| 11 | 1786 | 2,50 | 8 | 4.465,0 | 0,22 | 1.762 | Zulagebewehrung Feld |
| 12 | 1352 | 2,50 | 12 | 3.380,0 | 0,38 | 3.001 | Zulagebewehrung Stütz |
| 13 | 122 | 1,53 | 12 | 186,7 | 0,02 | 166 | Zulagebewehrung Stütz |
| Summe | 6207 | 81,70 | 112 | 30.986,7 | 1,77 | 14.060 [kg] 14,06 [t] | |

8.1.5 Holzbetonverbundflachdecke mit Stahlträgern

Randbedingungen:

- Geometrie:
 - Decke Stahlbeton $h = 12 \text{ cm}$, Brettsperrholz $h = 20 \text{ cm}$
 - Schubkernen $s_{\min} = 450 \text{ mm}$, $s_{\max} = 800 \text{ mm}$
 - Rand-/Innenträger gemäß Zeichnungen, $t_{OG} = t_{UG} = 20 \text{ mm}$, $t_{Steg} = 15 \text{ mm}$
- Material:
 - Deckenplatte: Betongüte C20/25 sowie Bewehrung, Holzgüte BSP C24
 - Rand-/Innenträger: Stahlgüte S235, Kammerbeton C20/25 sowie Bewehrung
- Betondeckung $c_{nom} = 2,5 \text{ cm}$
- Berechnung: tabellarisch als Einfeldträger nach dem γ -Verfahren
 - Belastungsbeginn nach 28 t
 - $T_{\infty} = 30.000 \text{ d}$, Nachweisführung für $t = 0$ und $t = \infty$
($t=3-7$ Jahre nicht betrachtet)
 - Berücksichtigung der zeitlichen Einwirkungen über Ersatzkraft p_{sID3}
 - KLED mittel, NKL 1
 - Kerne: $K_{ser} = 1.000.000 \text{ N/mm}$, Schubtragfähigkeit 310 kN

Bemessung:

- Maßgebender Nachweis: Schwingungsnachweis, Schubnachweis der Verbundfuge
- Verformung Decke und Stahlträger über Diagonale ($u_{\max, t\infty} = 33,2 \text{ mm}$)
- Schwingungsnachweis
 - Zum Zeitpunkt $t = \infty$ und demnach mit abgeminderten Steifigkeiten
 - Ohne Berücksichtigung der Steifigkeit des Estrichs
 - Unter Berücksichtigung der Nachgiebigkeit der Rand-/Innenträger (FE-Berechnung mit SOFiSTiK)
 - Steifigkeitskriterium $w(2\text{kN}) \leq w_{\text{grenz}} = 0,5 \text{ mm}$ (Bewertung 1,0 bis 1,5)
 - Randbedingungen falls $f_1 < 8 \text{ Hz}$
 - $f_1 \geq f_{1,\min} = 4,5 \text{ Hz}$
 - $a \leq a_{\text{grenz}} = 0,05 \text{ m/s}^2$ (Bewertung 1,0 bis 1,5)
 - Dämpfungsmaß: $2,5 \%$
 - $F(t, f_1) \approx 70 \text{ N}$
- Bewehrungswahl
 - Bewehrung $\emptyset 8/21$ oben und unten aus Rissbreiten
 - Zulagebewehrung: nicht erforderlich

Mengenermittlung:

Betonplatte

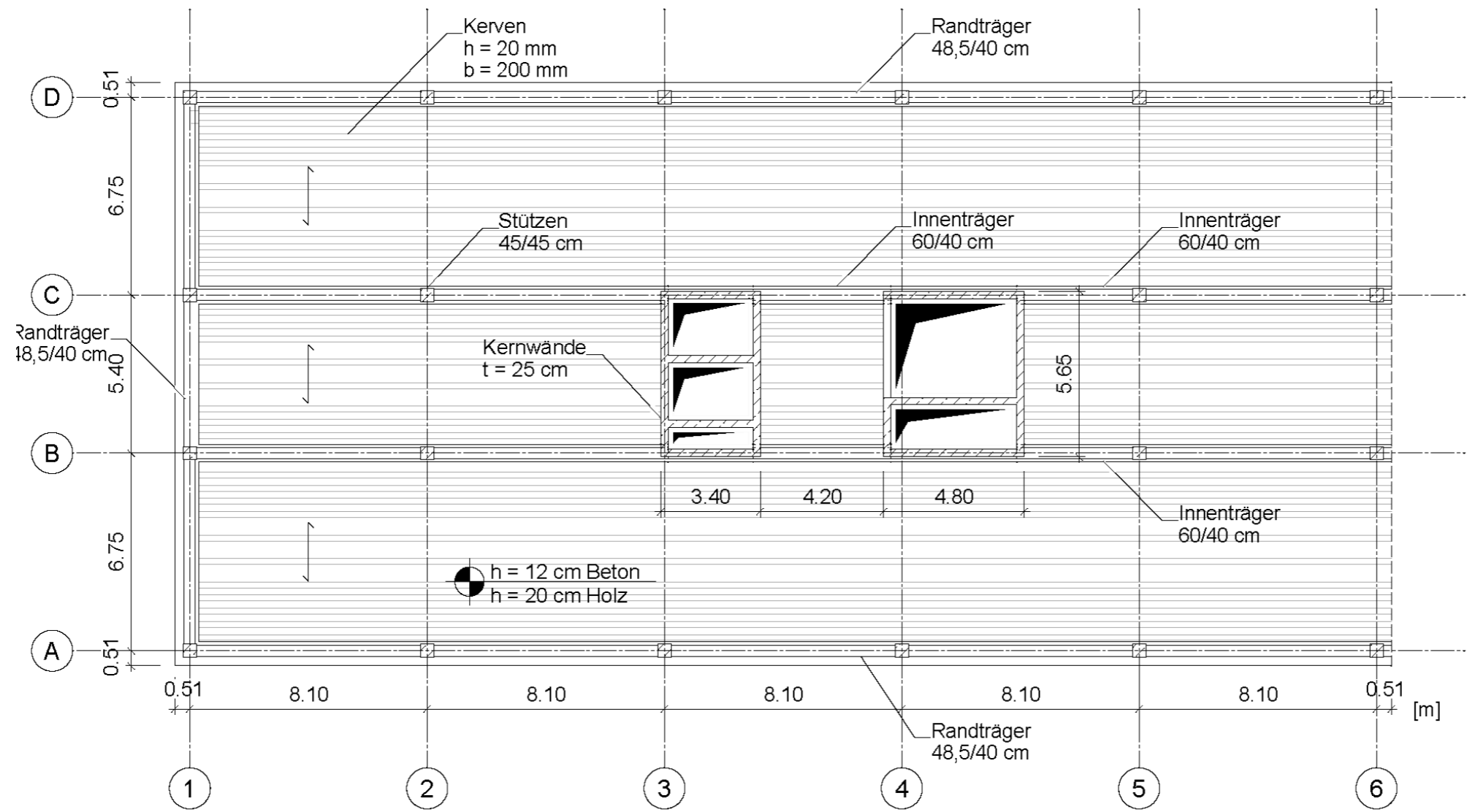
| | | |
|--|---------------|--|
| Bewehrung gesamt (Pos. 1-10) | 5,733 | t |
| Bewehrung je m²_{NGF} | 0,0073 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrungsvolumen je m ² _{NGF} | 0,0009 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Bruttovolumen Betonplatte | 94,3 | m ³ |
| Bruttovolumen Beton je m ² _{NGF} | 0,12 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Nettovolumen Beton je m²_{NGF} | 0,1191 | m³/m²_{NGF} |
| BSP-Volumen | 157,1 | m ³ |
| BSP-Volumen je m²_{NGF} | 0,2 | m³/m²_{NGF} |

Innenträger

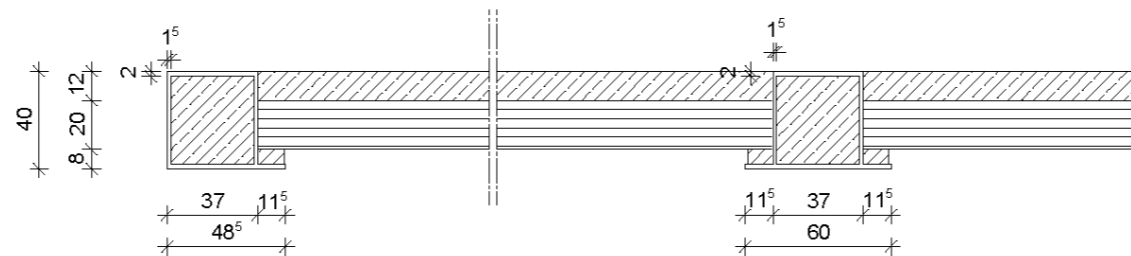
| | | |
|--|---------------|--|
| Gesamtgewicht Stahl | 15,315 | t |
| Gesamtgewicht Stahl je m²_{NGF} | 0,0195 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrung gesamt (Pos.11-20) | 1,47 | t |
| Bewehrung je m²_{NGF} | 0,0019 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrungsvolumen je m ² _{NGF} | 0,0002 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Bruttovolumen Beton (exkl. Betonplatte, Länge = 64,6 m) | 8,1396 | m ³ |
| Bruttovolumen Beton je m ² _{NGF} | 0,0103 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Nettovolumen Beton je m²_{NGF} | 0,0101 | m³/m²_{NGF} |

Randträger

| | | |
|--|---------------|--|
| Gesamtgewicht Stahl | 21,88 | t |
| Gesamtgewicht Stahl je m²_{NGF} | 0,0279 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrung gesamt (Pos.11-20) | 0,908 | t |
| Bewehrung je m²_{NGF} | 0,0012 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrungsvolumen je m ² _{NGF} | 0,0001 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Bruttovolumen Beton (exkl. Betonplatte, Länge = 99,9 m) | 13,3067 | m ³ |
| Bruttovolumen Beton je m ² _{NGF} | 0,0169 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Nettovolumen Beton je m²_{NGF} | 0,0168 | m³/m²_{NGF} |

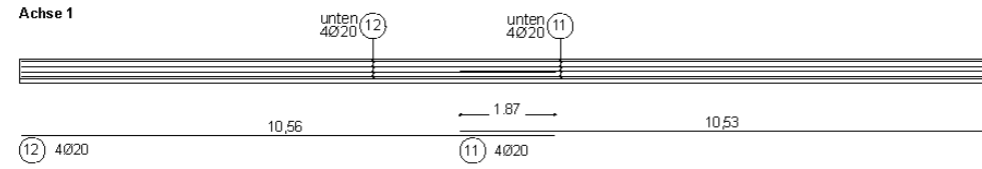


- Stahlbeton C20/25
- BSP C24

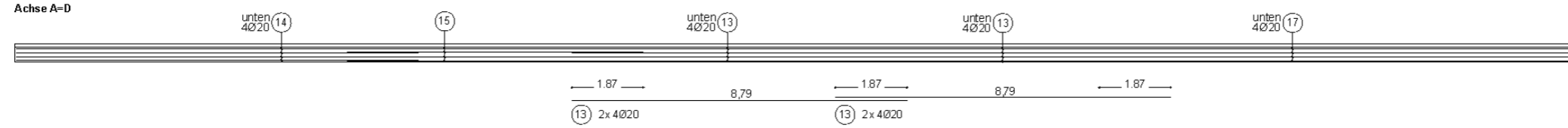


BALKENBEWEHRUNG

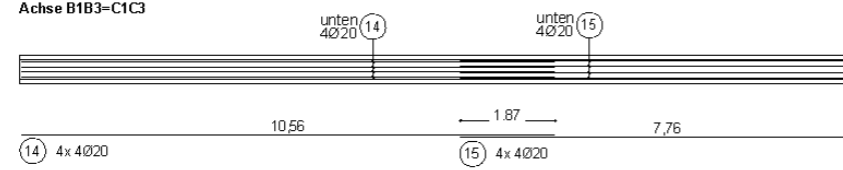
Achse 1



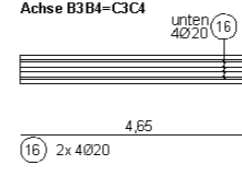
Achse A-D



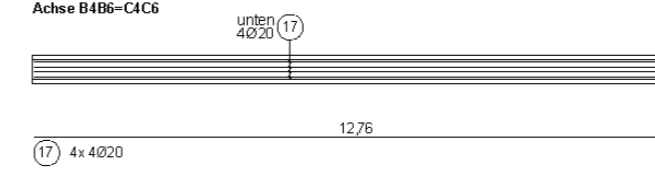
Achse B1B3-C1C3



Achse B3B4-C3C4



Achse B4B6-C4C6



Schnitt A-A (Randträger)



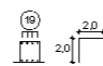
Schnitt B-B



Über Innen- und Randstützen
18x 4Ø16 L=4m



Über Eckstützen
2x 4Ø16 L=4m



Stahlliste HBV-Flachdecke

| POS. [-] | Stück [-] | Länge [m] | Ø [mm] | Gesamtlänge [m] | Gesamtvolumen [m³] | Gewicht [kg] | Bezeichnung |
|--------------|--------------|---------------|------------|--------------------|-----------------------|-----------------|--|
| 1 | 310 | 10,97 | 8 | 3.400,7 | 0,17 | 1.342 | Grundbewehrung o+u |
| 2 | 310 | 9,39 | 8 | 2.910,9 | 0,15 | 1.149 | Grundbewehrung o+u |
| 3 | 156 | 7,30 | 8 | 1.138,8 | 0,06 | 449 | Grundbewehrung o+u |
| 4 | 168 | 10,55 | 8 | 1.772,4 | 0,09 | 699 | Grundbewehrung o+u |
| 5 | 168 | 6,72 | 8 | 1.129,0 | 0,06 | 445 | Grundbewehrung o+u |
| 6 | 120 | 13,05 | 8 | 1.566,0 | 0,08 | 618 | Grundbewehrung o+u |
| 7 | 168 | 12,71 | 8 | 2.135,3 | 0,11 | 843 | Grundbewehrung o+u |
| 8 | 48 | 4,60 | 8 | 220,8 | 0,01 | 87 | Grundbewehrung o+u |
| 9 | 388 | 0,542 | 8 | 210,3 | 0,01 | 83 | Kappen y-Richtung |
| 10 | 84 | 0,53 | 8 | 44,2 | 0,00 | 17 | Kappen x-Richtung |
| 11 | 4 | 10,53 | 20 | 42,1 | 0,01 | 104 | Balkenbewehrung Achse 1 |
| 12 | 4 | 10,56 | 20 | 42,2 | 0,01 | 104 | Balkenbewehrung Achse 1 |
| 13 | 16 | 8,79 | 20 | 140,6 | 0,04 | 347 | Balkenbewehrung Achse AD |
| 14 | 16 | 10,56 | 20 | 169,0 | 0,05 | 417 | Balkenbewehrung Achse ABCD |
| 15 | 16 | 7,76 | 20 | 124,2 | 0,04 | 306 | Balkenbewehrung Achse ABCD |
| 16 | 8 | 4,65 | 20 | 37,2 | 0,01 | 92 | Balkenbewehrung Achse BC |
| 17 | 16 | 12,76 | 20 | 204,2 | 0,06 | 503 | Balkenbewehrung Achse ABCD |
| 18 | 72 | 4,00 | 16 | 288,0 | 0,06 | 455 | Stützbewehrungzulage Balken |
| 19 | 8 | 4,00 | 16 | 32,0 | 0,01 | 51 | Stützbewehrungzulage Balken Eckstützen |
| Summe | 2080 | 149,97 | 252 | 15.607,8 | 1,03 | 8.111 | [kg] |
| | | | | | | 8,11 | [t] |

8.1.6 Holzbetonverbundrippendecke mit Stahlträgern

Variante 1 – schlanke Deckenkonstruktion

Randbedingungen:

- Geometrie:
 - Deckeplatte Stahlbeton $h = 12 \text{ cm}$
 - Deckenrippen KVH $b/h = 18/22 \text{ cm}$, Achsabstand $62,5 \text{ cm}$
 - Rand-/Innenträger gemäß Zeichnungen, $t_{OG} = t_{UG} = 20 \text{ mm}$, $t_{Steg} = 15 \text{ mm}$
- Material:
 - Decke: Betongüte C20/25 sowie Bewehrung, Holzgüte KVH C30
 - Nägel SFS VB-48-7,5x165 unter 45°
 - 4 Stk pro Schnitt, $s_{min} = 160 \text{ mm}$, $s_{max} = 350 \text{ mm}$
 - Rand-/Innenträger: Stahlgüte S235, Kammerbeton C20/25 sowie Bewehrung
- Betondeckung $c_{nom} = 2,5 \text{ cm}$
- Berechnung: tabellarisch als Einfeldträger nach dem γ -Verfahren
 - Belastungsbeginn nach 28 t
 - $T_\infty = 30.000 \text{ d}$, Nachweisführung für $t = 0$ und $t = \infty$
($t = 3\text{-}7$ Jahre nicht betrachtet)
 - Berücksichtigung der zeitlichen Einwirkungen über Ersatzkraft p_{sID3}
 - KLED mittel, NKL 1
 - Nägel: $K_{ser} = 39.600 \text{ N/mm}$, Schubtragfähigkeit zweireihig 36 kN

Bemessung:

- Maßgebender Nachweis: Schwingungsnachweis
- Verformung Decke und Stahlträger über Diagonale ($u_{max, t_\infty} = 37 \text{ mm}$)
- Schwingungsnachweis
 - Zum Zeitpunkt $t = \infty$ und demnach mit abgeminderten Steifigkeiten
 - Ohne Berücksichtigung der Steifigkeit des Estrichs
 - Unter Berücksichtigung der Nachgiebigkeit der Rand-/Innenträger (FE-Berechnung mit SOFiSTiK)
 - Steifigkeitskriterium $w(2\text{kN}) \leq w_{grenz} = 0,5 \text{ mm}$ (Bewertung 1,0 bis 1,5)
 - $f_{Gehen} = 1,5 \text{ bis } 2,4 \text{ Hz} < f_1 = 3,5 \text{ Hz} < f_{1,min} = 4,5 \text{ Hz}$
 - Bewertung nach [83] $\geq 2,5$
- Bewehrungswahl
 - Bewehrung $\emptyset 8/21$ oben und unten aus Rissbreiten
 - Zulagebewehrung $\emptyset 8/15$ bzw. $\emptyset 8/21$

Mengenermittlung:

Betonplatte

| | | |
|--|---------------|--|
| Bewehrung gesamt (Pos. 1-10, 18) | 6,836 | t |
| Bewehrung je m²_{NGF} | 0,0087 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrungsvolumen je m ² _{NGF} | 0,0011 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Bruttovolumen Betonplatte | 94,3 | m ³ |
| Bruttovolumen Beton je m ² _{NGF} | 0,12 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Nettovolumen Beton je m²_{NGF} | 0,1189 | m³/m²_{NGF} |
| Nettovolumen Holz | 44 | m ³ |
| Nettovolumen Holz je m²_{NGF} | 0,0561 | m³/m²_{NGF} |

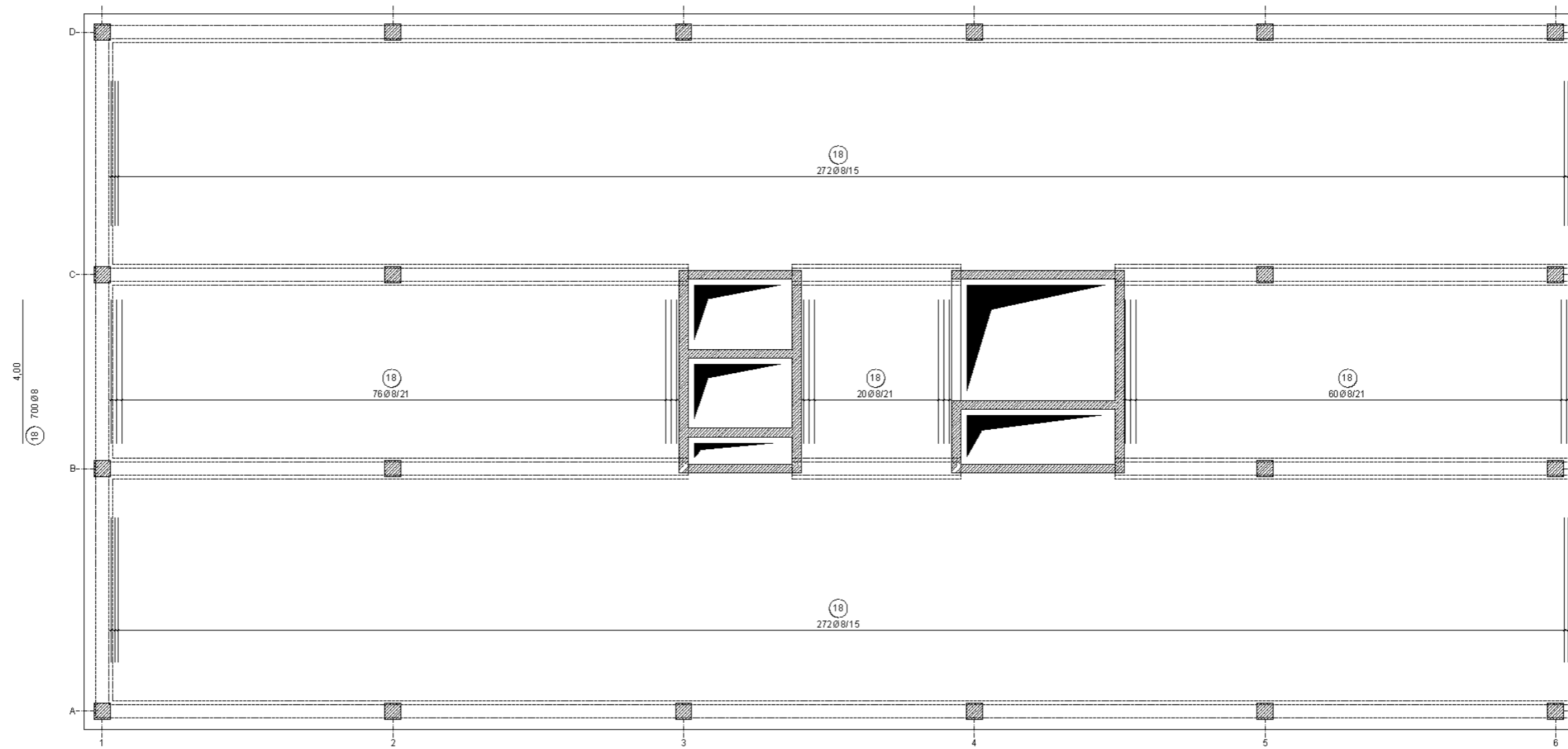
Innenträger

| | | |
|--|---------------|--|
| Gesamtgewicht Stahl | 14,503 | t |
| Gesamtgewicht Stahl je m²_{NGF} | 0,0185 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrung gesamt (Pos.11-17, 19, 20) | 1,47 | t |
| Bewehrung je m²_{NGF} | 0,0019 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrungsvolumen je m ² _{NGF} | 0,0002 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Bruttovolumen Beton (exkl. Betonplatte, Länge = 64,6 m) | 7,4419 | m ³ |
| Bruttovolumen Beton je m ² _{NGF} | 0,0095 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Nettovolumen Beton je m²_{NGF} | 0,0093 | m³/m²_{NGF} |

Randträger

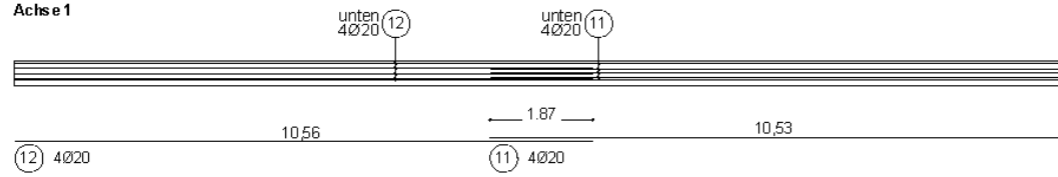
| | | |
|--|---------------|--|
| Gesamtgewicht Stahl | 20,782 | t |
| Gesamtgewicht Stahl je m²_{NGF} | 0,0265 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrung gesamt (Pos.11-17, 20, 21) | 0,908 | t |
| Bewehrung je m²_{NGF} | 0,0012 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrungsvolumen je m ² _{NGF} | 0,0001 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Bruttovolumen Beton (exkl. Betonplatte, Länge = 99,9 m) | 11,5085 | m ³ |
| Bruttovolumen Beton je m ² _{NGF} | 0,0147 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Nettovolumen Beton je m²_{NGF} | 0,0146 | m³/m²_{NGF} |

ZULAGEBEWEHRUNG UNTERE LAGE

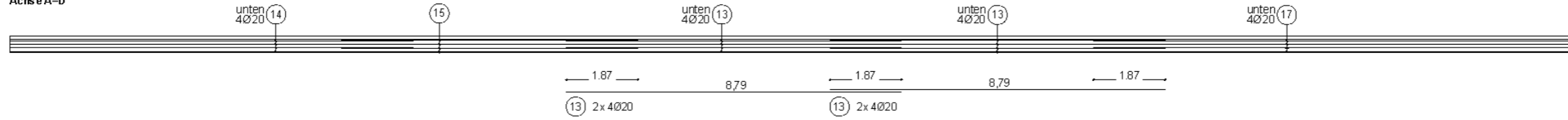


BALKENBEWEHRUNG

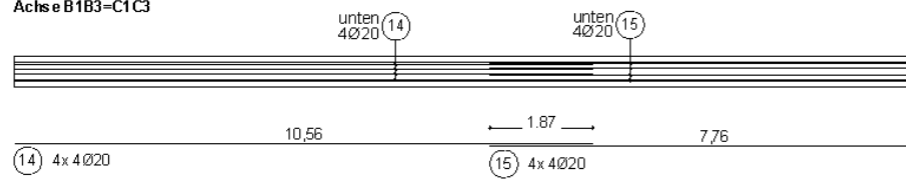
Achse 1



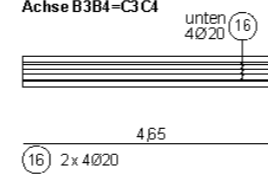
Achse A-D



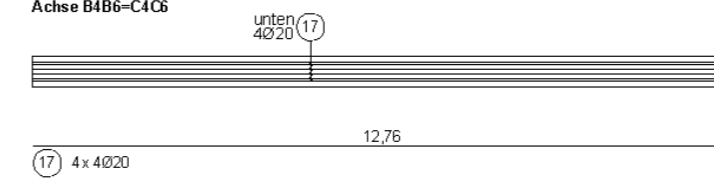
Achse B1B3-C1C3



Achse B3B4-C3C4



Achse B4B6-C4C6



Schnitt A-A (Randträger)



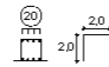
Schnitt B-B



Über Innen- und Randstützen
18x 4Ø16 L=4m



Über Eckstützen
2x 4Ø16 L=4m



Stahlliste HBV-Rippendecke (schlank)

| POS. [-] | Stück [-] | Länge [m] | Ø [mm] | Gesamtlänge [m] | Gesamtvolumen [m³] | Gewicht [kg] | Bezeichnung |
|--------------|--------------|---------------|------------|--------------------|-----------------------|-----------------|---------------------------------|
| 1 | 310 | 10,97 | 8 | 3.400,7 | 0,17 | 1.342 | Grundbewehrung o+u |
| 2 | 310 | 9,39 | 8 | 2.910,9 | 0,15 | 1.149 | Grundbewehrung o+u |
| 3 | 156 | 7,30 | 8 | 1.138,8 | 0,06 | 449 | Grundbewehrung o+u |
| 4 | 168 | 10,55 | 8 | 1.772,4 | 0,09 | 699 | Grundbewehrung o+u |
| 5 | 168 | 6,72 | 8 | 1.129,0 | 0,06 | 445 | Grundbewehrung o+u |
| 6 | 120 | 13,02 | 8 | 1.562,4 | 0,08 | 616 | Grundbewehrung o+u |
| 7 | 168 | 12,71 | 8 | 2.135,3 | 0,11 | 843 | Grundbewehrung o+u |
| 8 | 48 | 4,60 | 8 | 220,8 | 0,01 | 87 | Grundbewehrung o+u |
| 9 | 388 | 0,542 | 8 | 210,3 | 0,01 | 83 | Kappen y-Richtung |
| 10 | 84 | 0,53 | 8 | 44,2 | 0,00 | 17 | Kappen x-Richtung |
| 11 | 4 | 10,53 | 20 | 42,1 | 0,01 | 104 | Balkenbewehrung Achse 1 |
| 12 | 4 | 10,56 | 20 | 42,2 | 0,01 | 104 | Balkenbewehrung Achse 1 |
| 13 | 16 | 8,79 | 20 | 140,6 | 0,04 | 347 | Balkenbewehrung Achse AD |
| 14 | 16 | 10,56 | 20 | 169,0 | 0,05 | 417 | Balkenbewehrung Achse ABCD |
| 15 | 16 | 7,76 | 20 | 124,2 | 0,04 | 306 | Balkenbewehrung Achse ABCD |
| 16 | 8 | 4,65 | 20 | 37,2 | 0,01 | 92 | Balkenbewehrung Achse BC |
| 17 | 16 | 12,76 | 20 | 204,2 | 0,06 | 503 | Balkenbewehrung Achse ABCD |
| 18 | 700 | 4,00 | 8 | 2.800,0 | 0,14 | 1.105 | Zulagen |
| 19 | 72 | 4,00 | 16 | 288,0 | 0,06 | 455 | Stützbewehrungzulage |
| 20 | 8 | 4,00 | 16 | 32,0 | 0,01 | 51 | Stützbewehrungzulage Eckstützen |
| Summe | 2780 | 153,94 | 260 | 18.404,2 | 1,17 | 9.214 | [kg] |
| | | | | | | 9,21 | [t] |

Variante 2 – steife Deckenkonstruktion

Randbedingungen:

- Geometrie:
 - Deckeplatte Stahlbeton $h = 16 \text{ cm}$
 - Deckenrippen KVH $b/h = 20/30 \text{ cm}$, Achsabstand $62,5 \text{ cm}$
 - Rand-/Innenträger gemäß Zeichnungen, $t_{OG} = t_{UG} = 20 \text{ mm}$, $t_{Steg} = 15 \text{ mm}$
- Material:
 - Decke: Betongüte C20/25 sowie Bewehrung, Holzgüte KVH C30
 - Nägel SFS VB-48-7,5x165 unter 45°
 - 4 Stk pro Schnitt, $s_{\min} = 160 \text{ mm}$, $s_{\max} = 350 \text{ mm}$
 - Rand-/Innenträger: Stahlgüte S235, Kammerbeton C20/25 sowie Bewehrung
- Betondeckung $c_{\text{nom}} = 2,5 \text{ cm}$
- Berechnung: tabellarisch als Einfeldträger nach dem γ -Verfahren
 - Belastungsbeginn nach 28 t
 - $T_\infty = 30.000 \text{ d}$, Nachweisführung für $t = 0$ und $t = \infty$
($t = 3\text{-}7$ Jahre nicht betrachtet)
 - Berücksichtigung der zeitlichen Einwirkungen über Ersatzkraft p_{SID3}
 - KLED mittel, NKL 1
 - Nägel: $K_{\text{ser}} = 39.600 \text{ N/mm}$, Schubtragfähigkeit zweireihig 36 kN

Bemessung:

- Maßgebender Nachweis: Schwingungsnachweis
- Verformung Decke und Stahlträger über Diagonale ($u_{\max, t_\infty} = 37 \text{ mm}$)
- Schwingungsnachweis
 - Zum Zeitpunkt $t = \infty$ und demnach mit abgeminderten Steifigkeiten
 - Ohne Berücksichtigung der Steifigkeit des Estrichs
 - Unter Berücksichtigung der Nachgiebigkeit der Rand-/Innenträger (FE-Berechnung mit SOFiSTiK)
 - Steifigkeitskriterium $w(2\text{kN}) \leq w_{\text{grenz}} = 0,5 \text{ mm}$ (Bewertung 1,0 bis 1,5)
 - Randbedingungen falls $f_1 < 8 \text{ Hz}$
 - $f_1 \geq f_{1,\min} = 4,5 \text{ Hz}$
 - $a \leq a_{\text{grenz}} = 0,05 \text{ m/s}^2$ (Bewertung 1,0 bis 1,5)
 - Dämpfungsmaß: 2,5 %
 - $F(t, f_1) \approx 70 \text{ N}$
- Bewehrungswahl
 - Bewehrung $\text{Ø}8/16$ oben und unten aus Rissbreiten
 - Zulagebewehrung $\text{Ø}10/15$ bzw. $\text{Ø}8/19$

Mengenermittlung:Betonplatte

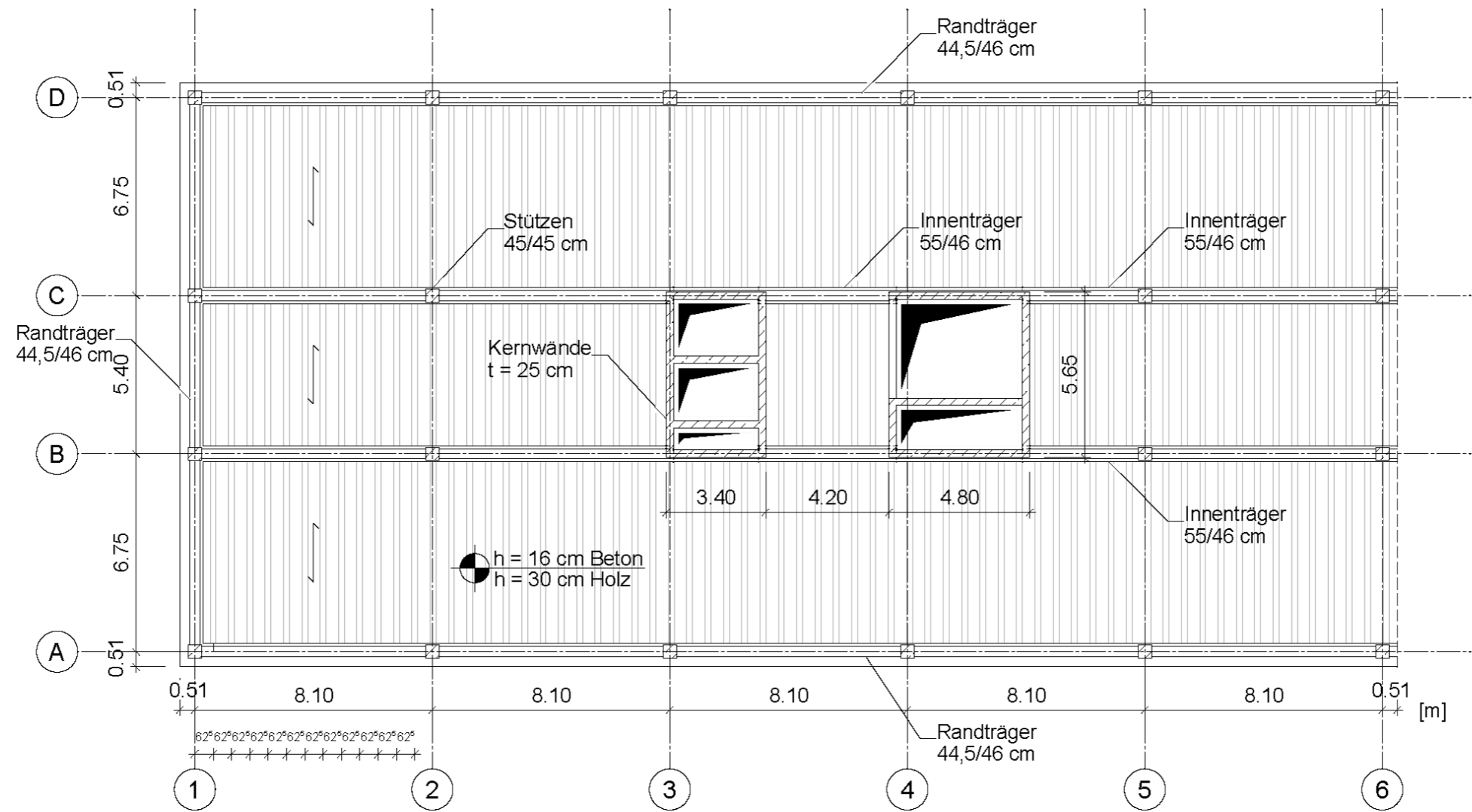
| | | |
|--|---------------|--|
| Bewehrung gesamt (Pos. 1-10, 18, 19) | 9,085 | t |
| Bewehrung je m²_{NGF} | 0,0116 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrungsvolumen je m ² _{NGF} | 0,0015 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Bruttovolumen Betonplatte | 125,7 | m ³ |
| Bruttovolumen Beton je m ² _{NGF} | 0,16 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Nettovolumen Beton je m²_{NGF} | 0,1585 | m³/m²_{NGF} |
| Nettovolumen Holz | 66,7 | m ³ |
| Nettovolumen Holz je m²_{NGF} | 0,0850 | m³/m²_{NGF} |

Innenträger

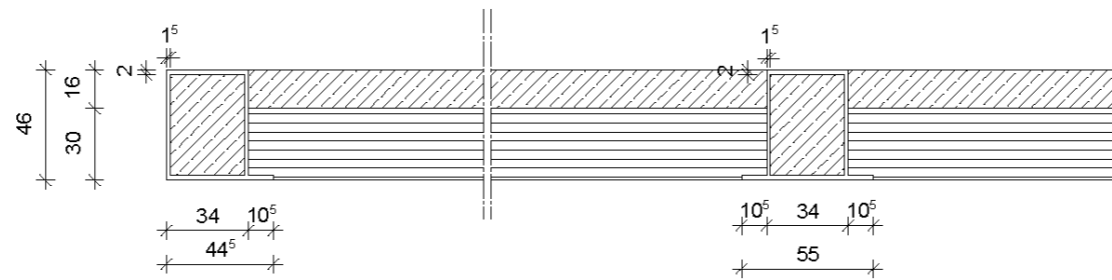
| | | |
|--|---------------|--|
| Gesamtgewicht Stahl | 15,416 | t |
| Gesamtgewicht Stahl je m²_{NGF} | 0,0196 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrung gesamt (Pos.11-17, 20, 21) | 1,47 | t |
| Bewehrung je m²_{NGF} | 0,0019 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrungsvolumen je m ² _{NGF} | 0,0002 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Bruttovolumen Beton (exkl. Betonplatte, Länge = 64,6 m) | 8,6822 | m ³ |
| Bruttovolumen Beton je m ² _{NGF} | 0,0110 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Nettovolumen Beton je m²_{NGF} | 0,0108 | m³/m²_{NGF} |

Randträger

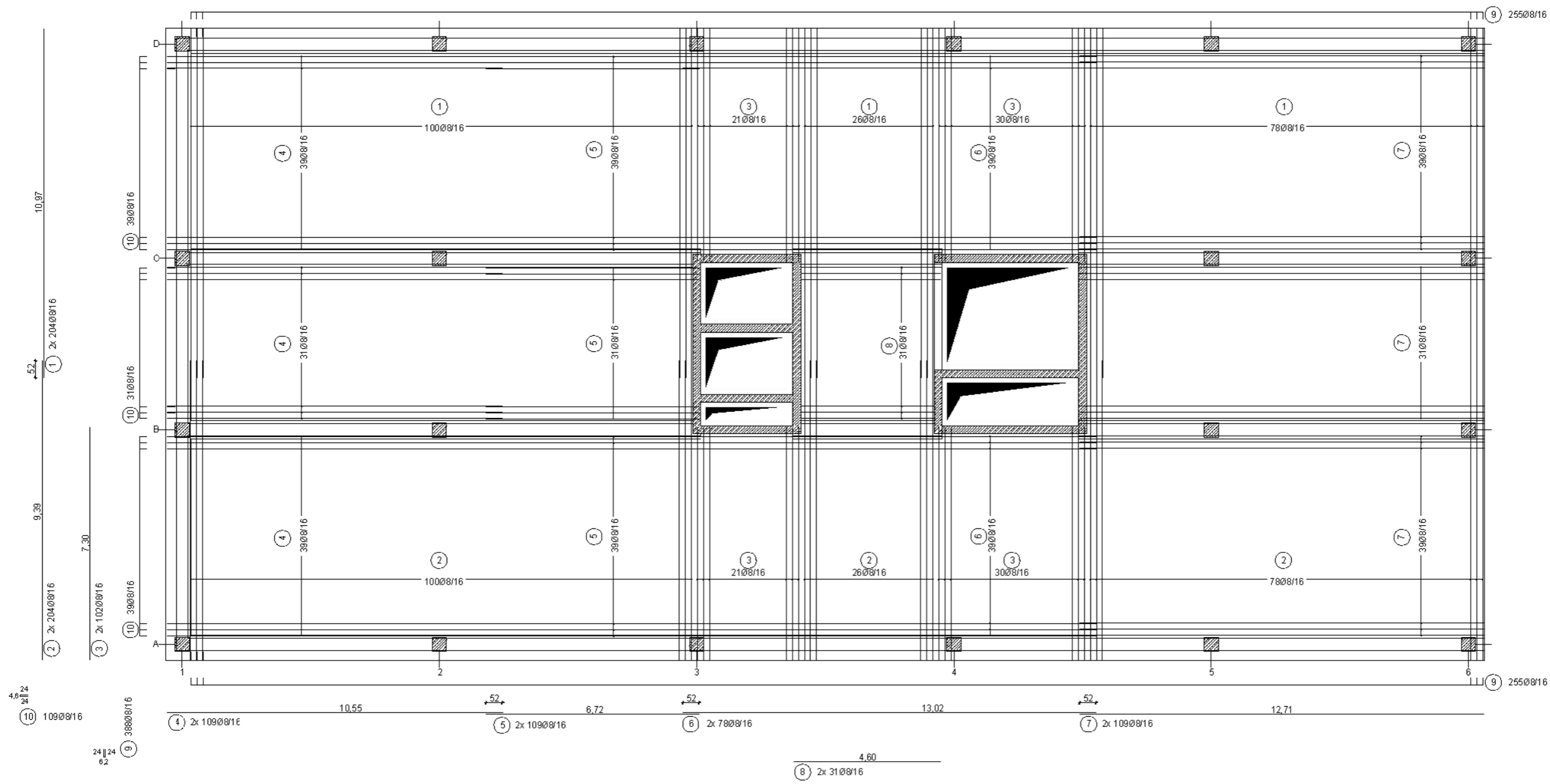
| | | |
|--|---------------|--|
| Gesamtgewicht Stahl | 22,193 | t |
| Gesamtgewicht Stahl je m²_{NGF} | 0,0012 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrung gesamt (Pos.11-17, 20, 21) | 0,908 | t |
| Bewehrung je m²_{NGF} | 0,0012 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrungsvolumen je m ² _{NGF} | 0,0001 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Bruttovolumen Beton (exkl. Betonplatte, Länge = 99,9 m) | 13,4266 | m ³ |
| Bruttovolumen Beton je m ² _{NGF} | 0,0171 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Nettovolumen Beton je m²_{NGF} | 0,0170 | m³/m²_{NGF} |



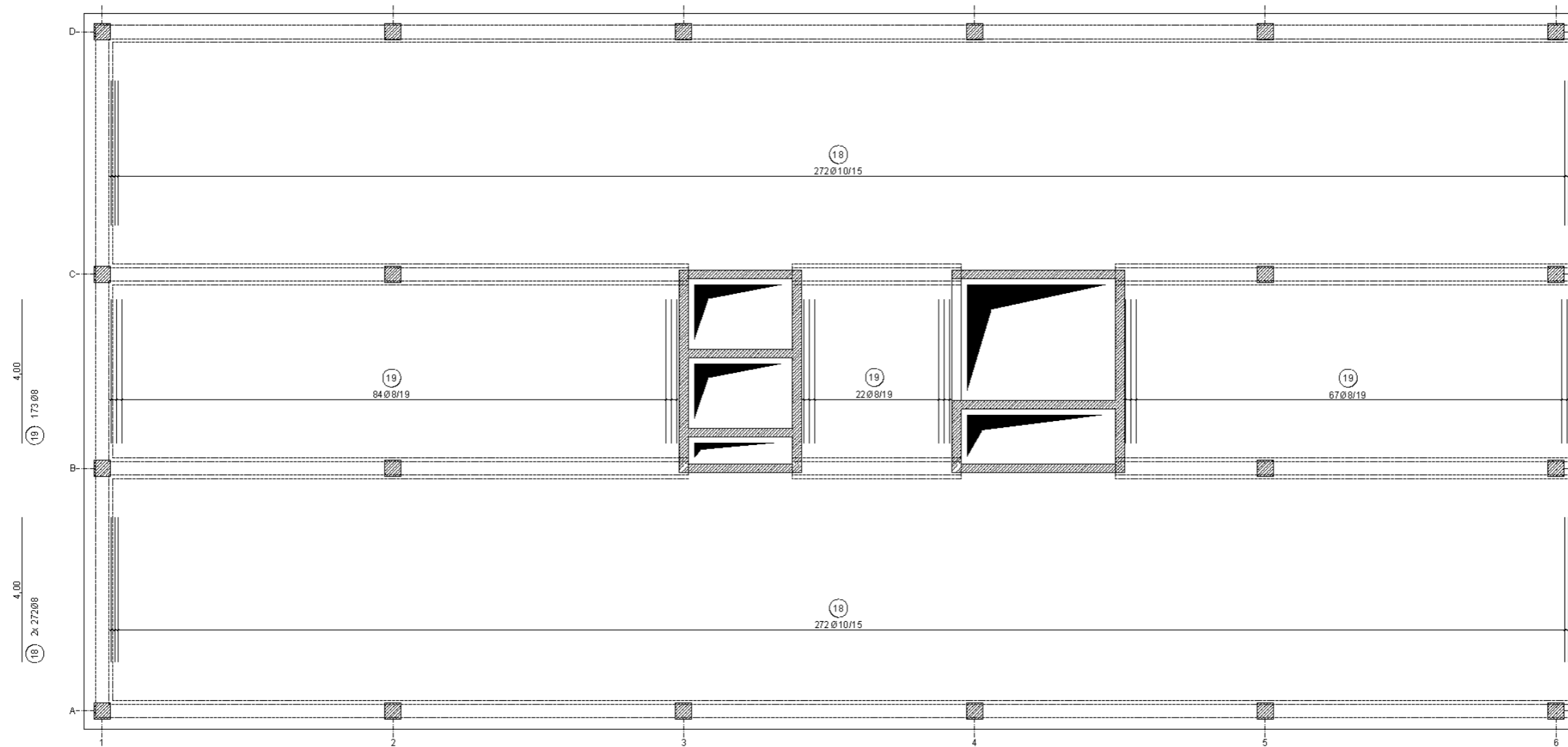
- Stahlbeton C20/25
- VH C30



UNTERE + OBERE BEWEHRUNGSLAGE

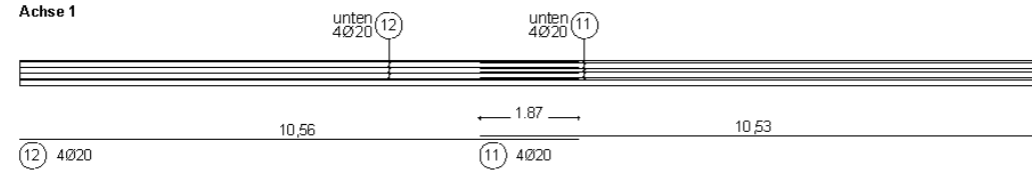


ZULAGEBEWEHRUNG UNTERE LAGE

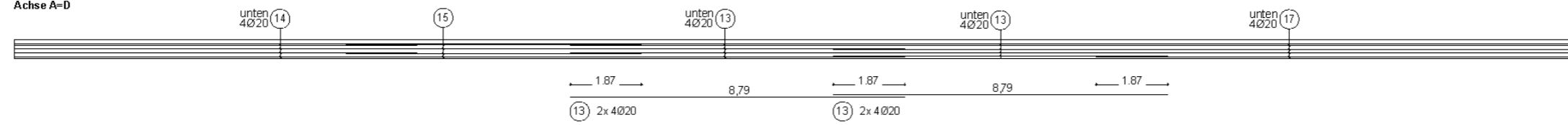


BALKENBEWEHRUNG

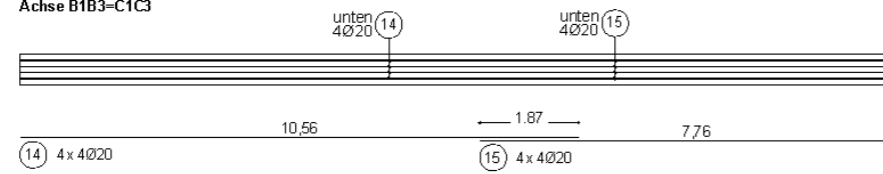
Achse 1



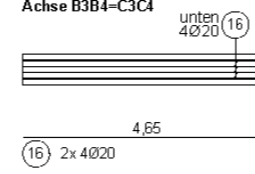
Achse A=D



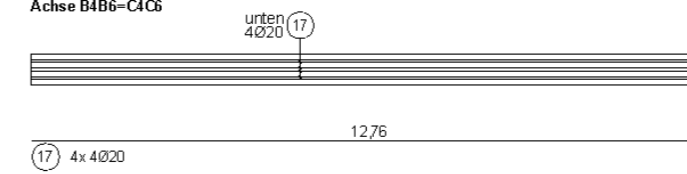
Achse B1B3=C1C3



Achse B3B4=C3C4



Achse B4B6=C4C6



Schnitt A-A (Randträger)



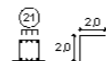
Schnitt B-B



Über Innen- und Randstützen
18x 4Ø16 L=4m



Über Eckstützen
2x 4Ø16 L=4m



Stahlliste HBV-Rippendecke (steif)

| POS. [-] | Stück [-] | Länge [m] | Ø [mm] | Gesamtlänge [m] | Gesamtvolumen [m³] | Gewicht [kg] | Bezeichnung |
|--------------|--------------|---------------|------------|--------------------|-----------------------|-----------------|---------------------------------|
| 1 | 408 | 10,97 | 8 | 4.475,8 | 0,22 | 1.766 | Grundbewehrung o+u |
| 2 | 408 | 9,27 | 8 | 3.782,2 | 0,19 | 1.492 | Grundbewehrung o+u |
| 3 | 204 | 7,30 | 8 | 1.489,2 | 0,07 | 588 | Grundbewehrung o+u |
| 4 | 218 | 10,55 | 8 | 2.299,9 | 0,12 | 908 | Grundbewehrung o+u |
| 5 | 218 | 6,72 | 8 | 1.465,0 | 0,07 | 578 | Grundbewehrung o+u |
| 6 | 156 | 13,02 | 8 | 2.031,1 | 0,10 | 801 | Grundbewehrung o+u |
| 7 | 218 | 12,71 | 8 | 2.770,8 | 0,14 | 1.093 | Grundbewehrung o+u |
| 8 | 62 | 4,60 | 8 | 285,2 | 0,01 | 113 | Grundbewehrung o+u |
| 9 | 510 | 0,542 | 8 | 276,4 | 0,01 | 109 | Kappen y-Richtung |
| 10 | 109 | 0,53 | 8 | 57,3 | 0,00 | 23 | Kappen x-Richtung |
| 11 | 4 | 10,53 | 20 | 42,1 | 0,01 | 104 | Balkenbewehrung Achse 1 |
| 12 | 4 | 10,56 | 20 | 42,2 | 0,01 | 104 | Balkenbewehrung Achse 1 |
| 13 | 16 | 8,79 | 20 | 140,6 | 0,04 | 347 | Balkenbewehrung Achse AD |
| 14 | 16 | 10,56 | 20 | 169,0 | 0,05 | 417 | Balkenbewehrung Achse ABCD |
| 15 | 16 | 7,76 | 20 | 124,2 | 0,04 | 306 | Balkenbewehrung Achse ABCD |
| 16 | 8 | 4,65 | 20 | 37,2 | 0,01 | 92 | Balkenbewehrung Achse BC |
| 17 | 16 | 12,76 | 20 | 204,2 | 0,06 | 503 | Balkenbewehrung Achse ABCD |
| 18 | 544 | 4,00 | 10 | 2.176,0 | 0,17 | 1.342 | Zulagen |
| 19 | 173 | 4,00 | 8 | 692,0 | 0,03 | 273 | Zulagen |
| 20 | 72 | 4,00 | 16 | 288,0 | 0,06 | 455 | Stützbewehrungzulage |
| 21 | 8 | 4,00 | 16 | 32,0 | 0,01 | 51 | Stützbewehrungzulage Eckstützen |
| Summe | 3388 | 157,82 | 270 | 22.880,3 | 1,46 | 11.463 | [kg] |
| | | | | | | 11,46 | [t] |

8.1.7 Brettsperrholzdecke mit Stahlträgern

Randbedingungen:

- Geometrie:
 - Decke Brettsperrholz $h = 28 \text{ cm}$ (7 Schichten à 4 cm, Brettlage 3 und 5 um 90° gedreht)
 - Rand-/Innenträger gemäß Zeichnungen, $t_{OG} = t_{UG} = 20 \text{ mm}$, $t_{Steg} = 15 \text{ mm}$
- Material:
 - Deckenplatte: Holzgüte BSP C24
 - Rand-/Innenträger: Stahlgüte S235, Kammerbeton C20/25 sowie Bewehrung
- Berechnung: tabellarisch als Einfeldträger nach Timoshenko
 - KLED mittel, NKL 1
 - Festigkeitswerte BSP gemäß [94]

Bemessung:

- Maßgebender Nachweis: Schwingungsnachweis
- Schwingungsnachweis
 - Ohne Berücksichtigung der Steifigkeit des Estrichs
 - Unter Berücksichtigung der Nachgiebigkeit der Rand-/Innenträger (FE-Berechnung mit SOFiSTiK)
 - Steifigkeitskriterium $w(2\text{kN}) \leq w_{\text{grenz}} = 0,5 \text{ mm}$ (Bewertung 1,0 bis 1,5)
 - Randbedingungen, da $f_1 < 8 \text{ Hz}$
 - $f_1 \geq f_{1,\text{min}} = 4,5 \text{ Hz}$
 - $a \leq a_{\text{grenz}} = 0,05 \text{ m/s}^2$ (Bewertung 1,0 bis 1,5)
 - Dämpfungsmaß: 2,5 %
 - $F(t, f_1) \approx 70 \text{ N}$

Mengenermittlung:Decke

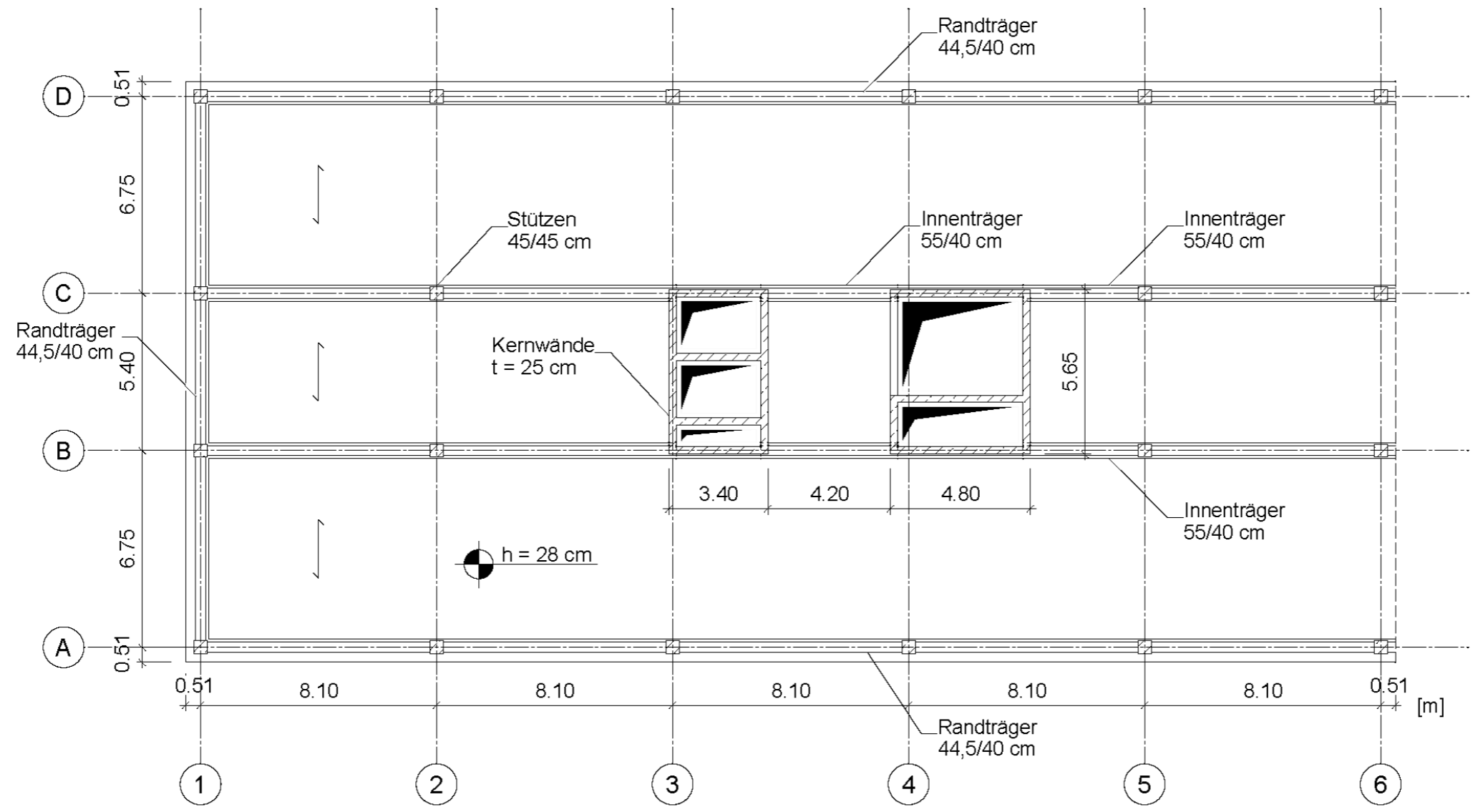
| | | |
|--|-------------|--|
| Nettovolumen BSP | 219,9 | m ³ |
| Nettovolumen BSP je m²_{NGF} | 0,28 | m³/m²_{NGF} |

Innenträger

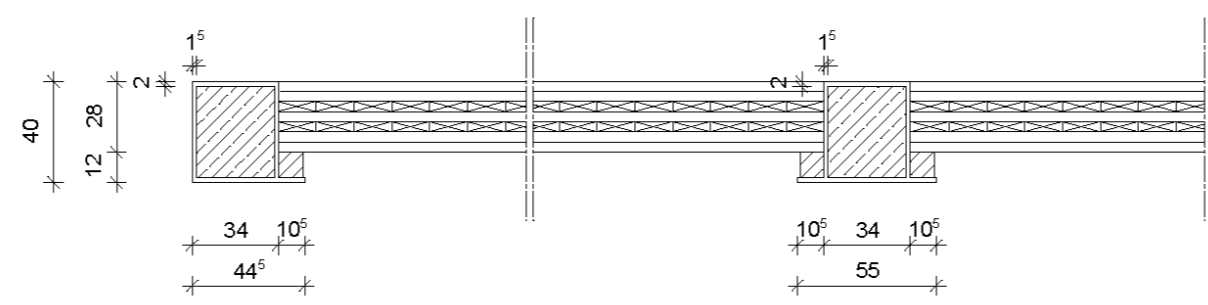
| | | |
|--|---------------|--|
| Gesamtgewicht Stahl | 14,605 | t |
| Gesamtgewicht Stahl je m²_{NGF} | 0,0186 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrung gesamt (Pos.14-18) | 1,47 | t |
| Bewehrung je m²_{NGF} | 0,0019 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrungsvolumen je m ² _{NGF} | 0,0002 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Bruttovolumen Beton (exkl. Betonplatte, Länge = 64,6 m) | 7,4419 | m ³ |
| Bruttovolumen Beton je m ² _{NGF} | 0,0095 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Nettovolumen Beton je m²_{NGF} | 0,0093 | m³/m²_{NGF} |

Randträger

| | | |
|--|---------------|--|
| Gesamtgewicht Stahl | 20,782 | t |
| Gesamtgewicht Stahl je m²_{NGF} | 0,0265 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrung gesamt (Pos.11-13, 19) | 0,908 | t |
| Bewehrung je m²_{NGF} | 0,0012 | t/m²_{NGF} |
| Bewehrungsvolumen je m ² _{NGF} | 0,0001 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Bruttovolumen Beton (exkl. Betonplatte, Länge = 99,9 m) | 11,5085 | m ³ |
| Bruttovolumen Beton je m ² _{NGF} | 0,0147 | m ³ /m ² _{NGF} |
| Nettovolumen Beton je m²_{NGF} | 0,0146 | m³/m²_{NGF} |

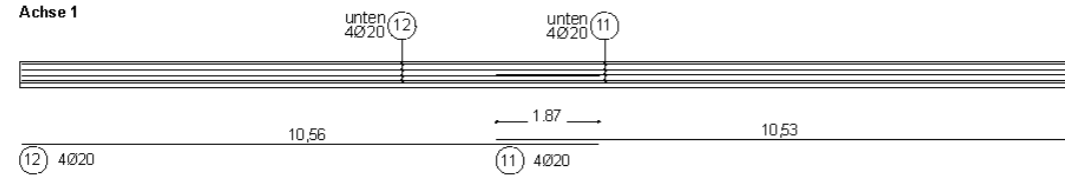


 BSP C24

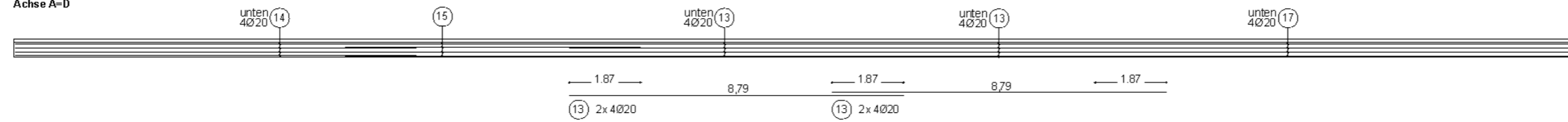


BALKENBEWEHRUNG

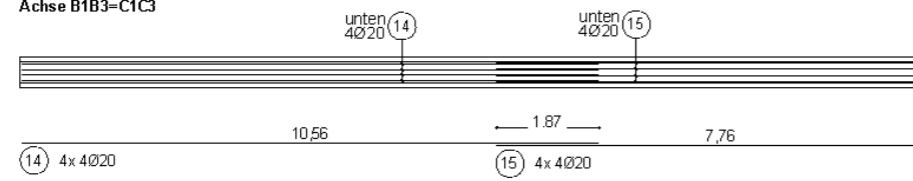
Achse 1



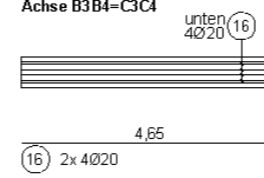
Achse A=D



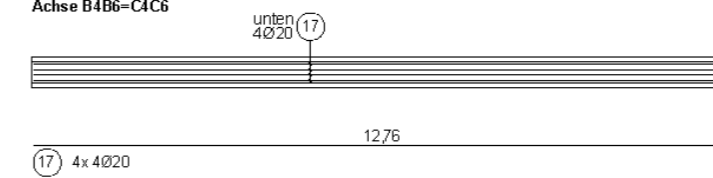
Achse B1B3=C1C3



Achse B3B4=C3C4



Achse B4B6=C4C6



Schnitt A-A (Randträger)



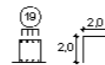
Schnitt B-B



Über Innen- und Randstützen
18x 4Ø16 L=4m



Über Eckstützen
2x 4Ø16 L=4m



Stahlliste BSP-Decke mit Stahlträgern

| POS. [-] | Stück [-] | Länge [m] | Ø [mm] | Gesamtlänge [m] | Gesamtvolumen [m³] | Gewicht [kg] | Bezeichnung |
|--------------|--------------|--------------|------------|--------------------|-----------------------|-----------------------------|--|
| 11 | 4 | 10,53 | 20 | 42,1 | 0,01 | 104 | Balkenbewehrung Achse 1 |
| 12 | 4 | 10,56 | 20 | 42,2 | 0,01 | 104 | Balkenbewehrung Achse 1 |
| 13 | 16 | 8,79 | 20 | 140,6 | 0,04 | 347 | Balkenbewehrung Achse AD |
| 14 | 16 | 10,56 | 20 | 169,0 | 0,05 | 417 | Balkenbewehrung Achse ABCD |
| 15 | 16 | 7,76 | 20 | 124,2 | 0,04 | 306 | Balkenbewehrung Achse ABCD |
| 16 | 8 | 4,65 | 20 | 37,2 | 0,01 | 92 | Balkenbewehrung Achse BC |
| 17 | 16 | 12,76 | 20 | 204,2 | 0,06 | 503 | Balkenbewehrung Achse ABCD |
| 18 | 72 | 4,00 | 16 | 288,0 | 0,06 | 455 | Stützbewehrungzulage Balken |
| 19 | 8 | 4,00 | 16 | 32,0 | 0,01 | 51 | Stützbewehrungzulage Balken Eckstützen |
| Summe | 160 | 73,61 | 172 | 1.079,5 | 0,30 | 2.378 2,38 | [kg] [t] |

8.1.8 Brettsper Holzdecke mit BSH-Trägern

Randbedingungen:

- Geometrie:
 - Decke Brettsper Holz h = 28 cm (7 Schichten à 4 cm, Brettlage 3 und 5 um 90° gedreht)
 - Rand-/Innenträger b/h = 45/75 cm
- Material:
 - Deckenplatte: Holzgüte BSP C24
 - Rand-/Innenträger: Holzgüte BSH GL24h
- Berechnung: tabellarisch als Einfeldträger nach Timoshenko
 - KLED mittel, NKL 1
 - Festigkeitswerte BSP gemäß [94]

Bemessung:

- Maßgebender Nachweis: Schwingungsnachweis
- Schwingungsnachweis
 - Ohne Berücksichtigung der Steifigkeit des Estrichs
 - Unter Berücksichtigung der Nachgiebigkeit der Rand-/Innenträger (FE-Berechnung mit SOFiSTiK)
 - Steifigkeitskriterium $w(2kN) \leq w_{\text{grenz}} = 0,5 \text{ mm}$ (Bewertung 1,0 bis 1,5)
 - Randbedingungen, da $f_1 < 8 \text{ Hz}$
 - $f_1 \geq f_{1,\text{min}} = 4,5 \text{ Hz}$
 - $a \leq a_{\text{grenz}} = 0,05 \text{ m/s}^2$ (Bewertung 1,0 bis 1,5)
 - Dämpfungsmaß: 2,5 %
 - $F(t, f_1) \approx 70 \text{ N}$

Mengenermittlung:

Decke

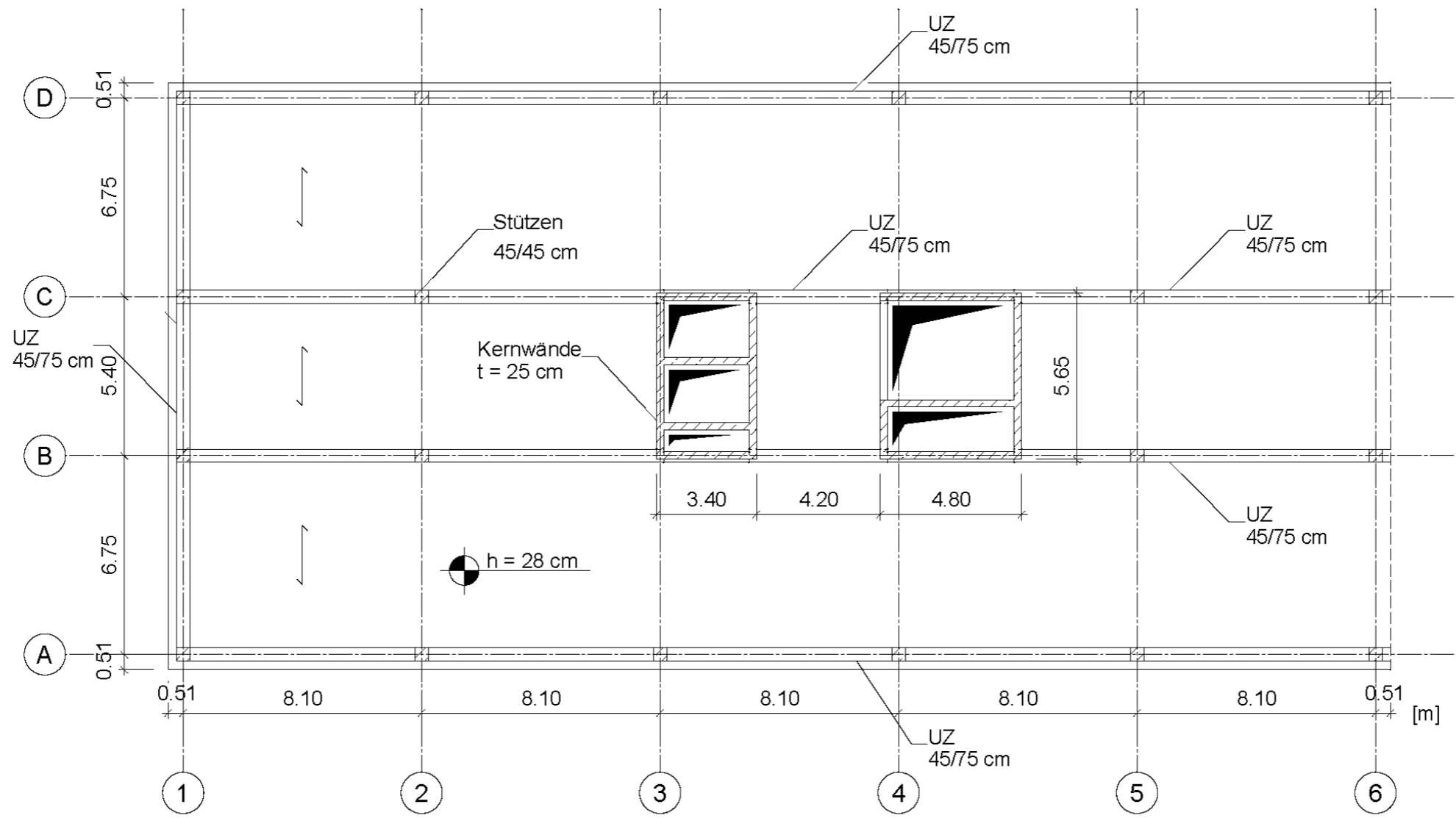
| | | |
|--|-------------|--|
| Nettovolumen BSP | 219,9 | m ³ |
| Nettovolumen BSP je m²_{NGF} | 0,28 | m³/m²_{NGF} |



BSH-Unterzug

| | | |
|--|-------------|--|
| Nettovolumen BSP (Länge = 145,6 m) | 49,12 | m ³ |
| Nettovolumen BSP je m²_{NGF} | 0,06 | m³/m²_{NGF} |

BSH-Randträger

| | | |
|--|-------------|--|
| Nettovolumen BSP (Länge = 18,9 m) | 6,3788 | m ³ |
| Nettovolumen BSP je m²_{NGF} | 0,01 | m³/m²_{NGF} |



-  BSP C24
-  Unterzüge BSH GL24h

März 2023

Technische Universität Dortmund
Lehrstuhl Tragkonstruktionen
August-Schmidt-Straße 6
44227 Dortmund