ECCS
CECM
E K S

Funded by
the European Union

EMPFEHLUNGEN ZUR WIEDERVERWENDUNG ZURÜCKGEWONNENER STAHLERZEUGNISSE

— Band 2: Empfehlungen zur Gestaltung von Gebäuden, um den Rückbau und die Wiederverwendung zu erleichtern —

Technischer Ausschuss 14
Nachhaltigkeit und Ökoeffizienz im Stahlbau,
im Rahmen des europäischen
RFCS-Projekts ADVANCE

ADV2-DE | 2025

ECCS TC14
Nachhaltigkeit und Ökoeffizienz im Stahlbau

Empfehlungen zur Wiederverwendung zurückgewonnener Stahlerzeugnisse

Band 2: Empfehlungen für die Gebäudeplanung zur Erleichterung von Rückbau und Wiederverwendung

2. Auflage, 2025

ECCS
CECM
E K S

Empfehlungen zur Wiederverwendung zurückgewonnener Stahlerzeugnisse

Band 2: Empfehlungen für die Gebäudeplanung zur Erleichterung von Rückbau und Wiederverwendung

Nº147, ADV2-DE, 2. Auflage, 2025

Herausgegeben von:
ECCS - Europäisches Übereinkommen für Stahlbauarbeiten
publications@steelconstruct.com
www.eccspublications.eu

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Publikation darf ohne vorherige Genehmigung des Urheberrechtsinhabers vervielfältigt, in einem Datenabfragesystem gespeichert oder in irgendeiner Form oder mit irgendwelchen Mitteln, elektronisch, mechanisch, durch Fotokopie, Aufzeichnung oder auf andere Weise, übertragen werden.

ECCS übernimmt keine Haftung für die Verwendung der Anwendung der in dieser Publikation enthaltenen Materialien und Informationen
in dieser Veröffentlichung.

Copyright © 2025 ECCS - Europäisches Übereinkommen für
konstruktiven Stahlbau

ISBN: 978-92-9147-205-5

Obwohl alle Sorgfalt darauf verwendet wurde, die Integrität und Qualität dieser Veröffentlichung und der darin enthaltenen Informationen zu gewährleisten, übernehmen die Projektpartner und der Herausgeber keine Haftung für Sach- oder Personenschäden, die sich aus der Verwendung dieser Veröffentlichung und der darin enthaltenen Informationen ergeben.

Die Vervielfältigung zu nichtkommerziellen Zwecken ist gestattet, sofern die Quelle angegeben und der Projektkoordinator benachrichtigt wird. Die Verbreitung dieser Publikation über andere Quellen als die unten angegebenen Websites bedarf der vorherigen Genehmigung der Projektpartner.

2023-2025
ADVANCE
ACCOMPANYING MEASURE FOR DISSEMINATION, VALORISATION AND COLLABORATIVE EXPLOITATION OF CIRCULARITY OF CONSTRUCTIONAL STEEL PRODUCTS

Diese Arbeit wurde von der Europäischen Union unter der Förderungsnummer 101112269 finanziert. Die darin zum Ausdruck gebrachten Ansichten und Meinungen sind jedoch ausschließlich die des Autors/der Autoren und spiegeln nicht unbedingt die der Europäischen Union oder [Name der Bewilligungsbehörde] wider. Weder die Europäische Union noch die Bewilligungsbehörde können für sie verantwortlich gemacht werden.

Funded by the European Union

VORWORT

Die Verwendung zurückgewonnener Stahlbauteile bei einem Projekt ist eine effektive Strategie zur Verringerung der Umweltauswirkungen eines Gebäudes, da die erforderliche Energie für das Recycling von Stahlbauteilen zu neuen Produkten durch Einschmelzen des Materials entfällt. Das Forschungsprojekt *PROGRESS* (*Provisions for a greater reuse of steel structures*) konzentrierte sich auf eingeschossige Stahlgebäude und identifizierte verschiedene Wiederverwendungsszenarien. Es zeigte auch, wie durchdachte Konstruktionsmaßnahmen die Wiederverwendung der Struktur oder ihrer Hauptkomponenten erleichtern können. Im Rahmen des Forschungsprojekts ADVANCE (*Accompanying measure for dissemination, valorisation and collaborative exploitation of circularity of constructional steel products*) wurde die Arbeit von eingeschossigen auf mehrgeschossige Gebäude ausgeweitet. Der zusätzliche Inhalt ist in dieser zweiten Ausgabe der Empfehlungen zur Wiederverwendung zurückgewonnener Stahlerzeugnisse enthalten.

Diese Empfehlungen behandeln die wichtigsten Aspekte, die Konstrukteure berücksichtigen müssen, um eine verstärkte Wiederverwendung von Stahlkonstruktionen zu ermöglichen, und stellen außerdem Beispiele für eine erfolgreiche strukturelle Wiederverwendung vor. Die Empfehlungen legen die Anforderungen an die funktionale Wiederverwendbarkeit dar, gehen jedoch nicht in allen Einzelheiten auf die wirtschaftliche Machbarkeit oder die ökologischen Vorteile der Wiederverwendung ein.

Der Anwendungsbereich der Wiederverwendung von Baustahl ist auf Folgendes beschränkt:

- Die wiederzuverwendenden Bauteile sollten keine Beschädigungen aufweisen, einschließlich plastischer Verformungen, sowie Querschnittsverminderungen (z. B. durch Löcher, Öffnungen, Risse oder übermäßige Korrosion),
- Alle wiederzuverwendenden Bauteile sollten aus einem Bauwerk stammen, das mit Elementen gebaut wurde, die ab 1970 produziert wurden, d. h. etwa zu dem Zeitpunkt, als Bemessung nach Grenzzuständen gängige Praxis wurde,
- Alle zurückgewonnenen Primärteile sind Walzprofile aus Stahl. Geschweißte und zusammengesetzte Bauteile sind nicht Gegenstand dieses Dokuments,
- Für die Wiederverwendung der Bauteile müssen diese möglichst in ihrer ursprünglichen Form zurückgewonnen werden, auch wenn gegebenenfalls zusätzliche Verarbeitungs- und Vorbereitungsarbeiten erforderlich sind.

Die Empfehlungen sind in drei Bände unterteilt:

Band 1: Wiederverwendung bestehender Stahlerzeugnisse und Gebäude,
Band 2: Empfehlungen zur Gestaltung von Gebäuden, um den Rückbau und die Wiederverwendung zu erleichtern,
Band 3: Umweltaspekte und praktische Umsetzung.

Band 1 erörtert allgemeine technische Fragestellungen im Zusammenhang mit der baulichen Nutzung von wiederverwendetem Stahl aus bestehenden Stahl- und Stahl-Beton-Verbundkonstruktionen. Er enthält eine kurze Beschreibung des Aufbausein- und mehrgeschossiger Gebäude, eine Klassifizierung verschiedener Wiederverwendungsszenarien, einen historischen Überblick über europäische Regelwerke und Produktnormen, die Auswahl und Akzeptanz von Materialien, sowie deren Klassifizierung für "neue" Entwürfe gemäß den Eurocodes. Außerdem werden Aspekte der Tragwerksplanung im Hinblick auf die Grundsätze der Grenzzustände behandelt. Ein Protokoll für die Zustandsbewertung, Probenahme und Prüfung von zurückgewonnenem Stahl ist in Anhang A enthalten. Die Herleitung des modifizierten Teilsicherheitsbeiwerts für die Knickfestigkeit wiederverwendeter Stahlbauteile wird in Anhang B dargestellt.

Band 2 befasst sich mit dem Entwurf neuer Gebäude unter Berücksichtigung der Funktionalität, der einfachen Herstellung, der Demontierbarkeit, der späteren Wiederverwendung sowie der Ästhetik. Es werden allgemeine Grundsätze für die Planung der Demontage und Wiederverwendung von Stahlkonstruktionen dargelegt. Des Weiteren definiert der Band die Lasten und Einwirkungskombinationen, die bei der statischen Berechnung anzuwenden sind, und schlägt allgemeine Verbesserungen von konstruktiven Details vor, die eine spätere Wiederverwendung erleichtern.

Band 3 enthält eine Bewertung der Umweltvorteile der Wiederverwendung von Stahlbauteilen und bietet Informationen zu praktischen Aspekten der Herstellung und Errichtung von Konstruktionen aus wiederverwendetem Stahl. Im letzten Abschnitt dieses Bandes werden mehrere Fallstudien vorgestellt, die die Verwendung von Stahlkonstruktionen aus zurückgewonnenem Stahl in verschiedenen EU-Ländern veranschaulichen und einige der dabei überwundenen technischen Herausforderungen aufzeigen.

Die Mitglieder der Projektkonsortien PROGRESS und ADVANCE, die zu diesem Dokument beigetragen haben, sind:

Petr Hradil	Finnland	Véronique Dehan	Belgien
Ludovic Fülöp	Finnland	Francis Grogna	Belgien
Sirje Vares	Finnland	Carlos del Castillo	Belgien
Margareta Wahlström	Finnland	Helena Gervasio	Portugal
Tiina Vainio-Kaila	Finnland	Luis da Silva	Portugal
Michael Sansom	Vereinigtes Königreich	Ari Ilomäki	Finnland
Ana M. Girão Coelho	Vereinigtes Königreich	Teemu Tiainen	Finnland
Ricardo Pimentel	Vereinigtes Königreich	Timo Koivisto	Finnland
Mark Lawson	Vereinigtes Königreich	Jyrki Kesti	Finnland
Viorel Ungureanu	Rumänien	Břetislav Židlický	Tschechische Republik
Raluca Buzatu	Rumänien	František Wald	Tschechische Republik
Ioan Both	Rumänien	André Beyer	Frankreich
Dan Dubina	Rumänien	Amor Ben Larbi	Frankreich
Markus Kuhnhenne	Deutschland	Peetu Hirvonen	Finnland
Dominik Pyschny	Deutschland	Maria Carrubba	Deutschland
Kevin Janczyk	Deutschland	Jie Yang	Luxemburg
Paul Kamrath	Deutschland	José Humberto Matias de Paula Filho	Luxemburg

INHALTSVERZEICHNIS

1 Einleitung 11

1.1 Umfang dieser Veröffentlichung 11

1.2 Begriffe und Definitionen 11

2 Empfehlungen für zukünftige Gebäude 15

2.1 Allgemeine Grundsätze für das Design zur Demontage und Wiederverwendung 15

2.1.2 Wesentliche Entwurfsprinzipien 16

2.1.3 Strategien während der Bauphase 17

2.1.4 Planung für die Nachnutzung und das Lebensende 17

2.2 Standardisierung 17

2.3 Bewährte Verfahren für die Analyse und Bemessung von eingeschossigen Stahlgebäuden 21

2.3.1 Typische Detaillösungen für Rahmenkonstruktionen 21

2.3.2 Aussteifungssysteme 21

2.3.3 Giebelrahmen 23

2.3.4 Globalanalyse 23

2.3.5 Verhalten von Verbindungen 23

2.3.6 Nachweis zur Stabilität von Bauteilen 24

2.3.7 Spannungsnachweise 25

2.3.8 Durchbiegungsnachweise 25

2.3.9 Fachwerklösungen 25

2.4 Bewährte Verfahren für die Analyse und Bemessung von mehrgeschossigen Stahlgebäuden 26

2.4.1 Typische Tragwerksysteme 26

2.4.2 Globalanalyse 27

2.5 Dauerhaftigkeit 29

2.6 Dokumentation, Identifizierung und Rückverfolgbarkeit bei Wiederverwendung 29

2.6.1 Gebäudepass 29

2.6.2 Buildig Information Modelling 30

2.6.3 Rückverfolgbarkeit von Stahlprodukten für eine zukünftige Wiederverwendung 31

3 Lastannahmen und einwirkungsKombinationen für neue Gebäude 34

3.1 Charakteristische Werte der Einwirkungen 34

3.1.1 Dachlasten 34

3.1.2 Lasten auf Zwischengeschossen und Decken in mehrgeschossigen Gebäuden 36

3.1.3 Schneelasten 37
3.1.4 Windlasten 39
3.1.5 Leitfaden zur Anwendung der Wind- und Schneelastklassen 42
3.1.6 Anpassung charakteristischer Lastwerte in Abhängigkeit der Wiederkehrperiode 42
3.1.7 Thermische Einwirkung 45
3.2 Kombinationen von Einwirkungen 46
4 Wiederverwendung durch Planung und verbesserte Konstruktionsdetails 48
4.1 Tragwerksplanung für eingeschossige Stahlgebäude 48
4.2 Standardisierung im eingeschossigen Stahlbau 49
4.2.1 Möglichkeiten der Wiederverwendung von Rahmenkonstruktionen 49
4.2.2 Standard-Rahmenkonstruktionen mit geschweißten Trauf- und Firstsegmenten 51
4.2.3 Rahmenkonstruktion - Träger mit geschraubter Voute 52
4.2.4 Rahmenkonstruktion mit Eckstrebe 53
4.3 Anschluss der Stützen an die Fundamente 54
4.4 Wiederverwendbare Fachwerklösungen 55
4.5 Ausgesteifte kastenförmige Tragwerke 57
4.6 Zwischengeschosse 58
4.7 Sekundärtragwerk und Verkleidungen 61
4.7.1 Sekundärtragwerk 61
4.7.2 Alternative Systeme für Sekundärtragwerke 62
4.7.3 Verkleidung 63
4.7.4 Verwendung vorgefertigter Leichtbaukassetten in Rahmenkonstruktionen 65
4.8 Tragwerksplanung für mehrgeschossige Stahlkonstruktionen 68
4.8.1 Standardisierung von mehrgeschossigen Stahlkonstruktionen 68
4.8.2 Leitfaden für mehrgeschossige Stahlkonstruktionen 69
5 zusammenfassung und fazit 81
Referenzen 83

ANMERKUNG

Lateinische Kleinbuchstaben

c_{dir}	Richtungsbeiwert für Windlastberechnungen
c_{prob}	Wahrscheinlichkeitsbeiwert
c_{r}	Rauigkeitsbeiwert
c_{season}	Jahreszeitenbeiwert für Windlastberechnungen
c_0	Topographiebeiwert
h_{c}	Querschnittstiefe von Stützen
h_{b}	Querschnittstiefe von Trägern / Sparren
h_{h}	Voutenhöhe
m	Mittelwert einer Gruppe
n	Exponent
p	Jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit der 10-minütigen mittleren Windgeschwindigkeit
q	Gleichmäßig verteilte Last
q_{b}	Mittlerer Bezugsgeschwindigkeitsdruck
q_{p}	Spitzengeschwindigkeitsdruck
q_{t}	Angepasster charakteristischer Wert der veränderlichen Einwirkung für die Bemessungslebensdauer
q_{t0}	Charakteristischer Wert der veränderlichen Einwirkung für eine Bemessungslebensdauer von 50 Jahren
s	Schneelast auf dem Dach
s_{k}	Charakteristischer Wert der Schneelast auf dem Boden am jeweiligen Standort
s_{n}	Schneelast auf dem Boden mit einer Wiederkehrperiode von n Jahren
t	Zielbemessungslebensdauer
t_0	Standard-Bemessungslebensdauer von 50 Jahren
v_{b}	Basiswindgeschwindigkeit
$v_{\mathrm{b,0}}$	Grundwert der Basiswindgeschwindigkeit
$v_{\mathrm{b,class}}$	Basiswindgeschwindigkeit für europäische Klasse
v_{m}	Mittlere Windgeschwindigkeit

z	Höhe über Grund

Lateinische Großbuchstaben

C_{e}	Umgebungsbeiwert für Schneelastberechnungen
C_{esl}	Beiwert für außergewöhnliche Schneelasten
C_{t}	Temperaturbeiwert für Schneelastberechnungen
G	Dauerhafte Einwirkung
$G_{\mathrm{k,h}}$	Günstige ständige Einwirkung h
I_{v}	Turbulenzintensität
K	Beiwert der Schwingungsform; Schwingungsform Parameter
K_{FI}	Multiplikationsbeiwert
$K_{\gamma M1}$	Korrekturfaktor
L	Spannweite
L_{column}	Länge der Säulen
L_{h}	Länge der Voutensegmente
L_{a}	Länge der Apex-Segmente
P_{n}	Jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit
Q	Veränderliche Einzellast, veränderliche Einwirkung
$Q_{\mathrm{k,1}}$	Führende veränderliche Einwirkung
$Q_{\mathrm{k},j}$	Weitere veränderliche Einwirkung *i*
S	Europäische Schneelastzone I;
V_{x}	Variationskoeffizient
W_i	Europäische Windzone i

Griechische Buchstaben und Symbole

α	Linearer thermischer Ausdehnnungskoeffizient
β	Zuverlässigkeitsindex
γ_{M1}	Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand der Bauteile bei Stabilitätsversagen
$\gamma_{\mathrm{M1,mod}}$	Modifizierter Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand der Bauteile bei Stabilitätsversagen
μ_{i}	Formbeiwert für Schneelasten
ρ	Luftdichte

ψ_0 Kombinationsbeiwert für veränderliche Einwirkung

$\psi_{(0,)\,(i)}$ Kombinationsbeiwert für die veränderliche Einwirkung *i*

Teilstriche

d Bemessungswert

k Charakteristischer Wert

Abkürzungen

CC Schadensfolgeklasse

CEN Europäisches Komitee für Normung

CEV Kohlenstoffäquivalent

DCL Systeme mit niedriger Duktilitätsklasse für seismische Bemessung nach EN 1998-1

DfD Design für den Rückbau

STR Bemessungswerte der Einwirkungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Tragwerks- oder Querschnittsversagen

EHF Äquivalente Horizontalkräfte

EN Europäische Norm

ETA Europäische Technische Bewertung

EU Europäische Union

EXC Ausführungsklasse(n)

hEN Harmonisierte Europäische Norm

ID Identifikation; Identität.

NA Nationaler Anhang

RHS Rechteckige Hohlprofile

SLS Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

STC Stahl-Holz-Verbundsystem

STR Bemessungswerte der Einwirkungen für die Festigkeit

ULS Grenzzustand der Tragfähigkeit

Achsen

x Längsachse entlang des Bauteils

y Hauptachse (parallel zu den Flanschen)

z Nebenachse (parallel zum Steg)

1 EINLEITUNG

1.1 Umfang dieser Veröffentlichung

Dieser zweite Band der *Empfehlungen zur Wiederverwendung rückgewonnener Stahlerzeugnisse*) bietet gezielte Planungshinweise, die den künftigen Rückbau und die Wiederverwendung von Stahlelementen im Hochbau erleichtern sollen. Im Einklang mit den Grundsätzen der Kreislaufwirtschaft und den Nachhaltigkeitszielen behandelt der Leitfaden die Planung neuer Gebäude, einschließlich eingeschossiger Industrie- sowie mehrgeschossiger Wohn- oder Bürogebäude, wobei der Schwerpunkt auf Modularität, Demontierbarkeit und Langlebigkeit des Materials liegt.

Er stellt praxisorientierte Strategien für den Entwurf von Tragwerken vor, welche das Wiederverwendungspotenzial von Stahlbauteilen durch Standardisierung, effiziente Konstruktionsdetails und die bevorzugte Verwendung lösbarer mechanischer Verbindungen anstelle von dauerhaften Schweißverbindungen maximieren.

Die Publikation betont die frühzeitige Integration von Rückbauaspekten in die Planung, eine sorgfältige Materialauswahl sowie umfassende Dokumentationsverfahren, einschließlich der Verwendung von Building Information Modelling (BIM) für eine langfristige Rückverfolgbarkeit.

Darüber hinaus enthält sie technische Empfehlungen zu Lastkombinationen, statischen Berechnungen und bewährten Detaillösungen, die die strukturelle Integrität und Wiederverwendbarkeit von Bauteilen verbessern.

Durch die Berücksichtigung dieser Aspekte zielt die Publikation darauf ab, Umweltbelastungen zu minimieren, Abfälle zu reduzieren, den gebundenen CO_2-Ausstoß zu verringern, die zirkuläre Nutzung von Baumaterialien zu fördern und eine nachhaltigere sowie ressourceneffizientere Bauwirtschaft zu unterstützen.

1.2 Begriffe und Definitionen

Für die Zwecke dieses Leitfadens wurden die folgenden Begriffe und Definitionen verwendet, insbesondere im Kontext eingeschossiger Gebäude.

Verkleidung	Fassaden- und Dachelemente, die das Tragwerk umschließen, die Gebäudehülle bilden und die erforderliche Wärme- und Luftdichtheit des Gebäudes gewährleisten.
Bauteil	Teil einer Stahlkonstruktion, die selbst aus mehreren kleineren Bauteilen bestehen kann, z. B. Fachwerk, Sandwichelemente.
Schadensfolgeklassen	Klassifizierung basierend auf den Folgen eines Versagens oder einer Fehlfunktion des Tragwerks; jeder Schadensfolgeklasse sind unterschiedliche Zuverlässigkeitsindizes zugeordnet.
Produktbestandteil	Materialien oder Produkte, die bei der Herstellung verwendet werden und Eigenschaften aufweisen, die in statischen Berechnungen verwendet werden oder sich anderweitig auf die mechanische Festigkeit und Stabilität von Bauwerken und

	Teilen davon und/oder deren Feuerbeständigkeit beziehen, einschließlich Aspekten der Dauerhaftigkeit und Gebrauchstauglichkeit.
Baustahl	Oberbegriff für Stahlbauteile (primär und sekundär) sowie stahlbasierte Verkleidungen.
Rückbau (oder Demontage)	Prozess des systematischen Abbaus eines Gebäudes in einzelne Bestandteil mit dem Ziel der Wiederverwendung, im Gegensatz zum Abriss werden Materialien möglichst unbeschädigt erhalten.
Abriss	Prozess, bei dem ein Gebäude in seine Bestandteile zerlegt wird, ohne Rückgewinnung von Bauteilen zur Wiederverwendung; Abrissprodukte können jedoch recycelt werden.
Design for Deconstruction (DfD)	Entwurfsansatz, bei dem bereits in der Planungsphase berücksichtigt wird, wie ein Gebäude in Zukunft zerlegt und wiederverwendet werden kann.
Bemessungs-lebensdauer	Angenommener Nutzungsdauer eines Bauteils für seinen vorgesehenen Zweck mit üblicher Wartung, aber ohne größere Instandsetzungen
Händler	Natürliche oder juristische Person in der Lieferkette, die ein Bauprodukt in Verkehr bringt, mit Ausnahme des Herstellers oder des Importeurs.
Gebäudehülle	Umfassende Struktur, die das Innere des Gebäudes von der Außenumgebung trennt und eine Reihe von statischen und bauphysikalischen Funktionen erfüllt.
Ausführungsklasse	Festgelegte Anforderungen an die Ausführung des Bauwerks als Ganzes, eines Bauteils oder eines Details.
Fassade	Siehe Verkleidung
Decke	Tragendes Bauteil zur Bereitstellung von Nutzraum; überträgt Lasten auf Stützen und Wände und trägt zur Aussteifung bei
Gefährlicher Abfall	Abfälle, die eine erhebliche oder potenzielle Bedrohung für die öffentliche Gesundheit oder die Umwelt darstellen.
Importeur	Natürliche oder juristische Person mit Sitz in der EU, die ein Bauprodukt aus einem Drittland in den EU-Markt einführt.
Wiederverwendung In-situ	Wiederverwendung eines Tragwerks oder einzelner Bauteile am ursprünglichen Ort, z.B. bei Renovierungen
Hersteller	Natürliche oder juristische Person, die ein Bauprodukt herstellt oder ein solches Produkt entwickeln oder herstellen lässt und dieses Produkt unter ihrem Namen oder ihrer Marke vermarktet.

Benannte Stelle	Unabhängige; nichtstaatliche Prüfstelle, die von der EU/EWR anerkannt und befugt ist, Konformitätsbewertungen für Produkte durchzuführen, die die Anforderungen einer harmonisierten Norm (hEN) oder einer Europäischen Technischen Bewertung (ETA) erfüllen.
Rückbau-Vorabprüfung	Qualitative und quantitative Bewertung von Bau- und Abbruchabfallströmen vor dem Rückbau, Abriss oder der Renovierung von Gebäuden und Infrastrukturen.
Primärestruktur	Tragende Hauptstruktur aus Stahl, z. B. Stützen, Träger und Aussteifungselemente.
Käufer	Unternehmen, das die Stahlerzeugnisse erwirbt; in der Regel ein Stahlbauunternehmen.
Rekonditionierung	Prozess, bei dem ein Produkt wieder in einen funktionsfähigen Zustand versetzt wird durch Austausch defekter Komponenten und optischer Aufbereitung, z. B. durch Reinigung, Lackierung oder Nachbearbeitung.
Recycling	Umwandlung von Abfallstoffen in neue Materialien oder Produkte; bei Stahl durch Einschmelzen von Schrott zu neuen Halbzeugen.
Sanierung	Umgestaltung eines bestehenden Gebäudes für eine neue Nutzung durch einfache Erneuerungen bis zu strukturellen Veränderungen.
Wiederverwendung an anderem Ort	Transport und Wiederverwendung des Tragwerks oder des Bauteils an einem neuen Standort.
Wiederaufbereitung	Wiederherstellung eines Produkts gemäß den Leistungsspezifikationen des Originalherstellers.
Reparatur	Behebung eines Fehlers, jedoch ohne Garantie für das Produkt als Ganzes. Im Stahlbau z.B. durch Verstärkungen.
Umnutzung	Änderung der Funktion oder des Zwecks eines Bauteils.
Wiederverwendung	Nutzung rückgewonnener Bauteile in weitgehend ursprünglicher Form, mit oder ohne Umnutzung.
Sekundärstruktur	Stahlbauteile wie Wandriegel und Dachpfetten, die die Verkleidung tragen und die Primärstruktur aussteifen.
Tragendes Bauteil	Lastabtragendes Bauteil mit Anforderungen an die mechanische Widerstandsfähigkeit, Stabilität, Feuerwiderstand, Dauerhaftigkeit und Gebrauchstauglichkeit; oft Teil einer tragenden Gesamtstruktur.
Struktureller Bausatz	Satz standardisierter Bauteile, die vor Ort zusammengebaut und installiert werden.

Lieferant	Unternehmen, das die Stahlerzeugnisse lagert und an den Markt liefert.
Abfall	Unerwünschtes Material, das entsorgt werden muss.

2 EMPFEHLUNGEN FÜR ZUKÜNFTIGE GEBÄUDE

Band 2 befasst sich mit den Möglichkeiten, wie neue Gebäude so entworfen werden können, dass eine spätere Wiederverwendung der Bauteile erleichtert wird. Der Schwerpunkt liegt auf Stahlbauteilen und sekundären Komponenten, die in ein- und mehrgeschossigen Stahlkonstruktionen wie Industriegebäuden, großen Einzelhandelseinheiten, Lagerhallen, Wohn- und Bürogebäuden verwendet werden, und wie diese bereits im ersten Nutzungszyklus so entworfen werden können, dass sie leicht demontiert werden können, um in künftigen Gebäuden erneut verwendet zu werden. Stahl, der langlebig, wiederverwertbar und vielseitig einsetzbar ist, bietet erhebliche Potenziale zur Wiederverwendung, sofern er von der Entwurfsphase des Gebäudes an systematisch integriert wird. Dies schließt auch die Verbindungen zwischen tragenden und nichttragenden Elementen ein, wie in Abschnitt 4 dargestellt.

2.1 Allgemeine Grundsätze für das Design zur Demontage und Wiederverwendung

Die Planung von Stahlkonstruktionen hinsichtlich einer späteren Demontage und Wiederverwendung folgt den Grundsätzen der Kreislaufwirtschaft, reduziert Abfälle und maximiert die Ressourceneffizienz. Die frühzeitige Integration dieser Empfehlungen in den Entwurfsprozess ermöglicht die Entwicklung anpassungsfähiger, widerstandsfähiger und nachhaltiger Gebäude. Durch die Priorisierung von Modularität, Dokumentation, Materialwahl und zugänglichen Verbindungen kann die Bauindustrie ihre Umweltbelastungen erheblich reduzieren und den Weg für innovativere sowie nachhaltigere Entwurfsansätze ebnen.

Die Menge an Stahl, die am Ende der Nutzungsdauer eines Gebäudes zurückgewonnen und wiederverwendet werden kann, hängt maßgeblich davon ab, wie das Gebäude ursprünglich geplant und gebaut wurde. In diesem Abschnitt wird erläutert, wie Entscheidungen in der Entwurfsphase die Demontage ermöglichen und dadurch den Anteil zurückgewonnener und wiederverwendbarer Materialien für nachfolgende Nutzungszyklen erhöhen können.

Beim Entwurf für Demontage und potenzielle Wiederverwendung sollten folgenden Grundsätze beachtet werden[1] :

- Gebäude sollten in leicht austauschbaren Schichten gebaut werden. Bauteile mit der kürzesten Lebensdauer sollten in den am einfachsten zugänglichen Schichten angeordnet sein,
- Die Komplexität des Gebäudes ist möglichst gering zu halten. Der Entwurf mit einfachen regelmäßigen Tragwerksrastern mit klaren Lastabtragungspfaden führt zur Verwendung gleichmäßig dimensionierter Bauteile, die mit minimalem Anpassungsaufwand wiederverwendet werden können. Auch die Anzahl der verschiedenen Materialien und deren Spezifikationen sollte reduziert werden, um die Wiederverwendung zu erleichtern,
- Arbeitssicherheit und Platzbedarf für Maschinen sollten sowohl bei der Errichtung als auch bei der Demontage berücksichtigt werden. Ebenso sind logistische Aspekte eines möglichen zukünftigen Rückbaus in der Entwurfsphase zu berücksichtigen,

- Vorgefertigte Bauteile oder Module, die vor Ort installiert werden, lassen sich für die Wiederverwendung an anderen Orten oder am selben Standort leichter demontieren,
- Verbindungsdetails sollten einfach und zugänglich sein. Dies gilt auch für die Verbindungen von Fundamenten mit anderen Bauteilen. Schweißverbindungen sind möglichst zu vermeiden, außer die geschweißten Bauteile können in ihrer Gesamtheit wiederverwendet werden, z. B. bei Rahmenträger,
- Beschläge, Befestigungen, Kleb- und Dichtstoffe sind so zu wählen, dass sie beim Ausbau keine Schäden an sekundären Bauteilen wie Verkleidungen oder Fenstern verursachen, sodass diese zur Wiederverwendung erhalten bleiben,
- Die Planung sollte den Anteil wiederverwendbarer Materialien maximieren und den Einsatz von Verbundwerkstoffen, Gips, Stahlbeton usw. vermeiden, da diese schwer zu trennen und zu recyceln sind. Gefährliche Materialien sind zu vermeiden. Auch die Auswirkungen von Beschichtungen und Brandschutzmaßnahmen auf die Wiederverwendbarkeit von Stahlbauteilen ist zu berücksichtigen,
- Ein Gebäudeprotokoll bzw. eine Datenbasis in Form eines Building Information Model (BIM) sollte erstellt werden, das Informationen über die Planung des ursprünglichen Gebäudes, die Materialkennwerte sowie Konstruktionsdetails von möglichen Snaierungen und alle für den Rückbau relevante Informationen enthält.

Durch die Konzentration auf Modularität, Materialdokumentation und intelligente Verbindungstechniken können Architekten und Ingenieure Bauwerke schaffen, die nicht nur ihren unmittelbaren Zweck erfüllen, sondern auch langfristige ökologische und wirtschaftliche Vorteile bieten.

2.1.2 Wesentliche Entwurfsprinzipien

Die modulare Bauweise stellt eine der effektivsten Strategien dar, um eine spätere Demontage und Wiederverwendung von Stahlbauteilen unter Minimierung von Abfällen zu ermöglichen. Durch den Einsatz standardisierter Bauteile und vorgefertigter Module kann eine Bauweise realisiert werden, die eine spätere Wiederverwendung begünstigt. Geschraubte und lösbare Verbindungen sind Schweißverbindungen vorzuziehen, da sie den Demontageprozess wesentlich vereinfachen. Vorgefertigte Module können leicht entfernt, transportiert und in neue Projekte integriert werden, wodurch die Lebensdauer der Stahlkomponenten über die ursprüngliche Struktur hinaus verlängert wird.

Lückenlose Dokumentation und Kennzeichnung sämtlicher Bauteile ist von zentraler Bedeutung für spätere Rückbau- und Wiederverwendungsszenarien. Detaillierte Aufzeichnungen aller relevanter Informationen, insbesondere Stahlgüte, Querschnittsabmessungen und Verbindungsdetails gewährleistet eine eindeutige Identifizierbarkeit. Digitale Werkzeuge wie Building Information Modelling (BIM) bieten eine robuste Lösung für die Verfolgung und Verwaltung von Bauteilen über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes. Darüber hinaus ermöglicht die physische Kennzeichnung der Stahlbauteile mit dauerhaften Etiketten die Rückverfolgbarkeit im Demontageprozess.

Die Materialwahl eist ein entscheidender Faktor bei der Planung für eine zukünftige Wiederverwendung. Der Einsatz von Stahl mit hohem Recyclinganteil und die Beschaffung von Materialien, die gemäß anerkannten Umweltstandards zertifiziert sind, tragen maßgeblich zur Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks bei. Auf den Einsatz von

Verbundwerkstoffen oder Beschichtungen, die Recyclingprozesse erschweren, sollte verzichtet werden, da diese den Rückgewinnungsprozess erschweren. Die Verwendung standardisierter Stahlprofile ermöglicht eine vereinfachte Wiederverwendung in zukünftigen Anwendungen ohne aufwändige Anpassungsmaßnahmen.

Die Auswahl geeigneter Verbindungs- und Befestigungstechniken beeinflusst maßgeblich die Rückbaubarkeit eines Tragwerks. Mechanische Verbindungselemente wie Schrauben sind dauerhaften Methoden wie Schweißen oder Kleben vorzuziehen. Die Verbindungen sollten zugänglich und leicht lösbar ausgelegt sein, um den Rückbau zu beschleunigen und eine schadensfreie Wiederverwendung zu ermöglichen. Die Wiederverwendung von Verbindungselementen oder die Wahl wiederverwertbarer Alternativen trägt zusätzlich zur Abfallvermeidung und zur Nachhaltigkeit des Projektes bei.

Strukturelle Einfachheit und gezielte Redundanz sind entscheidend für die Förderung der Rückbaubarkeit von Stahltragwerken. Eine einfache Tragwerksgeometrie reduziert die Komplexität der Verbindungen und minimiert Überlagerungen von Bauteilen, was den Rückbau erleichtert. Redundante Systeme ermöglichen den selektiven Rückbau einzelner Komponenten ohne Beeinträchtigung der Gesamtstabilität. Überdimensionierungen sind zu vermeiden, um übermäßigen Materialverbrauch zu begrenzen, Kosten zu senken und zukünftige Änderungen oder Wiederverwendung zu erleichtern.

2.1.3 Strategien während der Bauphase

Die Umsetzung von Entwurfsprinzipien für den künftigen Rückbau während der Bauphase erfordert eine systematische Planung und gezielte Schulungsmaßnahmen. Die ausführenden Bau- und Montageteams sind hinsichtlich bewährter Verfahren zur baubegleitenden Vorbereitung auf einen späteren Rückbau zu unterweisen. Eine durchgängige Qualitätskontrolle während der Montage ist unerlässlich, um die spätere Demontage und Wiederverwendung der Bauteile zu gewährleisten.

2.1.4 Planung für die Nachnutzung und das Lebensende

Die Nachnutzungsplanung für Stahlkonstruktionen sollte bereits in der ersten Entwurfsphase beginnen. Durch konsequente Anwendung der zuvor beschriebenen Entwurfsprinzipien und deren vollständige Dokumentation wird gewährleistet, dass Bauwerke mit dem Ziel einer langfristigen Wiederverwendbarkeit entworfen werden. Dies trägt zur Vermeidung von Abfällen bei und unterstützt die zirkuläre Nutzung von Ressourcen im Sinne der Kreislaufwirtschaft. Am Ende der Nutzungsdauer eines Gebäudes ist die strukturierte Vorbereitung des Rückbaus in enger Abstimmung mit Rückbau- und Recyclingunternehmen durchzuführen. Die frühzeitige Identifizierung potenzieller Sekundärnutzungen von Stahlbauteilen trägt dazu bei, deren Lebenszyklus über die ursprüngliche Nutzungsdauer zu verlängern und gleichzeitig den Bedarf an neuen Materialien zu verringern.

2.2 Standardisierung

Die meisten Stahlbauteile werden derzeit projektbezogen für dessen spezifischen Anforderungen entworfen und hergestellt, um die Bedürfnisse des Bauherrn zu erfüllen. Eine zentrale Anforderung ist dabei die *Kostenoptimierung* über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks, wobei eine angemessenes Qualitätsniveau gewährleistet bleiben muss.

Gegenwärtig werden jedoch die durch den Lebenszyklus eines Produktes verursachten Umweltbelastungen, einschließlich der Entsorgungs- und Recyclingprozesse am Nutzungsende sowie der damit verbundenen CO_2-Emissionen, in die Kostenoptimierung nicht systematisch einbezogen.

Ein ganzheitlicher Ansatz, der sowohl ökologische und ökonomische Aspekte berücksichtigt, macht die Wiederverwendung von Baustoffen zu einer attraktiven Alternative. Zwar entstehen zusätzliche Aufwendungen für den Rückbau, die Logistik und die Aufbereitung rückgewonnener Materialien, diese können jedoch durch die Einsparung primärer Ressourcen und damit verbundener Herstellungskosten kompensiert werden.

Die Normung stellt einen wesentlichen Hebel zur Maximierung der Wiederverwendungspotenziale von Bauteilen dar, da sie die Auswahl und Verfügbarkeit zurückgewonnener Bauteile erleichtert.

Standardisierung kann definiert werden als die systematische Anwendung von Verfahren, Produkten oder Bauteilen, bei denen das Ziel der Regelmäßigkeit, Modularität und Wiederholbarkei besteht. Standardisierte Gebäude zeichnen sich durch regelmäßige Geometrien und den Einsatz vielfach identischer Komponenten aus, um Skaleneffekte bei der Herstellung zu erzielen.

Bei ***eingeschossigen Stahlgebäuden*** ergeben sich signifikante wirtschaftliche Kostenvorteil durch eine koordinierte Dimensionierung. Die nachfolgenden Empfehlungen beziehen sich auf typische geometrische Parameter:

1. Die maximal mögliche Länge zwischen den Verbindungsstellen der Bauteile ist im Allgemeinen durch den Straßentransport begrenzt. Übliche Lagerlängen betragen 10, 12, 14, 15, 16, 18 und 20 m. Längen von 12 m sind in der Regel mit dem LKW transportierbar, während Längen bis zu 18 m je nach örtlicher Infrastruktur (z.B. Straßennetz) ebenfalls möglich sind. Für den Transport per Containerschiff ist in der Regel eine Gesamtlänge von weniger als 12 m erforderlich,
2. Die Dachneigung hängt von den örtlichen Schnee- und Regenverhältnissen sowie von lokaler Baupraxis ab. Für Rahmenkonstruktionen mit geneigtem Dach gilt üblicherweise eine Mindestneigung 1:10 (6°). Satteldachbinder erlauben geringere Neigungen von 1:20 (3°), da sie eine höhere Steifigkeit aufweisen und infolgedessen weniger verformen,
3. Typische Rahmenabstände betragen 5 bis 8 m in Abhängigkeit von der Spannweite. Für Zwecke der Standardisierung können in schneearmen Regionen 7,5 m als übliches Maß angesetzt werden, während in schneereichen Regionen 5 oder 6 m vorteilhaft sind. Im Rahmen von Wiederverwendungsszenarien können jedoch abweichende Rastermaße gewählt werden, die nicht mit dem ursprünglichen Bauwerk übereinstimmen,
4. Typische Spannweiten und Spanneweiten-Trägerhöhe-Verhältnisse für primäre Dachelemente eingeschossiger Gebäude sind inTabelle.21 angegeben, (nach [2]).

Tabelle.21 Typische Spannweiten und Spannweiten-Trägerhöhe-Verhältnisse für eingeschossige Gebäude nach [2]

Konstruktionsart	Typische Spannweite	Spannweiten-Trägerhöhe-Verhältnis
Einfache Konstruktion		
Walzprofilträger	bis zu 20 m	Spannweite/25 bis Spannweite/35 je nach Größe und Eigengewicht
Gefertigte Träger	bis zu 30 m	Spannweite/20 bis Spannweite/25
Wabenträger oder Zellenträger mit Stegöffnungen	bis zu 45 m	Spannweite/18 bis Spannweite/30 je nach Größe der Öffnungen
Fachwerkdach (geneigt)	bis zu 20 m	Spannweite/5 bis Spannweite/10 je nach Fachwerkhöhe
Fachwerkdach (flach)	bis zu 100 m	Spannweite/15 bis Spannweite/20
Durchgehende Konstruktion		
Portalrahmen	15 m bis 50 m	Spannweite/50 bis Spannweite/65 für die Sparren (bis zu Spannweite/85, wenn Schneelast nicht maßgebend ist)
Einseitig geneigtes Dach	bis zu 25 m	
Unterstützer Portalrahmen	bis zu 50 m	
Gefertigte, konisch verjüngte Profile	bis zu 70 m	Zwischen Spannweite/25 bis Spannweite/65
Fachwerkdach (flach)	bis zu 100 m	Spannweite/15 bis Spannweite/20

In der Vorentwurfsphase von eingeschossigen Stahlgebäuden mit Traufhöhen zwischen 6 und 12 m hat sich die Anwendung eines Verhältnisses von Spannweite zu Stützentiefe von 40 bis 50 etabliert. Dieses Verhältnisbietet einen ausgewogenen Ansatz zwischen struktureller Effizienz und wirtschaftlichem Materialeinsatz.

In ***mehrgeschossigen Stahlkonstruktionen*** erfolgt der Lastabtrag und die Lastverteilung über ein primäres Tragsystem aus Trägern und Stützen. Die Optimierung der Anzahl der Lastübertragungspunkte stellt eine zentrale Frage in der Entwurfsphase dar und ist in Abhängigkeit der geplanten Gebäudenutzung[3] zu wählen. Hinsichtlich der räumlichen Organisation gelten Stützen als Einschränkungen und sollten daher möglichst reduziert werden. Traditionelle Skelettbauten für Wohngebäude verwenden typischerweise Spannweiten im Bereich von 4,5 bis 6 m. Größere Spannweiten von 12 bis 18 m bei Bürogebäuden und 15 bis 16 m bei Parkhäusern ermöglichen eine höhere Nutzungsflexibilität durch offenere Raumstrukturen.

Die Anordnung der Stützen im Grundriss wird maßgeblich durch das Raster der Deckenfelder beeinflusst. Dieses ergibt sich aus den folgenden Parametern:

- dem planerischen Grundraster, üblicherweise auf der Basis von 300 mm, in der Praxis jedoch häufig als Vielfaches von 0,6, 1,2 oder 1,5 m;
- dem Stützenabstand entlang der Fassade, je nach Fassadenmaterial, üblicherweise 5,4 m bis 7,5 m;
- der vorgesehenen Nutzung der Innenräume (z. B. Einzel- oder Großraumbüros);
- den Anforderungen an die Gebäudetechnik, insbesondere hinsichtlich der Verteilung vom Gebäudekern aus.

Entlang der Fassadenachse wird der Stützenabstand in der Regel durch die Notwendigkeit bestimmt, das Fassadensystem ausreichend zu stützen, beispielsweise ist für Verblendmauerwerk üblicherweise ein maximaler Stützenabstand von 6 m erforderlich. Dies beeinflusst auch die inneren Stützenabstände, sofern nicht zusätzliche Stützen entlang der Fassadenachse vorgesehen werden.

Für natürlich belüftete Büros wird in der Regel eine Gebäudebreite von 12 bis 15 m angestrebt, welche durch zwei Einzelspannweiten von 6 bis 7,5 m erreicht werden kann. Alternativ kann auch eine einzige Spannweite über die gesamte Gebäudebreite, beispielsweise durch vorgespannte Hohlkörperdecken mit einer Deckenhöhe von 400mm oder mehr, realisiert werden. Auch die natürliche Belichtung ist bei der Wahl der Geschossbreite zu berücksichtigen. In modernen Gebäuden bietet ein weitgespanntes Deckensystem zudem erhebliche flexiblere Möglichkeiten bei der Raumaufteilung. Für klimatisierte Büros ist eine lichte Spannweite von 15 bis 18 m üblich.

Die Geschosshöhe ergibt sich aus einer typischen lichten Raumhöhe von 2,5 bis 2,7 m für gewöhnliche Büroräume oder 3 m für prestigeträchtigere Anwendungen, ergänzt um die Höhe der Bodenaufbauten einschließlich der Versorgungsleitungen. Für die Entwurfsphase von Bürogebäuden ergeben sich somit folgende Zielwerte für die Geschosshöhen:

- Prestige-Bürogebäude: 4 - 4,2 m,
- Spekulatives Bürogebäude: 3,6 - 4,0 m,
- Sanierungsprojekt: 3,5 - 3,9 m.

Die typischen Spannweiten für verschiedene Deckensysteme sind inTabelle .22 dargestellt.

Tabelle .22 Spannweite der verschiedenen Konstruktionsvarianten [3]

	Span (m)					
	6	8	10	13	16	20
Reinforced concrete flat slab						
Slim floor beams and deep composite slab						
Integrated beams with precast slabs						
R.C. beams and slab						
Post-tensioned concrete flat slab						
Composite beams and slab						
Fabricated beams with web openings						
Cellular composite beams						
Composite trusses						

Die folgende Übersicht zu typischen Deckenrastern basiert auf nationalen Praktiken:

- Deutschland (gemäß DIN): Planungsraster von 100 mm, typischerweise Vielfache von 1,2 m,
- Niederlande: Planungsraster von 100 mm, Vielfache von 1,8 m für Schulen, Einzelhandel, Hotels und Bürogebäude,
- Vereinigtes Königreich: Planungsraster von 300 mm; typischerweise Vielfache von 0,6, 1,2 oder 1,5 m. Schulen und medizinische Gebäude sind für Vielfache von 1,2 m und Büros für ein Bodenraster von 1,5 m ausgelegt,
- Allgemein sind in Europa Vielfache von 1,25 und 1,35 m akzeptiert (1,35 m kann zur Standardisierung der Abmessungen bevorzugt werden),
- Niedrige Bürogebäude (2-4 Stockwerke): Häufig Raster von 6 bis 9 m, um die Verwendung von Betonfertigteildecken auf Unterzügen oder möglicherweise schlanken Deckenbalken zu ermöglichen,

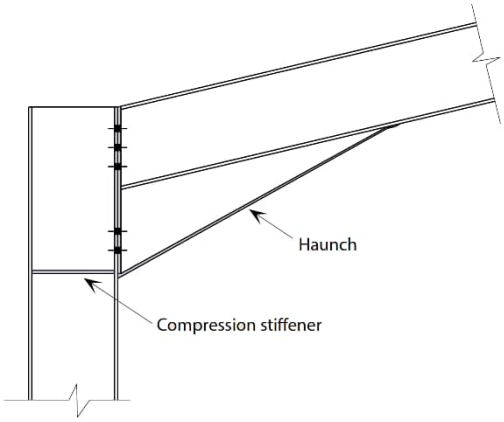
- Bei Bürohochhäusern im Vereinigten Königreich werden rechteckige Deckenraster bevorzugt, bei denen sich die größere Spannweite in Schritten von 1,5 m über 13,5 bis 18 m über das Gebäude erstreckt. Ein Stützenraster von 16,5 m x 7,5 m ist mit Tiefgaragen kompatibel,
- Diese Langfeldträger haben in der Regel Öffnungen, in die die technische Gebäudeausrüstung integriert ist, wie z. B. Zellenträger aus Walzprofilen, die mehrere kreisförmige Öffnungen haben.

Bei Hochhäusern führt ein Planungsraster von 1,35 m zu einem Stützenabstand von 16,2 m × 8,1 m, was einem Verhältnis von 2:1 entspricht und eine gute Grundlage für die spätere Anpassungsfähigkeit und Umnutzung von Gebäudenbietet.

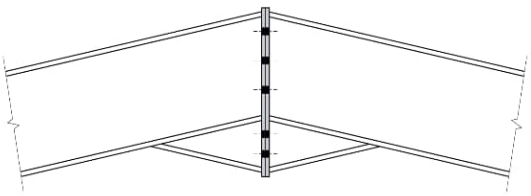
2.3 Bewährte Verfahren für die Analyse und Bemessung von eingeschossigen Stahlgebäuden

2.3.1 Typische Detaillösungen für Rahmenkonstruktionen

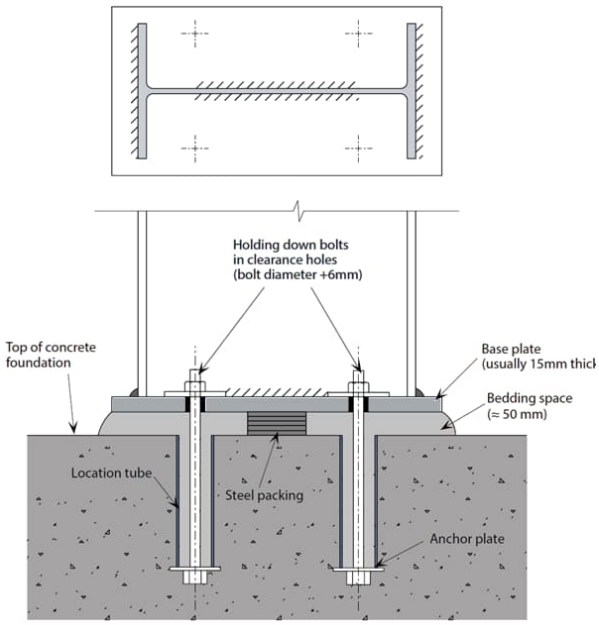
Typische Detaillösungen für eine Rahmenkonstruktion mit gelenkig gelagerter Fußplatte sind inAbb. .21 dargestellt.



Typischer Traufanschluss (UK)



Typischer Scheitelanschluss (UK)



Typischer Anschluss an das Fundament (UK)

Abb. .21 Typische Detaillösungen für eine einfeldrige Rahmenkonstruktion mit gelenkig gelagerter Fußplatte [4]

2.3.2 Aussteifungssysteme

Ein Gebäude mit einer Rahmenkonstruktion weist zwei primäre Aussteifungssysteme auf:

(i) vertikale Aussteifung und

(ii) Dachaussteifung.

Die Hauptfunktionen der vertikalen Aussteifung in den Seitenwänden des Rahmens sind:

- Übertragung horizontaler Kräfte in die Fundamente,
- Sicherstellung der Stabilität während der Bauausführung.

Die vertikale Aussteifung kann an einem oder beiden Enden des Gebäudes (sieheAbb. .22), innerhalb der Gebäudelänge oder in jedem Abschnitt zwischen möglichen Verbindungspunkten (sofern diese vorhanden sind) angeordnet werden. Zu diesem Zweck können sowohl ausgesteifte als auch rahmenartige Felder verwendet werden. Ihre Position wird zudem durch den Grundriss des Gebäudes beeinflusst. Die Traufriegel gewährleisten, dass alle Rahmen durch das vertikale Aussteifungssystem in Querrichtung ausgesteift sind.

Das Dachaussteifungssystem befindet sich in der Dachebene, typischerweise an beiden Enden des Gebäudes zwischen den jeweils ersten benachbarten Rahmen (sieheAbb. .23). Die Hauptfunktionen der Dachaussteifung umfassen:

- Übertragung der Windkräfte von den Giebelstützen auf die vertikale Aussteifung in den Wänden,
- Übertragung der durch den Wind verursachten Reibungskräfte auf dem Dach auf die vertikale Aussteifung,
- Bereitstellung eines steifen Auflagers für die Pfetten, welche die Dachträger austeifen,
- Gewährleistung der Stabilität während der Montage,
- Aussteifung der Innenstützen durch Rückverankerung zu den Außenwänden.

Das Dachaussteifungssystem ist so anzuordnen, dass es eine hinreichende Aussteifung der Giebelstützen im oberen Bereich gewährleistet.

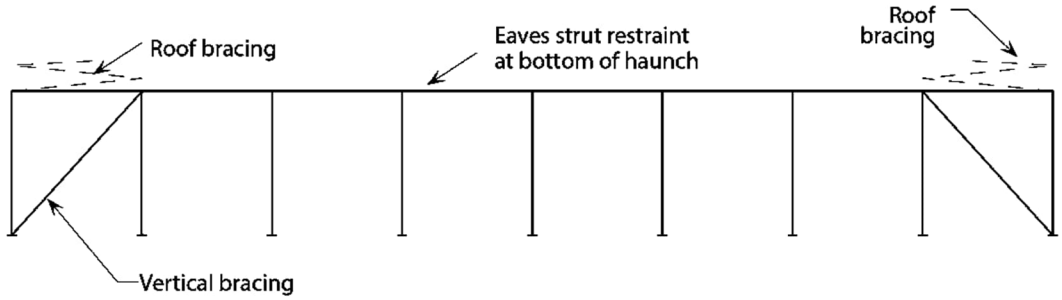


Abb. .22 Typische vertikale Aussteifungsanordnung [5]

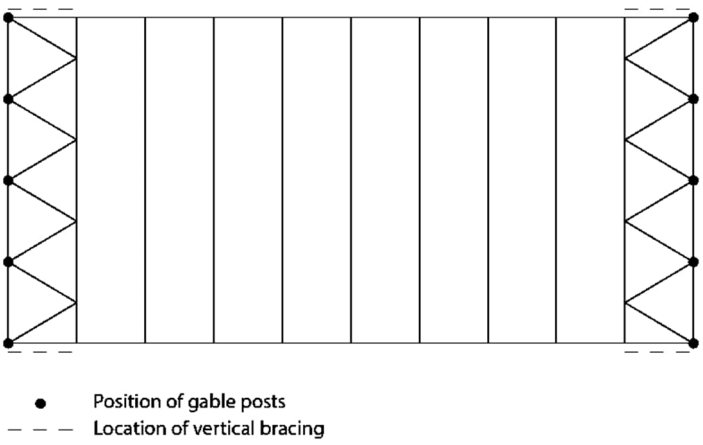


Abb. .23 Typische Anordnung der Dachaussteifung [5]

2.3.3 Giebelrahmen

Die Endgiebel werden häufig mit zusätzlichen Zwischenstützen auf den Sparren ausgeführt, wodurch diese leichter sind als das Haupttragwerk. Eine alternative Lösung besteht in der Ausbildung von ausgesteiften Giebelrahmen, wobei bei diesen potenziellen Herausforderungen im Hinblick auf die Verformungen der Fassadenverkleidung entstehen können, insbesondere infolge unterschiedlicher Verschiebungen zwischen benachbarten Rahmen. Es wird daher empfohlen, dass die Endgiebel konstruktiv und geometrisch identisch zu den inneren Rahmen auszubilden. Dies erleichtert nicht nur die Wiederverwendung, sondern ermöglicht auch zukünftige Gebäudeerweiterungen ohne aufwändige Anpassungen. Zudem führt diese Vorgehensweise auch zu einer besseren Leistung des Verkleidungssystems, da zwischen zwei identischen ausgeführten Rahmen geringere Relativverschiebungen zu erwarten sind.

2.3.4 Globalanalyse

In Europa erfolgt die Bemessung von Rahmenkonstruktion in der Regel auf Grundlage einer elastischen Analyse, während im Vereinigten Königreich häufig die plastische Analyse im Grenzzustand der Tragfähigkeit angewendet wird. Dabei werden die Gebrauchstauglichkeitsbedingungen jedoch ergänzend durch eine elastische Analyse überprüft. Um die Wiederverwendung von Bauwerken zu fördern, wird empfohlen, die elastische Bemessungsmethode sowohl bei der Erstanwendung als auch für nachfolgende Nutzungen anzuwenden.

Bei Anwendung der plastischen Analyse ergeben sich durch die Momentenumlagerung zwischen den Rahmenelementen in der Regel kleinere Querschnitte. Der wirtschaftliche Vorteil ist jedoch begrenzt, da der Materialkostenanteil an den Gesamtbaukosten üblicherweise unter 50% liegt.

2.3.5 Verhalten von Verbindungen

Verbindungen können gemäß EN 1993-1-8 [6] als gelenkig, halbstarr oder biegesteif klassifiziert werden. Für vorläufige Bemessungszwecke kann angenommen werden, dass eine näherungsweise gelenkige Verbindung, die dem typischen Detail inAbb. .21 entspricht, 10 % der Biegesteifigkeit der Rahmenstützen zur globalen Stabilitätsanalyse und 20 % für Gebrauchstauglichkeitsnachweise beiträgt. Für gelenkige Verbindungen kann eine Grundsteifigkeit von bis zu 20% der Steifigkeit der Stütze angenommen werden [7].

Wenn eine Stütze biegesteif mit einem geeigneten Fundament verbunden ist, sollte die Steifigkeit der Fußpunktverbindung bei der endgültigen Bemessung für alle Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit gleich der Steifigkeit der Stütze gesetzt werden. Für Nachweise der Gebrauchstauglichkeit kann der Fußpunkt als biegesteif betrachtet werden [7]. Für halbstarre Verbindungen wird empfohlen, die Steifigkeit der Drehfeder gemäß EN 1993-1-8 oder mit geeigneter Software zu bestimmen.

Gängige Bemessungsprogramme ermöglichen die direkte Berücksichtigung einer Drehfedersteifigkeit in das Modell, wodurch die oben genannten Empfehlungen einfach umgesetzt werden können. Insbesondere bei der Bemessung von Rahmenfundamenten, bei denen die Softawre keine Rotationsfedern unterstützt, kann die Fußpunktsteifigkeit

durch den Einsatz von Hilfselementen, sogenannter Dummy-Stäbe, mit äquivalenter Steifigkeit simuliert werden, wie inAbb. .24 dargestellt.

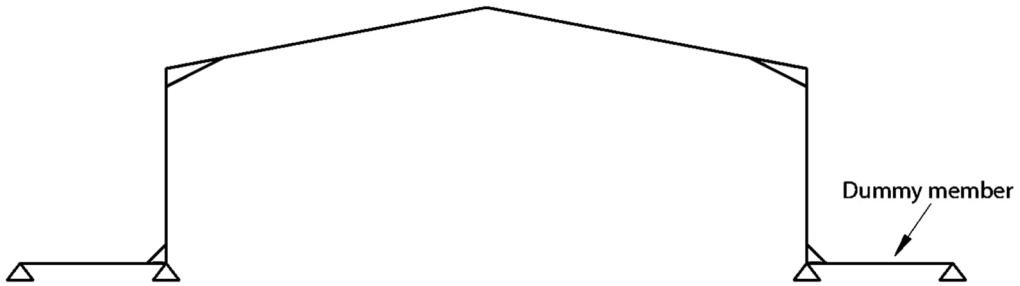
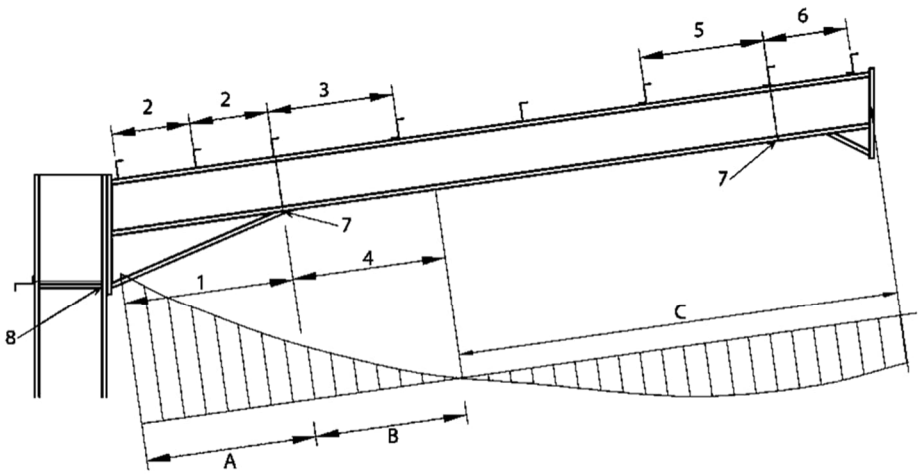


Abb. .24 Modellierung eines Fußpunktes durch einen Dummy-Stab [4]

2.3.6 Nachweis zur Stabilität von Bauteilen

Der Nachweis der Stabilität von Bauteilen ist gemäß Abschnitt 8.3 von EN 1993-1-1 zu führen. Für Tragwerke, die für mehrfache Montage- und Demontagevorgänge ausgelegt sind, wird empfohlen, bei der Bemessung einen modifizierten Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M1,mod} = K_{\gamma M1}\gamma_{M1}$ mit $K_{\gamma M1} = 1{,}15$ anzuwenden. Dies steht im Einklang mit den Empfehlungen aus Abschnitt 6.3.2 von Band 1 der Leitfäden.

Sekundäre Stahlkonstruktionen übernehmen bei der Bemessung von Rahmenkonstruktionen eine zentrale Funktion, da sie das Biege-, Torsions- und Biegedrillknicken der Bauteile verhindern. Ein typischer Entwurf einer Rahmenkonstruktion sollte mindestens die inAbb. .25 vorgeschlagenen minimalen Torsionseinspannungen berücksichtigen. Für den Fall von Windauftrieb können zusätzliche Torsionseinspannungen erforderlich sein, insbesondere am inneren Druckflansch des Dachträgers (sieheAbb. .26) oder bei Stützen in der Fassadenebene, die durch Windsog belastet werden,.



1. Tapered length, between torsional restraints
2. Tapered length, between lateral restraints
3. Length between lateral restraints
4. Length between torsional restraints
5. Length between restraints
6. Length between restraints
7. Torsional restraint to the rafter
8. Torsional restraint to the column

Abb. .25 Typische Einspannungen bei Rahmenkonstruktionen: Eigengewicht [4]

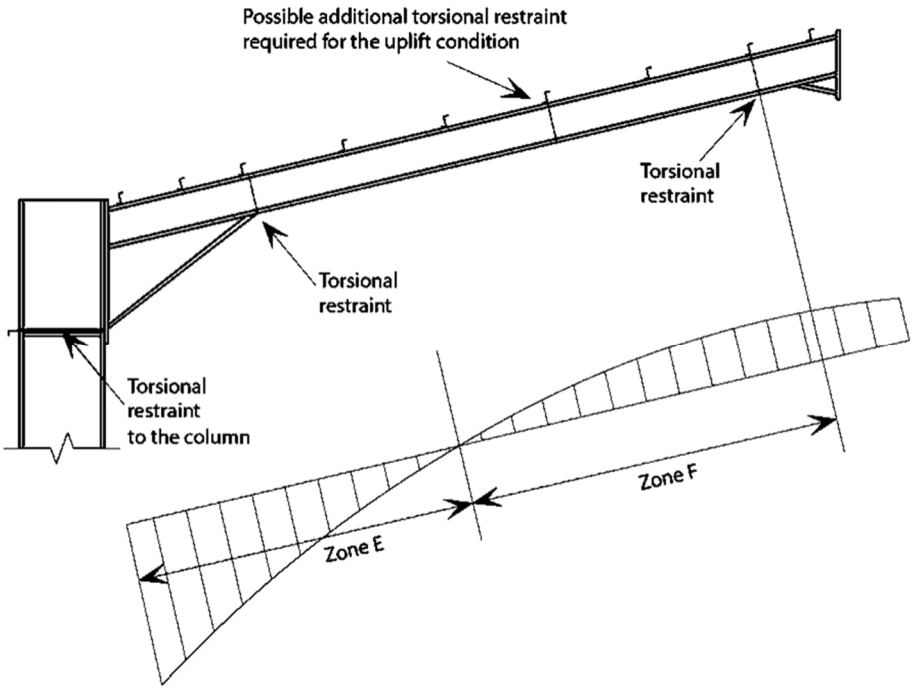


Abb. .26 Typische Einspannungen bei Rahmenkonstruktionen: Auftrieb [4]

2.3.7 Spannungsnachweise

Gemäß EN 1993-1-1 [8] ist kein expliziter Nachweis der Gebrauchsspannungen erforderlich. Da die Durchbiegungsberechnungen jedoch auf einer elastischen Analyse basieren, darf in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit (SLS) keine Plastizität auftreten. Wird das Tragwerk nach der plastischen Globalanalyse bemessen, wird empfohlen, für die charakteristischen Gebrauchstauglichkeitslastkombinationen einen Spannungsnachweis gemäß EN 1090 [9] zu führen.

2.3.8 Durchbiegungsnachweise

Kriterien für zulässige Verformungen sind projektspezifisch oder gemäß lokaler Praxis festzulegen. Die Empfehlungen aus Abschnitt 6.5.1 von Band 1 können angewandt werden.

2.3.9 Fachwerklösungen

Durch die Verwendung von Fachwerkkonstruktionen kann bei gleichzeitig hoher Steifigkeit und Tragfähigkeit ein materialeffizientes Tragwerk erreicht werden. (Der Effekt der Materialeinsparung nimmt in der Regel mit zunehmender Spannweite zu. Insbesondere in den nordischen Ländern werden aufgrund hoher Schneelasten häufig Fachwerklösungen für Dachträger verwendet.

Neben der Möglichkeit, große Spannweiten zu schaffen, bieten Fachwerkkonstruktionen auch Vorteile hinsichtlich der Integration der technischen Gebäudeausrüstung. Bei Fachwerken werden häufig Hohlprofile für Stützen und Gurte verwendet, es können jedoch auch offene Profile eingesetzt werden. Hohlprofile bieten durch ihrem hohen Knickwiderstand die Möglichkeit große Spannweiten mit größeren Diagonalabständen zu realisieren. Aufgrund der höheren Torsionssteifigkeit ist zu dem auch ein hoher Widerstand

gegen das Biegedrillknicken gewährleistet. Bei der Bemessung von Hohlprofilen ist das Biegeknicken typischerweise maßgebend. Die Herstellung standardisierter Knotenpunkte ist kosteneffizient, während abgerundete Ecken und leicht zugängliche Verbindungen die Vorbehandlung erleichtern.

Für weitgespannte Verkleidungen (z. B. Sandwichpaneelen mit hoher Profilhöhe) kann angenommen werden, dass der Obergurt des Fachwerks als seitlich gehalten gilt. Bei windbedingten Auftriebslasten auf dem Dach ist der Untergurt durch längsverlaufende Dachverbände stabilisiert werden. Bei durchgehenden Dachfachwerken können auch Aussteifungen erforderlich sein, um den druckbeanspruchten Untergurt im Bereich der Stützen zu stabilisieren.

In nordischen Ländern sind geschweißte Hohlprofilfachwerke die am häufigsten eingesetzten Lösungen für Dachträger. Bei großen Spannweiten erfolgt die Fertigung und der Transport der Träger meist in zwei Segmenten, welche auf der Baustelle durch verschraubte Verbindungen im Ober- und Untergurt zusammengesetzt werden.

2.4 Bewährte Verfahren für die Analyse und Bemessung von mehrgeschossigen Stahlgebäuden

2.4.1 Typische Tragwerksysteme

Das für die Stabilität erforderliche Tragwerkssystem wird maßgeblich von der Gebäudehöhe beeinflusst [10]. Für Gebäude mit bis zu acht Geschossen kann die Stahlkonstruktion selbst die Stabilität gewährleisten. Bei höheren Gebäuden sind Beton oder ausgesteifte Stahlkerne in der Regel effizienter. Die folgenden Tragwerksysteme können für die Stabilität in Betracht gezogen werden.

Für Gebäude mit bis zu vier Geschossen können biegesteife Rahmenkonstruktionen verwendet werden, bei denen mehrere Träger-Stützen-Verbindungen zur Aufnahme horizontaler Lasten beitragen. Dies ist im Allgemeinen nur möglich, wenn die Träger relativ hoch sind (ca. 400 mm bis 500 mm) und die Stützenquerschnitte ausreichend groß dimensioniert sind, um die einwirkenden Biegemomente aufzunehmen. Vollflächige Endplattenanschlüsse bieten in der Regel die erforderliche Steifigkeit.

Bei Gebäuden mit bis zu zwölf Geschossen werden ausgesteifte Stahlrahmen üblicherweise mit X-, K- oder V-Aussteifungen in den Wänden ausgeführt, z.B. in Hohlräumen der Fassade oder in Treppenhäusern. Queraussteifung werden nur auf Zug ausgelegt. Diese Queraussteifung besteht häufig aus einfachem Flachstahl, alternativ können auch Winkel- oder U-Profile verwendet werden.

Wenn die Aussteifung auch Druckkräfte aufnehmen muss, sind Hohlprofile üblich, aber auch Winkel- oder U-Profile sind möglich.

Ausgesteifte Stahlrahmen haben zwei entscheidende Vorteile:

- Ein einziges Montageteam kann für die temporäre Stabilität sorgen,
- Sobald die Stahlaussteifungen verbunden (verschraubt) sind, ist die Konstruktion stabil.

Betonkerne sind eine bewährte Lösung zur Aussteifung von Gebäuden mit bis zu 40 Geschossen. Der Betonkern wird dabei häufig vor der Stahlkonstruktion errichtet. Bei dieser

Bauweise spannen die Träger direkt zwischen den Stützen der Fassade und dem Kern. Besondere statische Überlegungen sind erforderlich für:

- Die Anschlüsse der Träger an den Betonkern,
- die Konstruktion der schwereren Hauptträger an den Ecken des Betonkerns,
- Brandsicherheit und Robustheit bei weitgespannten Konstruktionen.

Die Verbindungen der Stahlträger mit dem Betonkern müssen justierbar ausgeführt werden, da Abweichungen der Ist-Ausführung des Betonkerns zum Entwurf zu erwarten sind . Solche Anschlüsse können ggf. erst nach dem Aushärten des Ortbetons oder nach notwendigen Schweißarbeiten ausgeführt werden. Daher ist eine temporäre Aussteifung vorzusehen.

Stützen in mehrgeschossigen Stahlrahmen sind in der Regel H-Profile, welche primär Normalkräfte aufnehmen. Wird die Stabilität durch Kerne oder gezielte Vertikalaussteifungen gewährleistet, können die Träger als Einfeldträger bemessen werden. Das allgemein anerkannte Bemessungsmodell nimmt an, dass gelenkige Verbindungen Momente in der Stütze erzeugen. Diese werden unter der Annahme berechnet, dass die Lagerreaktion des Trägers mit einem Hebelarm von 100 mm von der Stirnseite der Stütze wirkt.

Zur Vereinfachung der Montage werden die Stützen in der Regel in zwei- oder dreigeschossigen Einheiten errichtet (etwa 8 bis 12 m Länge). Stützenstöße befinden sich üblicherweise 300 mm bis 600 mm über dem Geschossboden.

Es gibt eine große Vielfalt an unterschiedlichen Deckensystemen [3]. Obwohl Stahllösungen bei kurzen Spannweiten (ca. 6 bis 9 m) besonders geeignet sind, zeigen diese bei großen Spannweiten (zwischen 12 und 18 m) aber auch entscheidende Vorteile gegenüber anderen Materialien. Hierzu zählen unter anderem der stützenfreie Raum, welcher Flexibilität für zukünftige Anpassungen und Nutzungsänderungen ermöglicht, sowie die Reduktion der Fundamentanzahl.

Typische Deckenelemente, die über den Stahlträgern spanen, werden entweder aus Betonfertigteilen oder aus Verbunddecken ausgeführt. Die Stahlträger können unterhalb der Decke angeordnet sein, wobei die Decke auf dem Obergurt des Stahlträgers aufliegt (oft als Unterzug bekannt). Dabei wird zwischen Nicht-Verbund oder Verbundkonstruktionen unterschieden. Bei Verbundkonstruktionen werden Schubverbinder an den oberen Flansch des Trägers geschweißt, um die Last in die Betondecke zu übertragen. Schubverbinder werden häufig durch das Trapezblech hindurch direkt auf der Baustelle an den unbehandelten oberen Flansch des Trägers geschweißt (sogenanntes "Through-Deck"-Schweißen). Alternativ kann die Decke in die Trägerhöhe integriert werden, um die Gesamthöhe zu verringern. Diese Träger werden als Slim-Floor-Träger oder integrierte Träger bezeichnet. Die verfügbare Deckenhöhe ist oft der entscheidende Faktor bei der Wahl eines Deckensystems. In Hochhäusern beispielsweise kann sich die Summe aus der 30-40 Geschossdecken zu einem erheblichen ungenutzten Bauvolumen addieren.

2.4.2 Globalanalyse

Niedrige Gebäude (zwei- oder dreigeschossig) sind nur geringen horizontalen Kräften ausgesetzt und können mit ausreichend robusten Aussteifungssystemen so geplant werden, dass Effekte aus Theorie zweiter Ordnung vernachlässigt werden können. Die

Aussteifung kann entweder durch Diagonalstreben oder Stahlbetonkerne erfolgen. Die Geschossdecken wirken als Scheiben, die alle Stützen mit den Aussteifungselementen oder Kernen verbinden.

Ein nicht ausgesteifter Rahmen besitzt weder einen Betonkern noch ein vollständiges System vertikaler Aussteifungen, welches in erster Linie der Aufnahme horizontaler Lasten dient. In solchen Rahmen müssen mindestens einige Träger-Stützen-Verbindungen momententragend ausgebildet sein, um horizontale Kräfte in die Fundamente zu übertragen und die Stabilität des Rahmens zu gewährleisten.

Ein ausgesteifter Rahmen verfügt über explizit zur Aufnahme horizontaler Kräfte vorgesehene Tragwerkselemente, welche die horizontale Stabilität des Bauwerks erhöhen. Es kann sich dabei um einen oder mehrere Betonkerne handeln, welche in der Regel die vertikalen Versorgungsleitungen, Aufzüge und Treppen enthalten. Andererseits können diese auch durch ein komplettes System von diagonalen Stahlverbänden in vertikalen Ebenen ausgebildet werden, die zusammen mi den deckenscheiben oder horizontalen Verbänden wirken. In einem ausgesteiften Rahmen dürfen die Träger als gelenkig gelagert angenommen werden. Die Stützen tragen primär axiale Lasten, eventuell mit geringen Biegemomenten. Die Träger-Stützen-Verbindungen können als gelenkig bemessen werden, sofern eine ausreichende Rotationskapazität gegeben ist.

Das allgemeine Bemessungsverfahren ist wie folgt:

1. Bestimmung der vertikalen Bemessungslasten im ULS,
2. Berechnung äquivalenter Horizontalkräfte (EHF), zur Berücksichtigung von Imperfektionen,
3. Bestimmung der tatsächlichen Horizontallasten im ULS,
4. Bestimmung der gesamten Horizontallasten (Summe aus 2 und 3 oben),
5. Auswahl der Aussteifungskonfiguration und der Aussteifungselemente (falls vorhanden) auf Grundlage der gesamten Horizontallasten,
6. Tragwerksanalyse mittels Theorie 1. Ordnung zur Bestimmung der Schnittgrößen und zur Bewertung der Verschiebungseffekte,
7. Bestimmung von α_{cr} jedes Geschoss und jede ausgesteifte Ebene unter den ungünstigsten vertikalen Lastkombinationen,
8. Bestimmung des maßgebenden α_{cr} als niedrigster ermittelter Wert,
9. Beurteilung, ob eine Analyse nach Theorie 1. Ordnung ausrechend ist oder eine zusätzliche Analyse nach Theorie „. Ordnung erforderlich ist.

Eine Analyse nach Theorie erster Ordnung ist ausreichend, wenn gemäß EN 1993-1-1 der gesamte Rahmen und somit jedes einzelne Geschoss einen $\alpha_{cr} \geq 10$ aufweist.

Gebäude müssen gemäß der in EN 1990 festgelegten Kombinationen von Einwirkungen bemessen werden. Die Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit (siehe EN1993-1-1), d.h. der Nachweis, dass alle Bauteile des Bauwerks den durch die Globalanalyse ermittelten Einwirkungen ein ausreichender Widerstand gegenübersteht und diese somit als tragfähig gelten, bleibt das zentrale Elemente des Bemessungsprozesses.

Verbindungen unter überwiegend ruhender Belastung und mit den Stahlgüten S235, S275, S355 sowie S460 sind gemäß EN 1993-1-8 [6] auszulegen.

Zusätzlich müssen die Anforderungen des Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit gemäß EN 1990 und EN 1993-1-1 erfüllt werden. Für mehrgeschossige Gebäude sind dabei insbesondere folgende Kriterien relevant:
(1) Horizontale Verformungen;
(2) Vertikale Durchbiegungen von Deckensystemen;
(3) Dynamisches Verhalten.

2.5 Dauerhaftigkeit

Metallische Beschichtungen, insbesondere feuerverzinkte Ausführungen, sind im Vergleich zu herkömmlichen Farbbeschichtungen weniger verbreitet, da sie tendenziell mit höheren Kosten verbunden sind. Bei der Festlegung von Farbbeschichtungssystemen für wiederverwendbare Bauteile kann es jedoch zweckmäßig sein, für das Farbsystem eine hohe oder sehr hohe Dauerhaftigkeitsklasse gemäß ISO 12944-1[11] zu wählen. Da Farbbeschichtungssysteme jedoch in der Regel eine geringere Dauerhaftigkeit als verzinkte Lösungen aufweisen, sind letztere insbesondere für Bauteile mit potenziell mehrfachen Montage- und Demontagezyklen vorzuziehen. Feuerverzinkte Lösungen sollten dabei den Anforderungen gemäß ISO 1461 [12] und ISO 14713 [13] bis [15] entsprechen.

2.6 Dokumentation, Identifizierung und Rückverfolgbarkeit bei Wiederverwendung

Die größten Herausforderungen bei der Wiederverwendung bestehen in den Unsicherheiten hinsichtlich der Produkt- und Materialeigenschaften und den daraus resultierenden Prüfanforderungen. Wenn Material-, Herstellungs- und Ausführungsunterlagen effizient dokumentiert und langfristig verfügbar gehalten werden, können kostenintensive Prüfungen vermieden werden.

Um die Wiederverwendung von Bauteilen zu erleichtern, müssen entsprechende Informationen dokumentiert, über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks aufbewahrt, bei Bedarf aktualisiert und eindeutig den jeweiligen Bauteilen zugeordnet werden, um eine spätere eindeutige Identifizierung zu ermöglichen. Die Effizienz des Wiederverwendungsprozesses kann zusätzlich gesteigert werden, wenn diese Informationen in maschinenlesbarer Form gespeichert werden, z. B. in einem Building Information Model (BIM). Der folgende Abschnitt erläutert die Grundprinzipien des Gebäudeinformationsmanagements sowie der Bauteilidentifikation.

2.6.1 Gebäudepass

Zur Unterstützung einer zukünftigen Wiederverwendung von Tragwerken, die derzeit hergestellt und errichtet werden, empfiehlt es sich, eine Gebäudepass anzulegen. Dieses sollte das Informationen zum Entwurf sowie deklarierte und/oder zertifizierte Materialeigenschaften enthalten, wie z. B.:

- Materialeigenschaften des Stahls (z. B. Werkszeugnisse, CE-Kennzeichnungen, Umweltproduktdeklarationen),
- Spezifikationen und Planunterlagen entsprechend dem Ausschreibungsverfahren definierten Leistungsumfang,
- Fertigungs- und Montagezeichnungen sowie zugehörige technische Dokumentationen,

- sämtliche Verbindungsdetails zwischen Bauteilen.

Darüber hinaus sollten Ergebnisse von Messungen, Bewertungen, Prüfungen oder Inspektionen dokumentiert werden, wie z. B.:

- Feststellung von Nichtkonformitäten, z. B. Maßabweichungen,
- Protokolle über regelmäßige Wartungs-, Änderungs- und Sanierungsarbeiten,
- Vorabbewertungen im Falle einer Wiederverwendung bestehender Stahlbauteile,
- Fotodokumentation.

Die statischen Bemessungsunterlagen eines Gebäudes basieren auf der Ermittlung der Entwurfslasten und der zu erwartenden Beanspruchung, die das Stahltragwerk über den gesamten Lebenszyklus aufnehmen muss. Zudem sind auch die zum Zeitpunkt der Bemessun geltenden Normen und Vorschriften, einschließlich der Schraub- und Schweißverbindungen, zu dokumentieren. Alle Änderungen an diesen Dokumenten sin deindeutig zu kennzeichnen und den Originalen hinzuzufügen, z. B. Konstruktionsänderungen während der Montage.

Es wird empfohlen, dass der Gebäudeeigentümer für die Pflege und Aktualisierung der Gebäudeakte verantwortlich ist. Da diese sämtliche Informationen zu den verbauten Produkten enthält, kann sie als Grundlage für eine systematische Dokumentation dienen. Im Falle eines Austauschs oder Rückbaus einzelner Komponenten ermöglicht die vollständige Dokumentation die Einhaltung aktueller Anforderungen bei einer möglichen Wiederverwendung.

Die Gebäudeakte kann mit einer digitalen Darstellung des Gebäudes verknüpft werden, beispielswiese mit einem 3D-Architekturmodell, einem Building Information Model (3D-Modell mit funktionalen Eigenschaften) oder einem digitalen Zwilling (3D-Modell mit funktionalen Eigenschaften und dynamischen Prozessen). Da sich das Building Information Modelling (BIM) im Bauwesen zunehmend etabliert, wird dieses im folgenden Abschnitt ausführlicher behandelt.

2.6.2 Buildig Information Modelling

Für eine Etablierung einer umfassenden Wiederverwendung von Bauteilen spielt die Verfügbarkeit digitaler Informationen eine zentrale Rolle. Alle relevanten Gebäudedaten können in einem dreidimensionalen digitalen Modell im Rahmen des Building Information Modelling (BIM) gespeichert werden. Die Festlegung des erforderlichen Informationsumfang, den ein BIM-Modell enthalten muss, liegt in der Verantwortung aller Projektbeteiligten. Die ISO-Normen EN ISO 19650-1 [16] und EN ISO 19650-2 [17] führen das Konzept des „Level of Information Need“ (LOIN) ein. Dieses empfiehlt, dass alle Projektbeteiligten den für den jeweiligen Bauteil erforderlichen Informationsbedarf individuell festlegen. Die Schlüsselkonzepte aus Sicht der Tragwerksplanung sind inTabelle .23 undTabelle .24 zusammengefasst.

Tabelle .23 Vorgeschlagene Informationskategorien zur Definition des LOIN: Allgemeine Definition

Kategorie	**Beschreibung**
Kontext	Für jeden Lebenszyklus: Kontext und Zeitpunkt der Nutzung des Bauteils
Projektbeteiligte	Für jeden Lebenszyklus: Akteure der relevanten Disziplinen;
Funktion	Für jeden Lebenszyklus: Funktion des Bauteils;

Kennzeichnung	Für jeden Lebenszyklus: Identifikation des Stahlbauteils und Informationen zur digitalen Rückverfolgbarkeit;
Tragwerksplanung	Für jeden Lebenszyklus: Bemessungsvorgaben und Ergebnisse;
Herstellung und Montage	Für jeden Lebenszyklus: Fertigungs- und Montageaufzeichnungen und deren Qualität;
Herkunft & Eigenschaften	Vollständige Rückverfolgbarkeit des Materials, einschließlich Prüfergebnisse und Zertifikate;

Tabelle .24 Vorgeschlagene Informationskategorien zur Definition des LOIN: Mögliche relevante Daten

Kategorie	Beschreibung
Kontext	Für jeden Lebenszyklus: Projektbeschreibung, Standortdetails, Baujahr usw.
Projektbeteiligte	Für jeden Lebenszyklus: Architekten, Ingenieure, Bauunternehmer usw.
Funktion	Tragende oder nichttragende Funktion, Bauteiltyp (z.B. Träger, Stütze), Nutzung (permanent, temporär) usw.
Kennzeichnung	Für jeden Lebenszyklus: Bauteil-Identifikationsnummer (ID), Standort (z. B. Geschoss, gebäudeteil), visuelle Eigenschaften; Profilbezeichnung usw.;
Tragwerksplanung	Zugehörigkeit zu Primär-Sekundärtragwerk (gemäß EN 1998-1), Duktilitätsklasse gemäß EN 1998-1, Brandschutzklasse, kritische Temperatur, Ausnutzungsgrad / Widerstände, Schubdübelanordnung, Schwingungsverhalten (z.B. Eigenfrequenz, OS-RMS90), Verformungen im Gebrauchszustand, Lastannahmen (Nutzlasten, Wind-, Schneelast usw.), Verbindungstyp (gelenkig, biegesteif oder elastisch – mit Steifigkeitsangabe), maximales Biegemoment und Querkräfte und Lasten für die Verbindungsauslegung, usw.
Herstellung & Montage	Für jeden Lebenszyklus: Herstellungsunternehmen, Herstellungsdatum, Ausführungsnorm (z. B. EN1090-2), Ausführungsklasse, Projektnummer, Montageunternehmen, Montagedatum, Beschichtung/Verzinkung (Korrosionsschutzklasse, Dauerhaftigkeit, Schichtdicke/Masse)
Herkunft & Eigenschaften	Neuer Stahl: Hersteller, Werkszeugnisnummer/ID, Produktnorm, Lieferbedingungen (EN 10204), Stahlgüte, Untergüte und Z-Güte, Wärmebehandlung, Geometriestandards usw. Rückgewonnener Stahl: Lagerhalter, Referenznorm (z. B. EN 10025-2 oder EN 10219-1), Stahlgüte und Untergüte, relevante Eigenschaften gemäß EN 1090-2 Abschnitt 5.1 (gemessene/bestimmte Werte und Bemessungswerte), Verweis auf lagerhalterinterne Dokumentation, Produktnormen (z. B. EN 10365 und EN 10034) usw.

Die Vorschläge inTabelle .24 können als Referenz für die Festlegung des Informationsumfangs für Stahlbauteile im Rahmen eines BIM-Modells herangezogen werden. Die Referenzen [18] bis [20] liefern weitere Anhaltspunkte zur Bestimmung des LOIN. Zusätzlich kann der Leitfaden CWA 17316 [21] als Hilfsmittel für den Informationsaustausch zwischen den Projektbeteiligten dienen.

2.6.3 Rückverfolgbarkeit von Stahlprodukten für eine zukünftige Wiederverwendung

Um kostenintesive Prüfungen der Produkt- und Materialeigenschaften zu vermeiden, sollte eine Verbindung zwischen den physischen Produkten und deren digitalen Informationen (dem Rückverfolgungssystem) hergestellt werden. Üblicherweise wird ein solches System während des Herstellungs- und Montageprozesses der Bauteile implementiert, jedoch meist

nicht über die gesamte Lebensdauer des Gebäudes hinweg erhalten. Daher wird empfohlen, ein dauerhafteres System über gesamte Lebensdauer des Gebäudes einzurichten, welches mit einem digitalen Modell verknüpft ist, in dem die relevanten Informationen über das Gebäude und seine Bauteile gespeichert sind. Diese Maßnahme erleichtert die Wiederverwendung von Stahlkonstruktionen, ohne dass weitere Prüfungen erforderlich sind.

Zu diesem Zweck sollte eine dauerhafte Kennzeichnung eingeführt werden, wobei diese direkt auf dem Stahlbauteil aufgebracht werden sollte. Die Kennzeichnung sollte für jede Gruppe von Bauteilen mit denselben Eigenschaften eindeutig sein. Jedoch wird zusätzlich empfohlen, dass jedes Bauteil eine eigene Kennzeichnung erhält, um dieses eindeutig mit den spezifischen Ergebnissen von Messungen, Bewertungen, Prüfungen oder Inspektionen verknüpfen zu können.

Beispiele für dauerhafte Kennzeichnungen sind lasergravierte Plaketten mit sichtbaren Informationen oder RFID-Etiketten (Radio Frequency Identification) deren Informationen mit einem RF-Scanner gelesen werden können. Beide Methoden sollten über eine eindeutige Kennung verfügen, die mit den digital gespeicherten Informationen verknüpft werden kann; beispielsweise kann die lasergravierte Kennzeichnung ein QR-Code, ein Strichcode oder ein einfacher Identifikationscode sein. Beide Methoden können optional die wichtigsten Informationen (wie z.B. die CE-Kennzeichnung) direkt auf der Plakette enthalten. Dies kann in Form einer eingravierten Tabelle mit wesentlichen Merkmalen oder als digital gespeicherte Daten auf einem RFID-Chip, welcher mit einer Antenne verbunden ist, erfolgen. Ein Beispiel für einen QR-Code eines rückgewonnenen Bauteils ist inTabelle .25 dargestellt.

Entscheidend für eine erfolgreiche Wiederverwendung ist, dass die digitalen Informationen (Gebäudeakte, BIM usw.) während des gesamten Lebenszyklus des Gebäudes und seiner Bauteile sowohl für den Gebäudeeigentümer als auch für die zuständigen Genehmigungsbehörden für Abriss, Sanierung oder Neubau, verfügbar sind. Die Zuverlässigkeit der in den Erklärungen und Zertifikaten enthaltenen Informationen kann z. B. durch unabhängige Rückverfolgbarkeitssysteme (wie bspw. Tracimat in Belgien), von den Baubehörden verwaltete Datenbanken, für die Rezertifizierung zuständige Stahlhersteller oder durch Blockchains gewährleistet werden.

Tabelle .25 Vorgeschlagene Informationen, die auf einer dauerhaften physischen Plakette gespeichert werden sollen

Beispiel für einen möglichen QR-Code für die Bauteilverfolgung: (Probieren Sie es aus)	Typ: Rückgewonnen Herkunft: Großbritannien, Ascot Fertigungsjahr: 1975 ID: C10 Hersteller: Name: Planer: Name Lagerhalter: Name Lagerhalter-Zertifikat: AA001 Stahlgüte: S355JR Werkstoffnorm: EN1090-2 cl. 5.1 Bemessungsstreckgrenze (MPA): 355 Bemessungszugfestigkeit (MPA): 470 Gemessene Streckgrenze (MPA): 405 Gemessene Zugfestigkeit (MPA): 520 Gemessene Bruchdehnung (%): 23 Gemessener CEV: 0,45 Profil: IPE500 Abmessungsnorm: EN 10365 Toleranzen: EN 10034

3 LASTANNAHMEN UND EINWIRKUNGSKOMBINATIONEN FÜR NEUE GEBÄUDE

Eingeschossige Stahlgebäude werden durch ihr Eigengewicht, Nutzlasten sowie durch Wind- und Schneelasten belastet. Sie können so ausgelegt werden, dass sie Zwischengeschosse und Krananlagen tragen, und beinhalten oft zusätzliche Anbauten wie Büroräume, große Vordächer oder andere architektonische Elemente.

Für mehrgeschossige Stahlgebäude sind zusätzlich die aufgebrachten Lasten, die als gleichmäßig verteilte Flächenlasten, Linienlasten oder Punktlasten auf Dächern oder Geschossen wirken, oder eine Kombination dieser Lasten darstellen, zu addieren.

Schnee- und Windlasten sind standortabhängig (Lage, Höhe) und werden von der Geometrie des Bauwerks sowie der örtlichen Topografie in unmittelbarer Umgebung des Bauwerks beeinflusst. Bei eingeschossigen Stahlgebäuden beeinflussen diese Einwirkungen insbesondere die Wiederverwendung eines Gebäudes mit demselben Grundriss und denselben Rahmenabständen.

3.1 Charakteristische Werte der Einwirkungen

3.1.1 Dachlasten

Ständige Lasten auf Dächern beinhalten zusätzlich zu dem Eigengewicht der Stahlkonstruktion auch das Eigengewicht der Dacheindeckung sowie Betriebslasten wie bspw. aus Lüftungs- und Beleuchtungseinrichtungen. Typische Eigengewichte von Dachkomponenten sind inTabelle .31 aufgeführt. Für die sekundäre Bauteile wird ein Mindestzuschlag von 0,10 kN/m^2 empfohlen. Für Betriebslasten sollte ein Nennwert von 0,30 kN/m^2 für Beleuchtungseinheiten, Leitungen für Sprinkleranlagen, Lüftungskanäle sowie Photovoltaikanlagen angesetzt werden.

Tabelle .32 enthält empfohlene Werte der Eigengewichte für verschiedene Arten von Dacheindeckungen.

Tabelle .31 Eigengewichte der sekundären Dachkomponenten

Art der sekundären Stahlkonstruktion	Gewicht (kN/m^2)
Einschalige Dacheindeckung (kurz- und weitgespannte Decking)	0.04 - 0.20
Dämmung (Mineralwolle je 100 mm Dicke)	0.04 - 0.08
Dämmplatten, je 25 mm Dicke	0.07
Dämmstoff Glasfaser, je 100 mm Dicke	0.01
Einlegeböden (0,4 mm - 0,7 mm Dicke)	0.09 - 0.13
Sandwichelemente (40 mm - 150 mm Dicke)	0.10 - 0.15
Stahlpfetten/-riegel (über Dachfläche verteilt)	0.04 - 0.07
Stahlpfetten	0.03 - 0.08

Tabelle .32 Empfohlene Eigengewichte für verschiedene Arten von Dacheindeckungen

Art der Dacheindeckung	**Gewicht (kN/m^2)**
Leichte Sandwichelemente (kurze Spannweiten, bis 100 mm Dicke)	0.15
Schwere Sandwichelemente (lange Spannweiten, bis 200 mm Dicke)	0.35
Profilierte Stahlbleche, Dämmung und Membranen (lange Spannweiten)	0.60

Die Nutzlasten auf Dächern sind in Abschnitt 6.3.4.2 (1) der EN 1991-1-1 und den jeweiligen nationalen Anhängen festgelegt. Diese Lasten gelten ausschließich für den Zugang zu Reinigungs- oder Wartungszwecken (Kategorie H). Die empfohlenen Werte lauten:

- $q_k = 0{,}4$ kN/m^2
- $Q_k = 1{,}0$ kN

Diese Lasten sind nicht mit den Schnee- oder Windlasten zu kombinieren. Die in den europäischen Ländern üblicherweise angenommenen charakteristischen Werte sind inTabelle .**33** für Dachneigungen bis maximal 6° zusammengefasst.

Tabelle .33 Charakteristische Nutzlasten für die Instandhaltung von Dächern (Kategorie H)

Land	**q_k (kN/m^2)**	**Q_k (kN)**
Belgien	0.80	1.5
Tschechische Republik	0.75	1.0
Finnland	0.40	1.0
Frankreich	0.80	1.5
Deutschland	-	1.0
Irland	0.60	1.0
Italien	0.40	1.0
Niederlande	1.00	1.5
Norwegen	0.75	1.5
Portugal	0.40	1.0
Rumänien	0.50	1.0
Slowakei	0.75	1.0
Spanien	0.40	1.0
Schweden	0.40	1.0
Vereinigtes Königreich	0.60	0.9

3.1.2 Lasten auf Zwischengeschossen und Decken in mehrgeschossigen Gebäuden

Für leichte Deckenkonstruktionen wird ein Eigengewicht von 1 kN/m^2 empfohlen, um eine zukünftige Anpassungsfähigkeit zu ermöglichen. Bei gewalzten Profilen, die schwere Deckensysteme, wie z. B. vorgefertigte Platten, tragen, kann dieses Eigengewicht abhängig von Spannweite und Plattendicke 3 bis 4,5 kN/m^2 betragen. Für Bodenbeläge und technische Installationen wird ein Mindestzuschlag von 1,75 kN/m^2 empfohlen.Tabelle .34 fasst die typischen Eigengewichte für Bauteile von mehrgeschossigen Gebäuden zusammen.

Tabelle .34 Typische Eigengewichte für Bauteile [22]

Bauteil	**Gewicht [kN/m^2]**
Fertigteile (mit einer Spannweite von 6 m, ausgelegt für eine Nutzlast von 5 kN/m^2)	3,5 bis 4,5
Verbunddecke (Normalbeton, 140 mm dick)	2,8 bis 3,5
Verbunddecke (Leichtbeton, 130 mm dick)	2,1 bis 2,5
TGA (Beleuchtung)	0.25
Abgehängte Decken	0.1
Stahltragwerk (niedriges Gebäude mit 2 bis 6 Geschossen)	0,35 bis 0,50
Stahltragwerk (mittlere Höhe 7 bis 12 Geschossen)	0,40 bis 0,70

Die Nutzlasten auf Decken sind in Abschnitt 6.3.1.2(1) der EN 1991-1-1 sowie den jeweiligen nationalen Anhängen für Büro- und Wohngebäude geregelt und inTabelle .35 zusammengefasst. In der Regel werden für Bürobereiche 3,0 kN/m^2 und für Wohnbereiche 2,0 kN/m^2 empfohlen.

Tabelle .35 Nutzlasten für Wohn-/Bürobereiche und für Zwischengeschosse

Land	***Wohngebäude* (Kategorie A)***		***Bürogebäude (Kategorie B)***	
	q_k (kN/m^2)	**Q_k (kN)**	**q_k (kN/m^2)**	**Q_k (kN)**
Belgien	2.00	2.00	3.00	3.00
Finnland	2.00	2.00	2.50	2.00
Frankreich	1.50	2.00	2.50	4.00
Deutschland	1.50	2.00	2.00	2.00
Irland	1.50	2.00	3.00	4.50
Italien	2.00	2.00	3.00	2.00
Niederlande	1.75	3.00	3.00	3.00
Norwegen	2.00	2.00	3.00	2.00
Portugal	2.00	2.00	3.00	4.00
Rumänien	1.50	2.00	2.50	4.50
Spanien	2.00	2.00	3.00	4.00
Schweden	2.00	2.00	2.50	3.00

Vereinigtes Königreich	1.50	2.00	2.50	2.70
* Nur Decken				

3.1.3 Schneelasten

Schneelasten hängen vom lokalen Klima, dem Geländes, der Dachneigung, dem Dachtyp und der Gebäudegeometrie ab. EN 1991-1-3[23] legt fest, dass Schneelasten sowohl unter *normalen Bedingungen* (ständige Bemessungssituation) als auch unter *außergewöhnlichen Bedingungen* (ständige und außergewöhnliche Bemessungssituationen) zu ermitteln sind. Die Schneelasten auf Dächern gemäß Abschnitt 5.2(3) ergeben sich zu:

- Ständige Bemessungssituationen:

$$s = \mu_i C_e C_t s_k \qquad (\,.\,)31$$

- Außergewöhnliche Bemessungssituationen mit außergewöhnlicher Schneelast:

$$s = \mu_i C_e C_t C_{esl} s_k \qquad (\,.\,)32$$

- Außergewöhnliche Bemessungssituationen mit außergewöhnlicher Schneeverwehung:

$$s = \mu_i s_k \qquad (\,.\,)33$$

wobei
- μ_i Formbeiwert der Schneelast,
- s_k charakteristischer Wert der Schneelast auf dem Boden (50-jährige Wiederkehrperiode),
- C_e Umgebungskoeffizient, abhängig von der Topografie,
- C_t Temperaturkoeffizient,
- C_{esl} Koeffizient für außergewöhnliche Belastungen.

Für Dachneigungen bis einschließlich 6° werden folgende Richtwerte empfohlen:

$$\mu_i = 0.8 \qquad C_e = 1.0 \qquad C_t = 1.0 \qquad C_{esl} = 2.0\,.$$

Schwankungen der Schneelast ergeben sich hauptsächlich durch Unterschiede im charakteristischen Wert der Schneelast auf dem Boden s_k. EN 1991 Teil 1-3 unterteilt Europa in neun verschiedene klimatische Regionen und definiert Zonen zur Berechnung von s_k in Abhängigkeit von der Geländehöhe über dem Meeresniveau. Es werden vier verschiedene Schneeklassen (S1 bis S4) vorgeschlagen. Für jede Klasse ist ein empfohlener Wert für s_k angegeben, um eine Wiederverwendung in derselben oder einer Region mit geringerer Schneelast zu ermöglichen (sieheTabelle .36 undAbb. .31).

Tabelle .36 Vorgeschlagene Schneeklassen S1 bis S4 für die Bemessung von Dächern

Land	s_k (kN/m^2)			Schneeklasse
	Min. [a]	Landesmittelwert [b]	Min. europäischer Wert	
Finnland	2.00	2.75	2.00	S1
Rumänien	1.50	2.00		
Norwegen	1.50	3.50		
Schweden	1.50	2.50		
Deutschland	0.45	0.85	1.00	S2
Italien	0.60	1.00		
Vereinigtes Königreich	0.45	0.65	0.70	S3
Frankreich	0.45	0.65		
Irland	0.40	0.55		
Niederlande	0.70	0.70		
Belgien	0.50	0.70		
Portugal	0.10	0.30	0.40	S4
Spanien	0.30	0.40		
[a]Unter Annahme der durchschnittlichen Höhe für die weniger kritische Zone des Landes				
[b]Annahme der durchschnittlichen Höhenlage für die Zone, die den größten Teil der Landesfläche ausmacht				

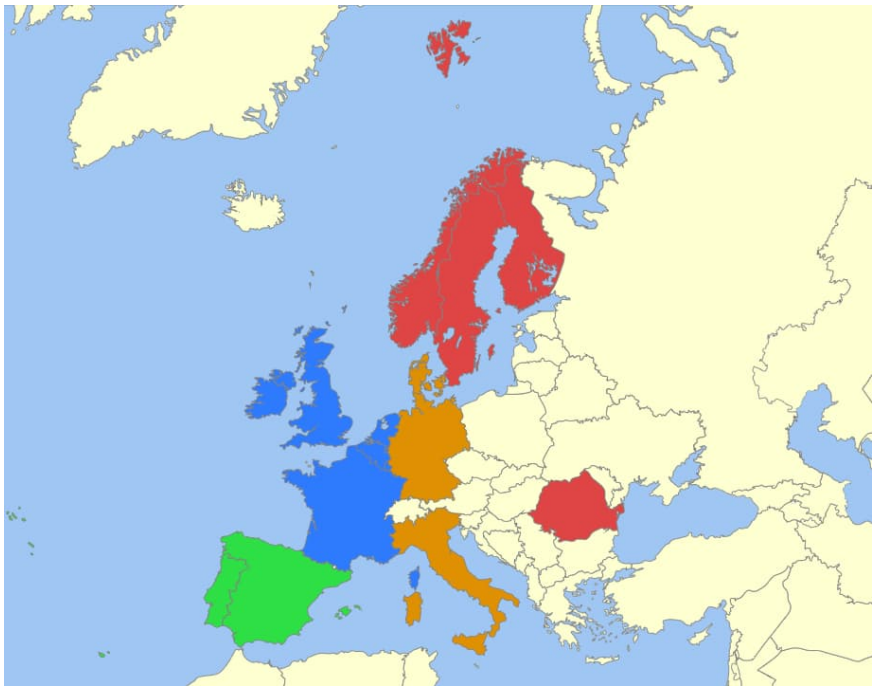


Abb. .31 Vorgeschlagene Bemessungsklassen für die Schneelastkarte basierend aufTabelle .36

3.1.4 Windlasten

EN 1991-1-4[24] behandelt Windlasten als äquivalente statische Lasten. Die Basiswindgeschwindigkeit basiert auf dem 10-Minuten-Mittelwert der Windgeschwindigkeit für den betrachteten geografischen Standort. Diese Geschwindigkeit wird anschließend unter der Berücksichtigung der Orografie, der Geländerauigkeit und der Dauer der Windeinwirkung korrigiert, um einen dynamischen Druck zu berechnen. Dieser wird wiederum unter der Anwendung von Druck- oder Kraftbeiwerten, welche abhängig von der Gebäudeform sind, in eine Flächenlast umgerechnet.

Die Basiswindgeschwindigkeit v_b ist gemäß Abschnitt 4.2 von EN 1991-1-4 als Funktion des Richtungsfaktors c_{dir} und des Jahreszeitenbeiwertes c_{season} definiert, welche den Grundwert der Basiswindgeschwindigkeit $v_{b,0}$ wie folgt modifizieren (für Geländerauigkeitskategorie II):

$$v_b = c_{dir} c_{season} v_{b,0} \qquad (3.)4$$

Der Wert von $v_{b,0}$ ist eine nationale Festlegung und entspricht einer Wiederkehrperiode von 50 Jahren. Tabelle .37 zeigt die Grenzwerte für diesen Parameter sowie Durchschnittswerte in verschiedenen europäischen Ländern [25] . Basierend auf diesen Werten wird ein europäischer Mindestwert für $v_{b,0}$ vorgeschlagen. Des Weiteren werden vier verschiedene Windklassen definiert (Abb. .32 undTabelle .37). Der entsprechende Geschwindigkeitsdruck für jede europäische Klasse $v_{b,class}$ gemäß Gleichung (4.10) in EN 1991-1-4 wird wie folgt berechnet:

$$q_b = \frac{1}{2} \rho v_b^2 \qquad (3.)5$$

wobei ρ die Luftdichte ist. Der vorgeschlagene Wert beträgt 1,25 kg/m^3.

Die so ermittelten Geschwindigkeitsdrücke dienen anschließend zur Berechnung des Spitzengeschwindigkeitsdrucks in einer bestimmten Geländehöhe.

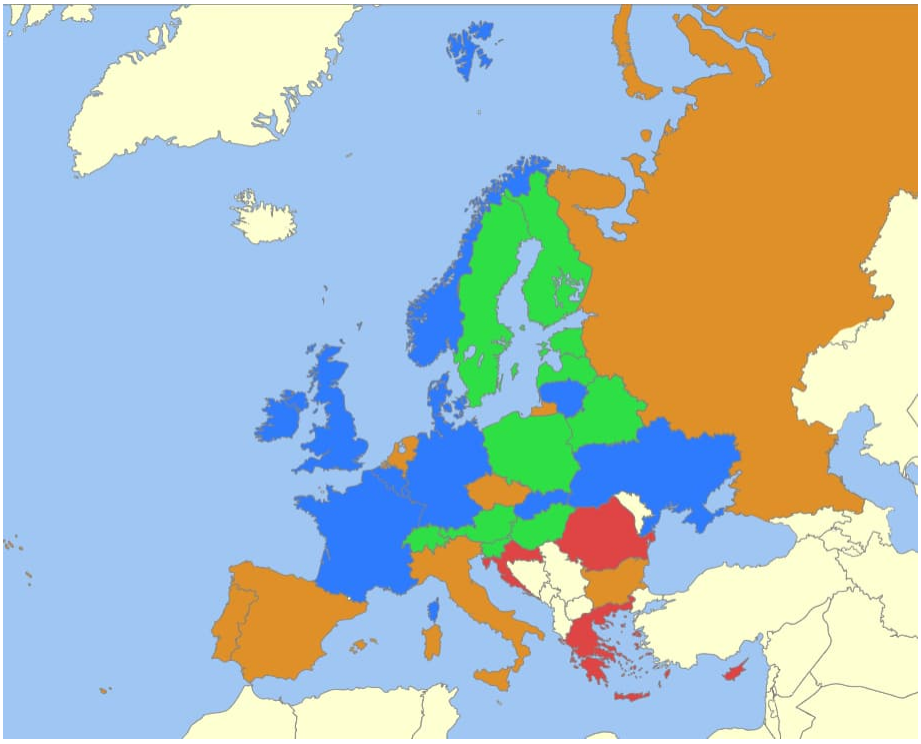


Abb. .32 Vorgeschlagene Bemessungsklassen für die Windlastkarte basierend aufTabelle .37

Tabelle .37 Vorgeschlagene Basiswindgeschwindigkeiten in den europäischen Ländern: Windklassen

Land	$v_{(b0)}$ (m/s)			$q_{b0,Mittelwert}$ (kN/m²)	$v_{b0,Klasse}$ (m/s)	$q_{b,Klasse}$ (kN/m²)	Windklasse
	Min.	Max.	Durchschnitt				
Kroatien	20	48	29	1.05	>28	1.20	W1
Zypern	24	40	29	1.05	>28		
Griechenland	27	33	29	1.05	>28		
Rumänien	27	35	31[a)]	1.20	>28		
Bulgarien	24	36	27	0.91	28	0.98	W2
Tschechische Republik	23	36	27	0.91	28		
Italien	25	31	27[a)]	0.91	28		
Niederlande	25	30	27[a)]	0.91	28		
Portugal	27	30	27[a)]	0.91	28		
Russland	20	44	27	0.91	28		
Spanien	26	29	27[a)]	0.91	28		
Belgien	23	26	24	0.72	26	0.85	W3
Dänemark	24	27	25	0.78	26		
Frankreich	22	28	24[a)]	0.72	26		
Deutschland	23	30	25[a)]	0.78	26		

Irland	25	28	26	0.85	26		
Litauen	24	32	26	0.85	26		
Luxemburg	24	24	24	0.72	26		
Norwegen	22	31	25	0.78	26		
Slowakei	24	26	24	0.72	26		
Vereinigtes Königreich	22	32	25[a)]	0.78	26		
Ukraine	24	31	26	0.85	26		
Österreich	18	28	21	0.55	23	0.66	W4
Weißrussland	22	24	22	0.61	23		
Estland	21	21	21	0.55	23		
Finnland	21	26	22[a)]	0.61	23		
Ungarn	24	24	23	0.66	23		
Lettland	21	27	23	0.66	23		
Polen	22	26	23	0.66	23		
Slowenien	20	30	23	0.66	23		
Schweden	21	26	22	0.61	23		
Schweiz	20	24	21	0.55	23		
[a)]Typischer Wert aus der NA/lokalen Norm							

Für Bemessungszwecke ist es erforderlich, den Spitzengeschwindigkeitsdruck $q_{\mathrm{p}}(z)$ in der Höhe z zu ermitteln. Dieser berücksichtigt sowohl die mittlere als auch die kurzzeitige Geschwindigkeitsschwankungen und kann gemäß EN1991-1-4, Abschnitt 4.5 nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$q_{\mathrm{p}}(z) = [1 + 7 \cdot I_{\mathrm{v}}(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{\mathrm{m}}(z)^2 = c_{\mathrm{e}}(z) \cdot q_{\mathrm{b}} \quad (36)$$

wobei:
$I_{\mathrm{v}}(z)$ - Turbulenzintensität in Höhe z, definiert als die Standardabweichung der Turbulenz geteilt durch die mittlere Windgeschwindigkeit,
ρ - Luftdichte, abhängig von Höhe, Temperatur und dem zu erwartenden Luftdruck,
$c_{\mathrm{e}}(z)$ - Expositionsfaktor,
q_b- Basisgeschwindigkeitsdruck,
$v_{\mathrm{m}}(z)$ - Mittlere Windgeschwindigkeit in Höhe z über dem Gelände, abhängig von der Geländerauigkeit, der Orographie sowie der Basiswindgeschwindigkeit v_{b} und gemäß des folgenden Ausdrucks bestimmt wird:

$$v_m(z) = c_{\mathrm{r}}(z) \cdot c_0(z) \cdot v_{\mathrm{b}}, \quad (37)$$

$c_{\mathrm{r}}(z)$ - Rauigkeitsfaktor,
$c_0(z)$ - Orographiefaktor, der standardmäßig als 1,0 angenommen wird, wenn die Orographie (z. B. Hügel oder Klippen) die Windgeschwindigkeit um weniger als 5 % erhöht oder wenn die durchschnittliche Neigung des anströmenden Geländes weniger als 3° beträgt. Das windzugewandte Gelände kann bis zu einer Entfernung von der 10-fachen

Höhe der orografischen Merkmale berücksichtigt werden. Die Effekte der Orographie können gemäß EN1991-1-4 Anhang A.3 berechnet werden. Nationale Anhänge können abweichende Regelungen vorgeben,

Da Orographie- und Rauigkeitsfaktoren stark standardortabhängig sind, können keine spezifische Empfehlungen für die Wiederverwendung gegeben werden. Als Faustregel wird jedoch empfohlen, das Verhältnis zwischen dem Basisgeschwindigkeitsdruck und dem Spitzengeschwindigkeitsdruck in einer Höhe von 15 m Höhe: $q_{\mathrm{p}}(15)/q_{\mathrm{b}} \geq 1.15$ einzuhalten. Dies gilt im Zusammenhang mit den inTabelle .37 undAbb. .32 definierten Windlastklassen.

3.1.5 Leitfaden zur Anwendung der Wind- und Schneelastklassen

Der vorgeschlagene Entwurfsprozess für neue Gebäude umfasst im Wesentlichen die folgenden Schritte:

- Festlegung der Schnee- und Windlasten je nach Gebäudestandort unter Berücksichtigung der nationalen festgelegten Parameter,
- Vergleich der Lastannahmen mit den empfohlenen Werten der Lastklassen inTabelle .36 undTabelle .37. Planer können entscheiden, die vorgeschlagenen länderspezifischen Durchschnittswerte oder die europäischen Lastklassenwerte zu verwenden,
- Technische Bewertung der Kosten erhöhter Bemessungslasten auf die inTabelle .36 undTabelle .37 vorgeschlagenen Werte.

Die Bewertung sollte nicht nur auf einem Vergleich der örtlich anwendbaren Bemessungslasten mit den inTabelle .36 undTabelle .37 vorgeschlagenen Werten beruhen, sondern das Endergebnis des Entwurfsprozesses berücksichtigen. In der praktischen Tragwerksplanung können die verfügbaren Querschnittsgrößen zu einem nicht vollständig ausgenutzten Bauteil führen. Hierdurch kann eine Erhöhung der Entwurfslasten ohne Erhöhung der Lösungskosten möglich sein. Es ist empfehlenswert, dass Tragwerksplaner die Tragfähigkeit der Komponenten im Grenzzustand der Tragfähigkeit dokumentieren, d. h. angeben, welche charakteristischen Schnee- und Windlasten für das Tragwerk zulässig sind.

Trotz der Verwendung der für die Bemessungsklassen vorgeschlagenen Werte können sich Unterschiede in den Planungsergebnissen ergeben, wenn die Bemessung auf Grundlage unterschiedlicher nationaler Anhänge erfolgt. Die Verwendung nationaler Mittelwerte oder der vorgeschlagenen europäischen Lastklassenwerte zusammen mit der Dokumentation der Tragfähigkeit des Bauwerks erhöht die Möglichkeiten der Wiederverwendung erheblich.

3.1.6 Anpassung charakteristischer Lastwerte in Abhängigkeit der Wiederkehrperiode

Die charakteristischen Werte der veränderlichen Einwirkungen gemäß EN 1991 sind für eine Bemessungslebensdauer von 50 Jahren kalibriert. Für eine geringere Lebensdauer kann es sinnvoll sein, die charakteristischen Werte der veränderlichen Einwirkungen zu reduzieren. Dies ist jedoch nur bei bestehenden Gebäuden oder im Szenario einer vollständigen Verlagerung des gesamten Bauwerks zu empfehlen. Bei einer Bemessungslebensdauer von mehr als 50 Jahren muss der charakteristische Wert der veränderlichen Einwirkungen entsprechend zu erhöhen.

Schneelast

Gemäß Anhang D von EN1991-1-3 gilt für Wiederkehrperioden von mehr als 5 Jahren, sofern die verfügbaren Daten zeigen, dass die jährliche maximale Schneelast einer Gumbel-Wahrscheinlichkeitsverteilung folgt, dass die Beziehung zwischen dem charakteristischen Wert der Schneelast auf dem Boden und der Schneelast auf dem Boden für ein mittleres Wiederkehrintervall von *n* Jahren durch die folgende Formel gegeben ist:

$$s_{\mathrm{n}} = s_{\mathrm{k}} \left\{ \frac{1 - V_{\mathrm{x}} \frac{\sqrt{6}}{\pi} ln\left(-ln(1 - P_n)\right) + 0.57722}{(1 + 2.5923\, V_{\mathrm{x}})} \right\} \qquad (\ .\ )38$$

wobei:

s_k - Charakteristische Schneelast auf dem Boden (bezogen auf eine Wiederkehrperiode von 50 Jahren, gemäß EN 1990),

s_n - Schneelast auf dem Boden mit einer Wiederkehrperiode von *n* Jahren,

P_n - Jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit (entspricht etwa *1/n*),

V_{x}- Variationskoeffizient der jährlichen maximalen Schneelast

Der Variationskoeffizient kann durch die zuständige nationale Behörde festgelegt werden. Gemäß Anhang D der EN1991-1-3 werden Werte zwischen 0,2 und 0,6 als Richtwerte vorgeschlagen. Für eine Reduktion der Bemessungslebensdauer des Gebäudes, sind Werte zwischen V_{x} = 0,20 und 0,30 zu empfehlen.

InTabelle .38 sind die Verhältnisse $s_{\mathrm{n}} / s_{\mathrm{k}}$ für unterschiedliche Wiederkehrperioden und Variationskoeffizienten angegeben.

Tabelle .38 Anpassung der Schneelast in Abhängigkeit von der Wiederkehrperiode (EN1991-1-3)

Wiederkehr Periode	$s_{\mathrm{n}} / s_{\mathrm{k}}$					
	***V*x=0,20**	***V*x=0,30**	***V*x=0,40**	***V*x=0,50**	***V*x=0,60**	***V*x=0,70**
15	0.87	0.84	0.81	0.79	0.78	0.76
30	0.95	0.93	0.92	0.91	0.91	0.90
50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
75	1.04	1.05	1.06	1.07	1.07	1.08
100	1.07	1.09	1.11	1.12	1.13	1.14
125	1.09	1.12	1.14	1.16	1.17	1.18

Der Variationskoeffizient für die Schneelast kann zwischen 0,30 und 1,15 variieren. Als unterer Grenz- bzw. Mittelwert gelten Werte zwischen 0,30 und 0,70 ([26]). Konkrete Werte können in den jeweiligen nationalen Anhängen oder andere gültige Referenzen festgelegt werden.

Windlast

Die mittlere Windgeschwindigkeit, welche mit einer Wahrscheinlichkeit *p* jährlich überschritten wird, ergibt sich durch Multiplikation der Basiswindgeschwindigkeit v_{b} mit dem

Wahrscheinlichkeitsfaktor c_{prob}. Der Wahrscheinlichkeitsfaktor ergibt sich gemäß Anmerkung 4 in Abschnitt 4.2 der EN 1991-1-aus folgendem Ausdruck:

$$c_{\text{prob}} = \left(\frac{1 - K \cdot \ln\left(-\ln(1-p)\right)}{1 - K\, ln(-\ln(0.98))}\right)^{n} \qquad (\ .\ )39$$

wobei:
K - Formparameter, abhängig vom Variationskoeffizienten der Extremwertverteilung,
n - Exponent.

Gemäß dem Eurocode-Hauptdokument werden die Werte 0,2 für *K* und 0,5 für *n* empfohlen. Die Wahrscheinlichkeit *p* ergibt sich über die Wiederkehrperiode, d. h. für eine Wiederkehrperiode von 50 Jahren zu *p* = 1/50=0,02, was zu $c_{prob} \approx 1.00$. führt. Die Werte von c_{prob} für verschiedene Wiederkehrperioden sind inTabelle .39

Tabelle .39 Anpassung der Windlast in Abhängigkeit von der Wiederkehrperiode (EN1991-1-4)

c_{prob}								
Norm	***K***	***n***	**Wiederkehrperiode**					
			15	**30**	**50**	**75**	**100**	**125**
Eurocode-Hauptdokument	0.20	0.50	0.93	0.97	1.00	1.02	1.04	1.05
Deutschland NA	0.10	1.00	0.91	0.96	1.00	1.03	1.05	1.07
Frankreich NA - *p>0*,02	0.15	0.50	0.94	0.98	1.00	1.02	1.03	1.04
Frankreich NA - *p*≤ 0,02	0.20	0.50	0.93	0.97	1.00	1.02	1.04	1.05
Nimmerland NA - Zone I	0.20	0.50	0.93	0.97	1.00	1.02	1.04	1.05
Nimmerland NA - Zone II	0.234	0.50	0.92	0.97	1.00	1.02	1.04	1.05
Nimmerland NA - Zone III	0.281	0.50	0.91	0.96	1.00	1.03	1.05	1.06
Vereinigtes Königreich NA	0.20	0.50	0.93	0.97	1.00	1.02	1.04	1.05
Portugal NA	0.11	1.00	0.91	0.96	1.00	1.03	1.05	1.07

Nutzlasten

Wie in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt, erfolgt Anpassung für Schnee und Wind gemäß EN über einen Wahrscheinlichkeitsfaktors c_{prob}. Für veränderliche Nutzlasten auf Decken kann der charakteristische Wert der veränderlichen Einwirkung gemäß dem Verfahren des niederländischen Nationalen Anhang zu EN 1990, Abschnitt A1.1 (2) [27] wie folgt angepasst werden (sieheTabelle .310):

$$q_{\text{t}} = q_{\text{t0}}\left(1 + \frac{1-\psi_0}{9}\ln\frac{t}{t_0}\right) \qquad (\ .\ )310$$

wobei:
q_t- Angepasster charakteristischer Wert der veränderlichen Einwirkung für die Bemessungslebensdauer *t*,

q_{t0}- Charakteristische Wert der veränderlichen Einwirkung für eine Bemessungslebensdauer von 50 Jahren,
Ψ_0- Kombinationsbeiwert einer veränderlichen Einwirkung (EN 1990),
t - Angestrebte Bemessungslebensdauer,
t_0- Standardmäßige Bemessungslebensdauer von 50 Jahren.

Tabelle .310 Anpassung der Nutzlasten auf Decken in Abhängigkeit von der Wiederkehrperiode

q_t/q_{t0}						
Ψ_0	**Wiederkehrperiode**					
	15	**30**	**50**	**75**	**100**	**125**
0.50	0.93	0.97	1.00	1.02	1.04	1.05
0.60	0.95	0.98	1.00	1.02	1.03	1.04
0.70	0.96	0.98	1.00	1.01	1.02	1.03
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

3.1.7 Thermische Einwirkung

Temperaturänderungen in einer Stahlkonstruktion führen zu thermischen Dehnungen in den Stahlelementen. Die Größe der thermischen Dehnung ergibt sich durch die Multiplikation des thermischen Ausdehnungskoeffizienten, welcher gemäß EN 1993-1-1 zu $\alpha = 12\times10^{-6}$/°C für Temperaturen kleiner oder gleich 100°C festgelegt ist, mit dem Temperaturanstieg. Dies entspricht einer Ausdehnung von 1,2 mm pro Grad pro 100 m Baulänge. Bei fehlender Bewegungseinschränkung führt diese thermische Dehnung zu einer freien Ausdehnung des Elements. Im Falle einer vollständigen Beschränkung der Dehnung entstehen jedoch axiale Spannung in den Bauteilen.

In Rahmenkonstruktionen mit vertikalen Aussteifungen in den Stirnwänden führen Temperaturänderungen zu axialen Kräften in durchgehenden Bauteilen zwischen den aussteifenden Bereichen. Die Höhe der Axialkraft hängt von der Temperaturänderung seit Errichtung des Gebäudes sowie von der Steifigkeit der Einspannungen ab.

In der Praxis werden Axialspannungen durch Schlupf in Schraubverbindungen oder durch elastisches Knicken von Sekundärelementen abgebaut. Durchgehende Längselemente wie Kranbahnträger, Kranschienen, Kehl- und Traufbalken sollten sorgfältig betrachtet und ggf. für Axiallasten infolge von Temperaturänderungen bemessen werden. Den Regelungen aus EN 1991-1-5 [28] sollten befolgt werden, um die thermische Einwirkung zu definieren. Besonders steife Elemente wie Kranbahnträger können potenziell große Kräfte infolge der thermischen Ausdehnung entwickeln.

Als Faustregel gilt: Wenn Dehnungsfugen im Abstand von 150 m bei typischen Rahmenkonstruktionen ohne Kranbahnträger vorgesehen werden, müssen die Längsträger nicht auf Spannungen infolge der Dehnungsbegrenzung ausgelegt werden. Die Anordnung von vertikalen ausgesteiften Feldern mittig zwischen den Dehnungsfugen erlaubt eine ungehinderte thermische Ausdehnung in beide Richtungen.

In Querrichtung führen Temperaturänderungen zu Längenänderungen der Rahmenriegel. Selbst bei 4-feldrigen Rahmenkonstruktionen zeigen die elastischen Analysen, dass die

Auswirkungen der thermischen Einwirkung in der Ebene so gering sind, dass diese vernachlässigt werden können.

Auch Stahlrahmen in mehrgeschossigen Gebäuden dehnen sich infolge von Temperaturänderungen aus bzw. ziehen sich zusammen. Meist ist die Temperaturänderung der Stahlkonstruktion selbst wesentlich geringer als die Änderung der Außentemperatur. Daher wird empfohlen, Dehnungsfugen nach Möglichkeit zu vermeiden, da sie zum einen kostenintensiv sind und zum anderen schwer so ausgeführt werden können, dass die Außenhülle dauerhaft dicht bleibt. Anstelle der Verwendung von Dehnungsfugen kann die Rahmenkonstruktion unter Berücksichtigung der Temperaturänderung bemessen werden. Die Temperatureinwirkungen sind gemäß EN 1991-1-5 anzunehmen und gemäß EN 1990 mit den anderen Lastfällen zu kombinieren. In den meisten Fällen sind die Bauteile bereits ausreichend dimensioniert.

Ohne rechnerischen Nachweis wird in Nordeuropa üblicherweise davon ausgegangen, dass bei mehrgeschossigen Gebäuden Dehnungsfugen erforderlich sind, wenn die Länge des Gebäudes 100 m bei einfachen (ausgesteiften) Rahmen und 50 m bei durchgehenden Konstruktionen überschreitet. In wärmeren Klimazonen liegt die Grenze üblicherweise bei etwa 80 m. Diese Empfehlungen gelten nur für das Stahltragwerk - bei steifen Außenverkleidungen wie z. B. Mauerwerk müssen Dehnungsfugen unabhängig davon vorgesehen werden. Werden Dehnungsfugen vorgesehen, werden diese in der Regel an signifikanten Änderungen der Gebäudeform, an Änderungen der Geschossanzahl oder zur Trennung von Gebäudeteilen auf unterschiedliche Fundamente angeordnet.

3.2 Kombinationen von Einwirkungen

Die Kombinationen von Einwirkungen für einen bestimmten Grenzzustand werden in Abschnitt 8.3.4 der EN 1990 für verschiedene Bemessungssituationen definiert: dauerhafte, d. h. Nutzung des Bauwerks im Endzustand, vorübergehend, außergewöhnliche und seismische Bemessungssituation. Dieser Abschnitt konzentriert sich auf die erste Nutzung, weshalb ausschließlich die grundlegenden Lastkombinationen betrachtet werden. Für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (STR – Tragwerks- oder Querschnittsversagen) können die Lastkombinationen gemäß Gl. 8.12 oder Gl. 8.13 und 8.14 in EN 1090 ermittelt werden.

Wird ein Bauwerk für eine Nutzungsdauer von 100 Jahren ausgelegt, muss die angestrebte Zuverlässigkeit erhöht werden, um die längere Expositionsdauer zu berücksichtigen. EN 1990 gibt Zuverlässigkeitsindizes in der Größenordnung von $\beta \approx 5{,}2$ für einen Bezugszeitraum von einem Jahr und $\beta \approx 4{,}3$ für 50 Jahre an. Obwohl diese β-Werte oft der Schadensfolgeklasse 3 (CC3) zugeordnet werden, kann eine CC2-Struktur mit einer verlängerten Lebensdauer die erforderliche Zuverlässigkeit erreichen, indem die unten beschriebenen Maßnahmen zur Differenzierung der Zuverlässigkeit angewendet werden.

Option A: Erhöhung der Teilsicherheitsbeiwerte ($K_{FI}=1.1$)

Tabelle A.1.9 der EN 1990 erlaubt die Anwendung eines globalen Faktors zur Zuverlässigkeitsdifferenzierung K_{FI}. Wird $K_{FI} = 1{,}1$ auf die Teilsicherheitsbeiwerte für ungünstige Einwirkungen in den Grundkombinationen angewendet, wird die erforderliche Zuverlässigkeit erreicht. In diesem Fall sind die Lastkombinationen mit Gleichung (8.12) aus Abschnitt 8.3.4.2(2) von EN 1990 zu berechnen werden; die Gleichungen (8.13) und (8.14)

würden eine geringere Zuverlässigkeit ergeben. Normale Überwachung und Inspektion (EXC2) ist nur dann ausreichend, wenn die Risikobewertung bestätigt, dass das Zuverlässigkeitsziel erreicht wird. Andernfalls ist eine verstärkte Überwachung (EXC3) zusammen mit der Anwendung von $K_{FI} = 1{,}1$ erforderlich.

Die grundlegenden Lastkombinationen ergeben sich aus dem folgenden allgemeinen Ausdruck, in dem "+ " bedeutet "zu kombinieren mit":

$$\underbrace{\sum_{j\geq 1} 1.5G_{k,j}}_{\text{Unfavourable permanent actions}} \text{"+ "} \underbrace{\sum_{h\geq 1} G_{k,h}}_{\text{Favourable permanent actions}} \text{"+ "} 1.65Q_{k,1} \text{"+ "} \sum_{i>1} 1.65\psi_{0,i}Q_{k,i} \qquad (..)311$$

Option B: Höhere Ausführungsklasse und Überwachung

Alternativ kann eine höhere Ausführungsklasse (z. B. EXC3 oder EXC4) zusammen mit verstärkten Inspektionen und Wartungen festgelegt werden. Dieser Ansatz erhöht die realisierte Zuverlässigkeit, ohne die Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen zu verändern. Jedoch ist zu beachten, dass gemäß Anhang A.5 der EN 1993-1-1 eine höhere Ausführungsklasse nicht zu einer Reduzierung der Teilsicherheitsbeiwerte für die Widerstände herangezogen werden darf.

Die Bemessung unter Anwendung von $K_{FI} = 1{,}1$ (oder mit EXC3) liefert zusätzliche Tragfähigkeitsreserven, die eine spätere Umnutzung oder Wiederverwendung des Bauwerks in Regionen mit abweichenden Bemessungsparametern erleichtern. Die anfängliche konservative Bemessung ist somit konform mit den Zuverlässigkeitsanforderungen von CC2-Tragwerken mit 50-jährigen Nutzungsdauer, auch bei späteren Änderungen der nationalen Anhänge.

Sowohl die Erhöhung der Teilsicherheitsbeiwerte durch $K_{FI} = 1{,}1$ als auch die Wahl einer höheren Ausführungsklasse ermöglichen es, die Zuverlässigkeitsanforderungen für CC2-Bauwerke mit einer Bemessungslebensdauer von 100 Jahren zu erreichen. Die gewählte Strategie ist zu dokumentieren, der Zuverlässigkeitsindex gemäß EN 1990 Gleichung (8.12) zu überprüfen und des Weiteren ist sicherzustellen, dass das Überwachungs- und Inspektionskonzept den gewählten Maßnahmen zur Differenzierung der Zuverlässigkeit entspricht.

4 WIEDERVERWENDUNG DURCH PLANUNG UND VERBESSERTE KONSTRUKTIONSDETAILS

4.1 Tragwerksplanung für eingeschossige Stahlgebäude

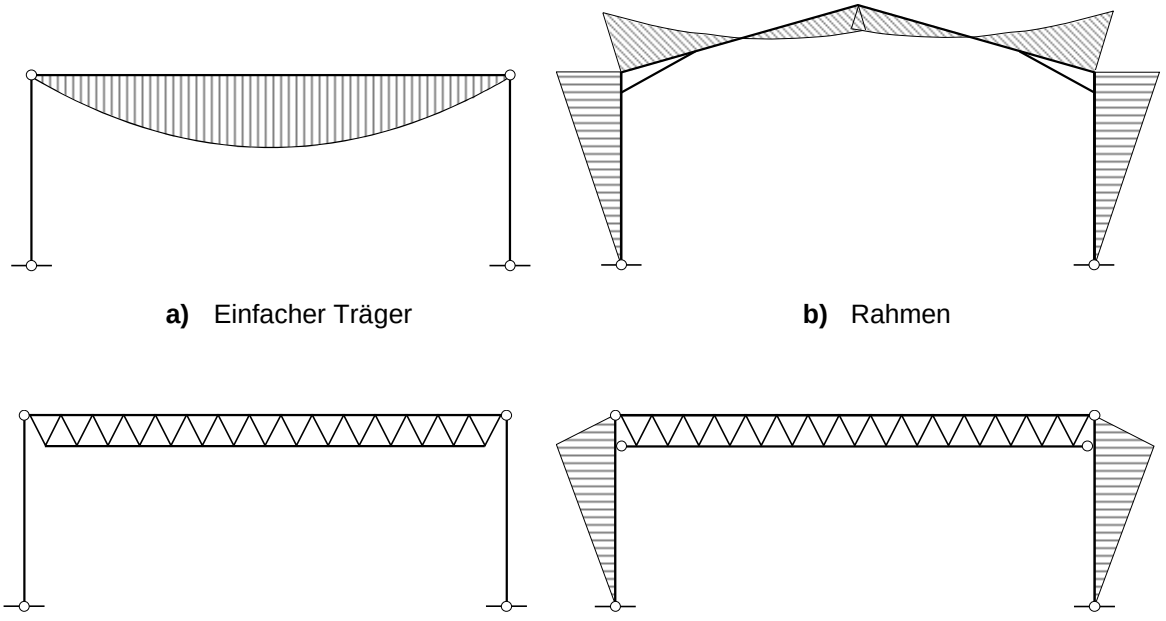
Im Rahmen dieser Untersuchung zur Förderung der Wiederverwendung durch die Planung wurden drei grundlegende Bauformen eingeschossiger Stahlgebäude identifiziert. Diese bestehen typischerweise aus Riegeln (einfache oder durchgehende warmgewalzte Träger oder Fachwerke) und Stützen. Die Träger, Stützen, Verbindungen und Fußpunkte bilden die tragenden Elemente des Stahltragwerks.

Im Hinblick auf die Wiederverwendung einzelner Bauteile oder ganzer Rahmen gelten allgemeine Grundsätze, die im Folgenden näher erläutert werden.

Die Tragstruktur wird zunächst als Gesamtsystem aus Einzelelementen unter Berücksichtigung der Eigenschaften der Verbindungen entworfen. Um eine Wiederverwendung zu erleichtern, sollten die Verbindungseigenschaften klar definiert werden. Eine allgemeine Empfehlung lautet, bei der ersten Nutzung entweder idealisierte gelenkige oder starre Verbindungen vorzusehen, insbesondere wenn dieselben Elemente in ihrer Gesamtheit in einem zweiten Nutzungsfall wiederverwendet werden sollen.

Basierend auf der Strukturanalyse werden für jede Lastkombination die Schnittgrößen ermittelt. Diese werden für die Nachweise der Tragfähigkeit sowie der Stabilität der Bauteile unter Berücksichtigung der sekundären Elemente herangezogen. Für Gebrauchslasten werden zusätzlich die Verformungen berechnet, um die Gebrauchstauglichkeit des Systems hinsichtlich möglicher Einflüsse auf bspw. die Fassade, Krananlagen oder die allgemeine Nutzbarkeit des Gebäudes beurteilen zu können.

Die grundlegenden Tragwerkssysteme sind vereinfacht inAbb. .41 dargestellt.



a) Einfacher Träger

b) Rahmen

c) Fachwerk

d) Rahmen mit Fachwerk

Abb. .41 Tragwerkssysteme des primären Stahlbau und Biegemomentdiagramme aus globaler elastischer Analyse (nach [29])

4.2 Standardisierung im eingeschossigen Stahlbau

Die Möglichkeit, ein sinnvolles Maß an Standardisierung der Primärkonstruktion zu erreichen, hängt im Wesentlichen von folgenden Faktoren ab:

- **Bauweise**: Bei Rahmentragwerken ergeben sich geneigte Träger, während Fachwerke durch klar definierte Formen gekennzeichnet sind,
- **Geometrische Anforderungen**: Betreffen insbesondere die Abmessungen der Konstruktion sowie die Abstände der Rahmen,
- **Stützenhöhe**: Variieren je nach Nutzung des Raums und der Notwendigkeit eines Zwischengeschosses usw.,
- **Einwirkungen**: Lasten auf das Bauwerk sind in der Regel innerhalb einer Region und eines Gebäudetyps vergleichbar,
- **Minimierung der Variantenvielfalt**: Eine möglichst geringe Anzahl verschiedener Trag- und Sekundärbauteile in Bezug auf Bauteillänge und Belastung ist anzustreben,
- **Verbindungsdetails**: Es sollten Schraubenverbindungen verwendet werden, wobei auf die Standardisierung der Verbindungen zu achten ist,
- **Endgiebel (Endrahmen)**: Gleiche Bauweise wie die innenliegenden Rahmen,
- **Stützengeometrie**: Stützen sollten so entworfen und bemessen werden, dass diese sowohl als Rand- als auch als Innenstützen in einem möglichen mehrschiffigen Rahmen eingesetzt werden können,
- **Traufanschlüsse**: Die Verwendung von gekrümmten Segmenten ist zu vermeiden. Empfohlen wird eine Lösung mit einfachen Stirnplatten ggf. mit Schraubenreihen oberhalb und unterhalb des Trägers. Bei größeren Spannweiten kann eine gekrümmte Lösung aus tragfähigkeits- und steifigkeitsrelevanten Gründen notwendig werden. Es ist jedoch zu beachteb, dass die Einführung eines gekrümmten Scheitelpunkts nur einen geringen Einfluss auf die Gesamtkonstruktion und die Stabilität des Rahmens hat.

4.2.1 Möglichkeiten der Wiederverwendung von Rahmenkonstruktionen

Eine konventionelle Rahmenkonstruktion bietet grundsätzliche gute Wiederverwendungsmöglichkeiten einzelner Komponenten, da die Primärbauteile in der Regel große Länge aufweisen. Das Verhältnis von Spannweite zu Querschnittshöhe beträgt typischerweise 40 bis 50 für Stützen und 50 bis 65 für Träger (grün gekennzeichnet inAbb. .42). Diese grün markierten Bereiche können von den kritischeren Zonen (in dieser Abbildung rot markiert) durch Schneiden getrennt werden, sodass sich wiederverwendbare Träger- und Stützensegmente ergeben.

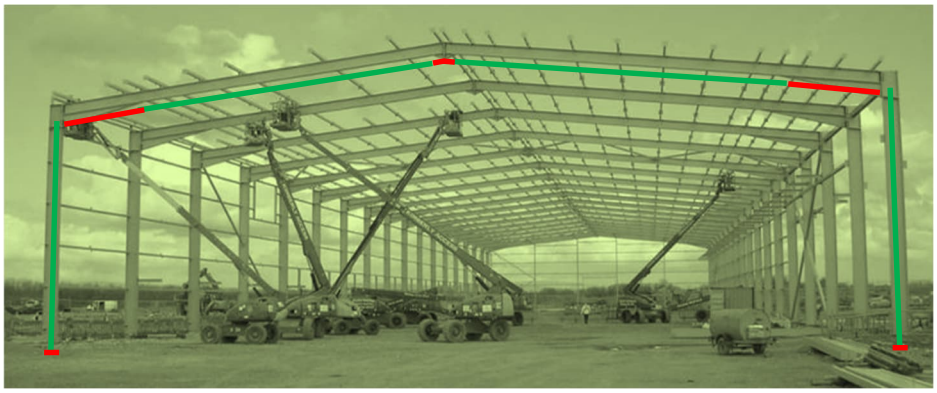


Abb. .42 Wiederverwendungsmöglichkeiten bei Rahmenkonstruktionen: Segmente mit geringem Änderungsbedarf

Zur Förderung der Wiederverwendung wird empfohlen, Rahmenkonstruktionen auf folgende standardisierte Abmessungen zu entwerfen:

- Spannweitenabstufungen von 3 m. Typische Spannweiten sind 30 m, 36 m und 42 m bei Verwendung von Walzprofilen,
- Dachneigung von 6° zur Horizontalen,
- Rahmenabstände von 6 m oder 7,5 m, wobei 7,5 m für Pfetten- und Wandriegelsysteme bevorzugt werden,
- Stützenhöhe bis Oberkante von 7,5 m als Standard (bei Rahmen mit einer Spannweite von weniger als 30 m können 6 m und 7,5 m für größere Spannweiten verwendet werden). Die Höhe bis zur Unterkante der Voute darf bis zu 1 m geringer sein,
- Bemessung der Stützen für ein mögliches Zwischengeschoss bei einem quadratischen Raster von 7,5 m und einer Geschosshöhe von 4 m über der Oberkante des darunterliegenden Geschosses; dies führt zu 7,5 m langen Stützen und ermöglicht die Verwendung von mehrschiffigen Bauformen,
- Voutenlänge von 10 bis 12% der Spannweite und einer Höhe von der doppelten Trägerhöhe (wobei 10 % als Standardmaß empfohlen werden) sollten angestrebt werden,
- Endgiebel sollten baugleich zu den Innenrahmen ausgeführt werden, um spätere Gebäudeerweiterungen zu ermöglichen,
- Stützenfüße mit 4 Schrauben, die im Grenzzustand der Tragfähigkeit als ideal gelenkig angenommen werden können, gleichzeitig aber eine gewisse Drehsteifigkeit für die Berechnung von Verformungen bieten,
- Aussteifungen aus kreisförmigen oder quadratischen Hohlprofilen, typischerweise mit einem Querschnittsmaß (Durchmesser/Breite) zwischen 130 mm und 200 mm und Längen von 3 m bis zu (aber ausschließlich) 12 m Länge zwischen den Rahmen (mit 7,5 m Abstand); "x"-Aussteifungen sind zu vermeiden; es ist vorzuziehen, wenige robuste Elemente zu verwenden, die ohne Änderungen wiederverwendet werden können.

4.2.2 Standard-Rahmenkonstruktionen mit geschweißten Trauf- und Firstsegmenten

Unter Berücksichtigung der im vorigen Abschnitt vorgestellten Empfehlungen kann eine Rahmenkonstruktion aus standardisierten Bauteilen entworfen werden, um die Wiederverwendung von Trägern und Stützen entweder in einer ähnlichen Rahmenkonstruktion oder im allgemeinen Hochbau zu erleichtern. Diese Bauteile sind inAbb. .43 dargestellt und umfassen:

- Gefertigte Voutensegmente (2 Stück) der Länge $L_h \approx 0{,}1L$ bis $0{,}12L$, wobei L die Gesamtspannweite des Rahmens ist,
- Gefertigtes Firstsegment (1 Stück) mit der Länge $L_a \approx 0{,}1L$,
- Balken (2 Stück) der Länge $L_b = 20h_b$, wobei h_b die Balkenhöhe ist,
- Stützen (2 Stück) der Gesamtlänge $L_c = 20h_c$, wobei h_c die Stützenbreite ist.

Die Gesamtspannweite des Rahmens ist gegeben durch:

$$L = 2\,(L_b + L_h)\cos\theta + L_a \tag{4.1}$$

wobei θ die Neigung des Balkens zur Horizontalen und zu 6^o anzunehmen wurde.

Die Voutenhöhe, h_h, beträgt etwa ungefähr das doppelt der Trägerhöhe, also $2h_b$. Diese kann aus Stahlblechen gefertigt werden. Die Endplatte der Voute wird üblicherweise mit einer Dicke von 15 mm oder 20 mm ausgeführt. Insgesamt wirken 4× 2 oder 6× 2 Schrauben der Größe M20 bis M24 auf Zug an der Oberseite der Verbindung sowie 2× 2 Schrauben derselben Größe unter Scherung an der Unterseite der Verbindung.

Ausgehend von dem Momentenverlauf nahe dem First kann die Größe des hergestellten Firstsegments auf ein Mindestmaß reduziert werden, das gerade noch eine tragfähige Verbindung zwischen den Trägern ermöglicht.

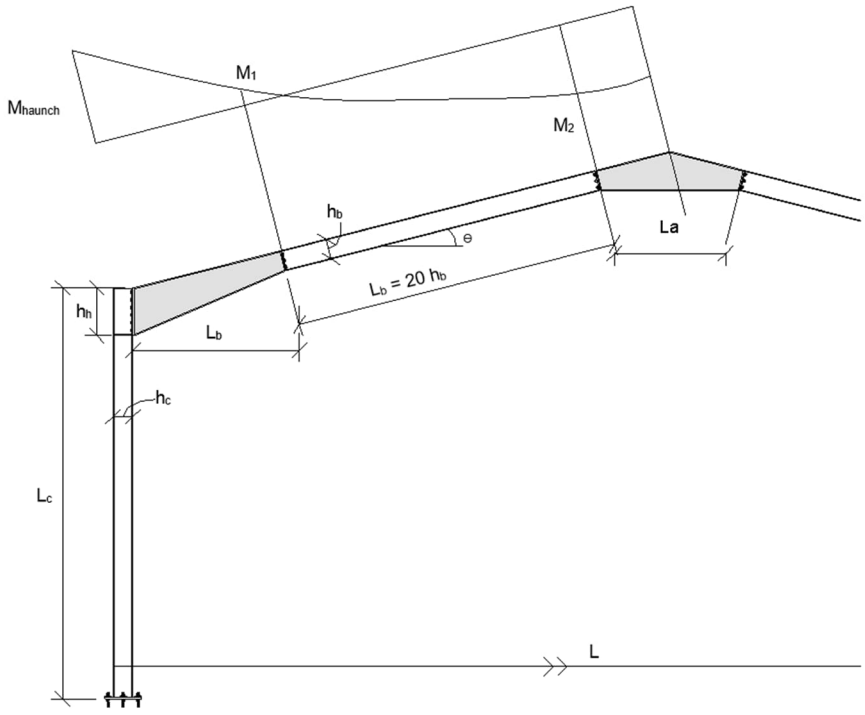


Abb. .43 Wiederverwendbare Bauteile einer Rahmenkonstruktion [5]

4.2.3 Rahmenkonstruktion - Träger mit geschraubter Voute

Weitere Möglichkeiten zur Verbesserung der Wiederverwendbarkeit von Bauteilen einer Rahmenkonstruktion sind inAbb. .44 dargestellt. Diese zeigt ein geschraubtes Voutendetail. In diesem Fall werden vorgespannte Schrauben verwendet, um das separaten Voutensegment mit dem geneigten Träger kraftschlüssig zu verbinden. Ein ähnliches Beispiel eines solchen Voutensegments ist inAbb. .45 dargestellt. Hier handelt es sich um ein Profil mit verjüngtem Querschnitt. Das gleiche Verbindungssystem kann auch für den Firstanschluss verwendet werden, wie inAbb. .46 dargestellt.

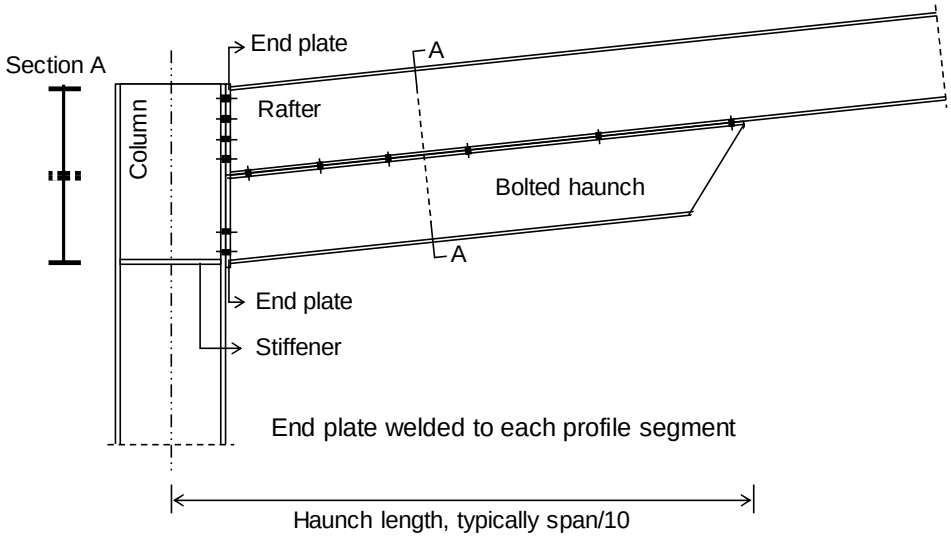
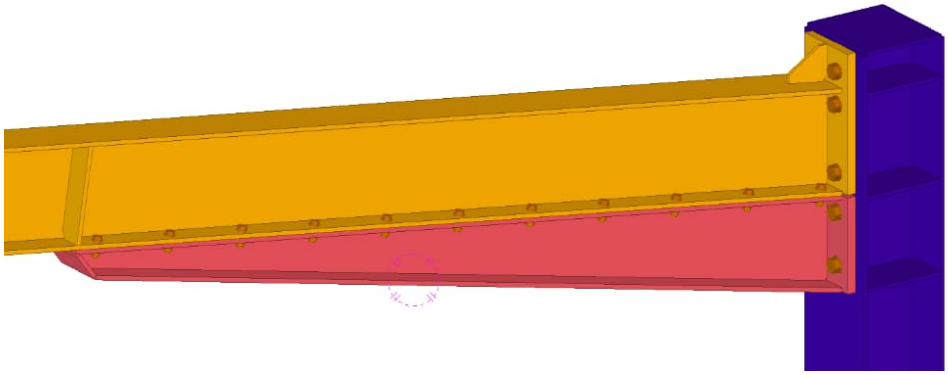


Abb. .44 Verschraubte Voutenteile in einem Portalrahmen [5]

Sowohl die geschraubte Voute als auch der Träger sind jeweils einzeln mit angeschweißten Stirnplatten versehen, wodurch sich das Verbindungsverhalten analog zu dem eines üblichen Traufanschlusses einer Rahmenkonstruktion ergibt. Abb. .45 undAbb. .46 zeigen alternative Ausführungen für Trauf- bzw. Firstanschlüsse.



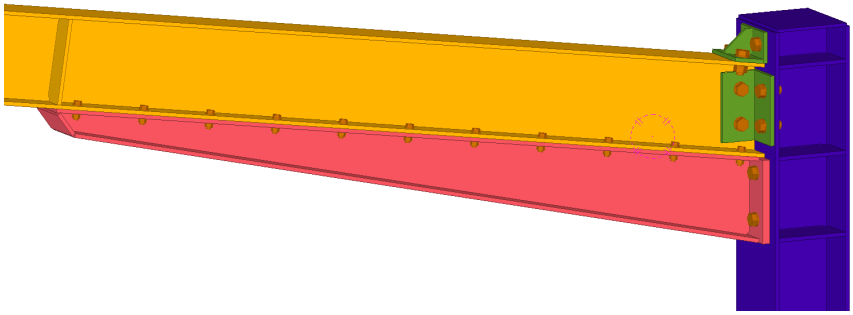


Abb. .45 Geschraubtes und konisches Voutensegment einer Rahmenkonstruktion

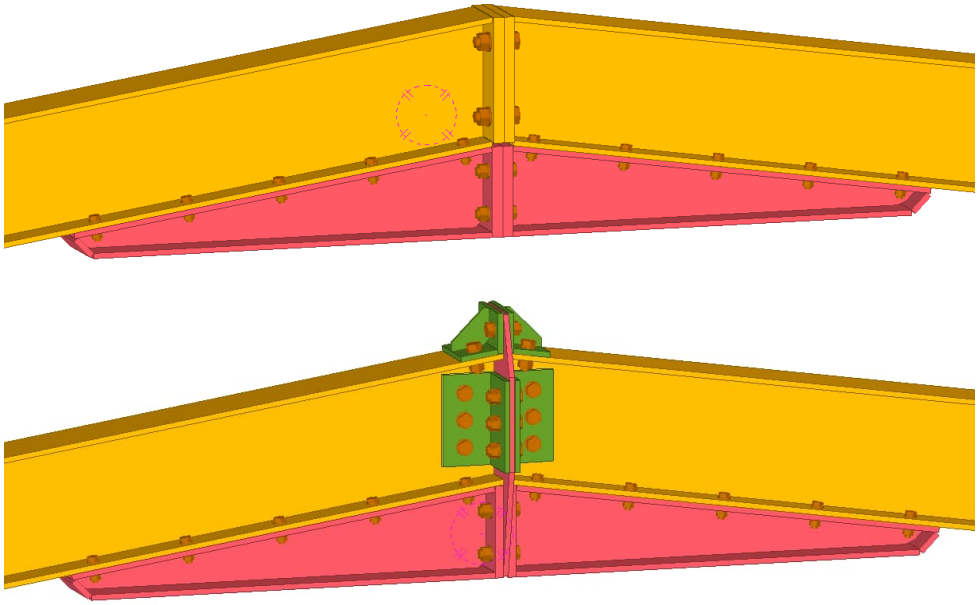


Abb. .46 Geschraubte Firstsegmente einer Rahmenkonstruktion

4.2.4 Rahmenkonstruktion mit Eckstrebe

Bei kurzen bis mittleren Spannweiten kann das Voutendetail durch eine Strebe aus einem quadratischen Hohlprofil (SHS) ersetzt werden, welches mit jeweils vier Schrauben an die Flansche von Träger und Stütze angeschlossen werden (sieheAbb. .47). Diese Schrauben wirken sowohl auf Scherung als auch auf Zug in Abhängigkeit vom aufgebrachten Biegemoment.

Im dargestellten Beispiel ist die geneigte Strebe in einem Winkel von 48^{o} zur Horizontalen angeordnet, sodass die Enden der Strebe im gleichen Winkel zur Stabachse stehen. Die Strebe wird in der Regel mit einem SHS-Profil ausgeführt und ist etwa 1...1,5 m unterhalb der Achse des Trägeranschlusses angeordnet, wodurch eine Beeinträchtigung der Nutzung des Innenraums entstehen kann. Der Steg von Stütze und Träger müsste lokal durch Steifen verstärkt werden. Um die vollständige Wiederverwendung des Trägers zu ermöglichen, sollte eine geschraubte Stirnplatte verwendet werden, die mit allgemein standardisierten Anschlussdetails kompatibel ist.

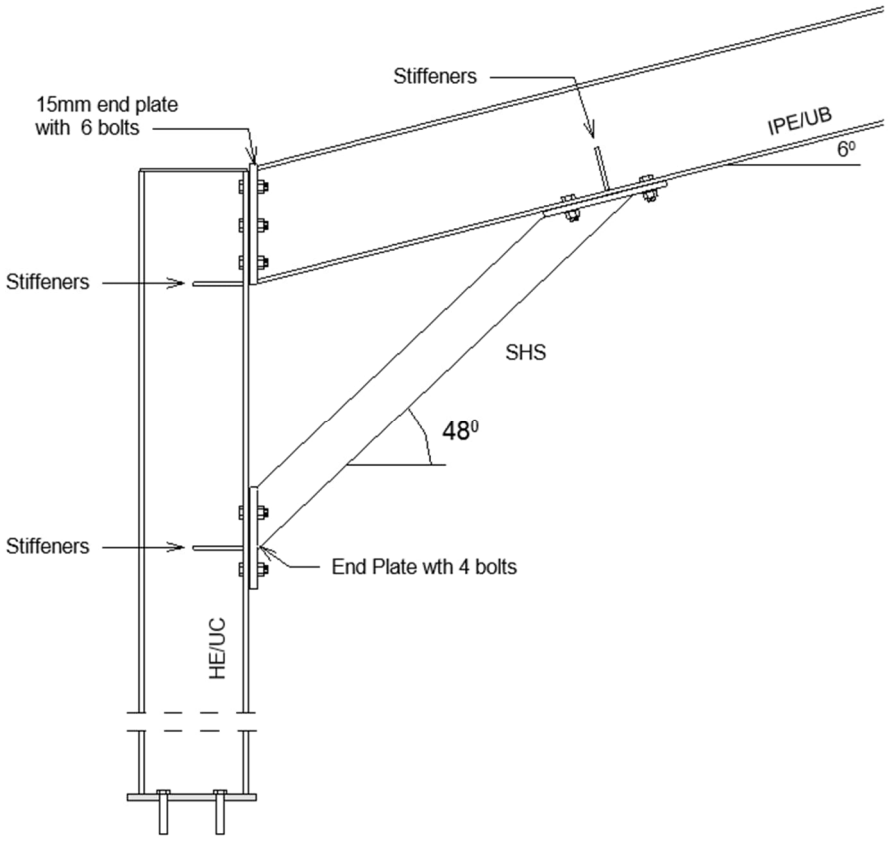


Abb. .47 Verstrebte Voute einer Rahmenkonstruktion [5]

Das gleiche Strebendetail kann im First verwendet werden, jedoch ist die Strebe in diesem Fall horizontal angeordnet. Aufgrund der geringen Neigung des Trägers ist diese Lösung weniger effizient hinsichtlich der Biegesteifigkeit als eine Voute.

4.3 Anschluss der Stützen an die Fundamente

Je nach Größe des Bauwerks können drei allgemeine Anschlussarten an das Fundament in Betracht gezogen werden:

- Gelenkige Anschlüsse mit geschraubten Winkeln für relativ einfache und kurz gespannte Rahmenkonstruktionen. Ein Beispiel ist inAbb. .48a dargestellt. Um die Vergussarbeiten der Fuge zu erleichtern, kann die vorgeschlagene Lösung auf einer Grundplatte verschraubt werden, welche eine konstante Unterkante ermöglicht,
- Kopfplattenanschlüsse, die zwar eine gewisse Biegesteifigkeit aufweisen, jedoch in der Regel als gelenkig angenommen werden - es sei denn, die Kopfplatte ragt über den Querschnitt der Stütze hinaus. Die Verwendung zusätzlicher geschweißter Steifen wird nicht empfohlen, um die Wiederverwendung der Stützen zu erleichtern,
- Stützen-"Schuh", welcher mit der Stütze durch vorgespannte Schrauben verbunden wird, wie inAbb. .48 b gezeigt, kann ein hohes Biegemoment auf das Fundament übertragen. Der Stützenschuh wird für eine bestimmte Stützengeometrie vorgefertigt. Er kann zusätzlich mit einem geschraubten Anschluss für schräg verlaufende Aussteifung kombiniert werden, wie ebenfalls gezeigt.

a) Gelenkig b) Eingespannt

Abb. .48 Beispiele für demontierbare Anschlüsse von Stützen an Fundamente

Es wird außerdem darauf hingewiesen, dass die Stützenfüße zugänglich sein sollten, damit sie ohne Beschädigung und ohne größere Abbrucharbeiten demontiert werden können.. Abb. .49 zeigt ein entsprechendes Anschlussdetail mit guter Zugänglichkeit.

Abb. .49 Beispiel für einen zugänglichen Stützen-Fundament-Anschluss [30]

4.4 Wiederverwendbare Fachwerklösungen

Grundsätzlich ist die Wiederverwendbarkeit geschweißten Stahlfachwerke als gut zu bewerten, da die Fachwerke über Schraubverbindungen an die Stützen angeschlossen sind. Die Fachwerkstäbe weisen eine hohe Tragfähigkeit um ihre Hauptbiegeachse auf und lassen sich leicht demontieren. Geschweißte Fachwerke werden jedoch für spezifische Spannweiten und Lastanforderungen entworfen und hergestellt, sodass nachträgliche Änderungen der Spannweite nur schwer umsetzbar sind.

Eine typische Fachwerkkonfiguration ist inAbb. .410 dargestellt. Diese wird in der Regel in zwei Einzelteilen hergestellt, die über Muffenverbindungen im Firstbereich sowie mittig im Untergurt verbunden werden. Diese Verbindungen wirken je nach Lastfall auf Zug oder Druck. Der Anschluss an die Stütze kann entweder gelenkig oder biegesteif ausgeführt werden (z. B. ist das Fachwerk inAbb. .410 biegesteif mit der Stütze verbunden, während jenes inAbb. .411 gelenkig angeschlossen ist).

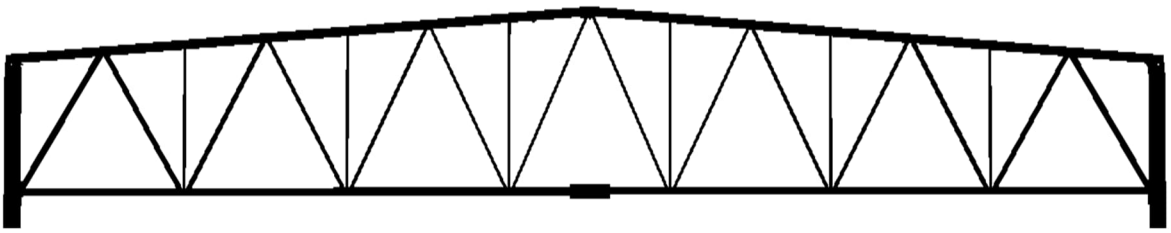


Abb. .410 Typische Fachwerkkonfiguration mit einer Dachneigung von 1:20 (~3°) [31]

Die folgenden Grundprinzipien gelten für die Wiederverwendung von Fachwerken:

- Fachwerke sollten bei Spannweiten über 30 m in Betracht gezogen werden und sind besonders geeignet, wenn zusätzliche Lasten wie bspw. hängende Leitungen oder Laufstege einwirken, ,
- Es wird ein Verhältnis von Spannweite zu Höhe von etwa 20 empfohlen. Bei einer Spannweite von 40 m ergibt sich somit eine Fachwerkhöhe von 2 m im Firstbereich. Dieses Verhältnis bietet eine hohe Biegesteifigkeit und kann als Standardwert für die Wiederverwendung angenommen werden,
- Aufgrund der höheren Herstellungskosten sollten Fachwerke idealerweise in einem Abstand von 7,5 m oder sogar 9 m angeordnet werden, abhängig von der Gestaltung der sekundären Tragelemente,
- Das Fachwerk sollte aus Hohlprofilen (SHS) hergestellt werden, wobei die Gurte und die diagonalen Aussteifungsstäbe möglichst dieselbe Breite aufweisen sollten, um hohe Normalkräfte ohne lokales Versagen der Profile zu übertragen,
- Bei Fachwerken mit Spannweiten über 50 m ist eine Lieferung in zwei gleich großen Segmenten oft nicht möglich. In solchen Fällen sollten zusätzliche Stoßverbindungen im Bereich der Viertelspunkte vorgesehen werden,
- Die Breite der Gurte ist so zu wählen, dass sie das Eigengewicht beim Anheben an zwei Punkten unter einem angenommenen Winkel von 45° tragen können. Für ein 20 m langes Fachwerksegment mit Hebepunkten im Abstand von 12 m sollte der Schlankheitsgrad in Querrichtung idealerweise 200 nicht überschreiten. In diesem Fall ergibt sich eine Mindestbreite von 150 mm (d. h. 150× 150 SHS oder 150× 100 RHS),
- Der Obergurt ist in der Regel durch die Dachpfetten unter Druck stabilisiert, während der Untergurt bei Windsoglasten in Feldmitte zusätzlich abgestützt werden muss. Dies kann bspw. über eine geneigte Strebe an einem Balken in Firsthöhe erreicht werden,
- Fachwerke können erhebliche Biegemomente auf die Stützen übertragen, und bieten dadurch eine effiziente Aussteifung gegen horizontale Kräfte, sofern der Untergurt durch in der Dachfläche liegende Verbände stabilisiert wird.

Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Wiederverwendbarkeit geschweißter Stahlfachwerke besteht darin, die übliche Fachwerkgeometrie so anzupassen, dass die Träger stets aus zwei Teilen mit einheitlicher Höhe und parallelen Ober- und Untergurten bestehen, wie inAbb. .411 dargestellt. Dieses System erlaubt die Anpassung an unterschiedliche Dachneigungen und damit eine gewisse Variabilität der Spannweiten. Die beiden Hälften werden in der Mitte mit projektspezifischen Verbindungselementen verbunden, die Dachneigungen zwischen 3^o und 10^o ermöglichen. Diese Verbindungen sind mit vorgespannten Schrauben ausgeführt, die Scherkräfte übertragen, siehe Abb. .412.

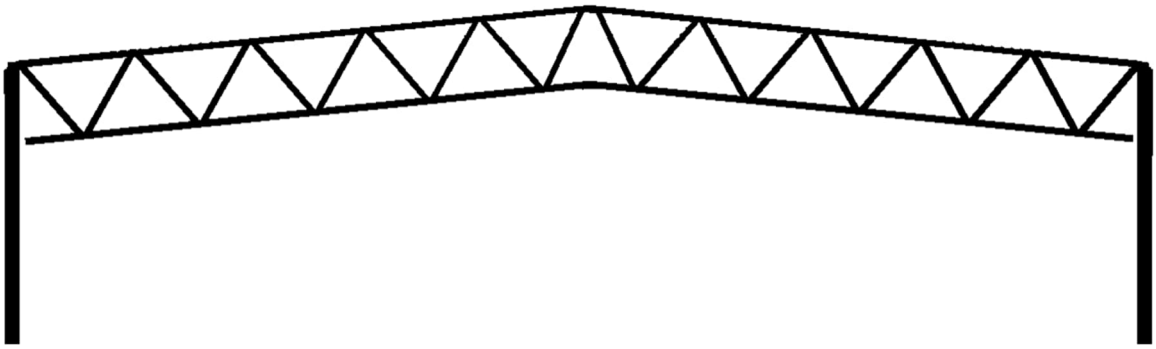


Abb. .411 Stahlfachwerksystem für bessere Wiederverwendbarkeit [31]

Um die Rahmenwirkung zwischen den Fachwerken und den Stützen aufrechtzuerhalten, muss ein Verbindungselement zwischen den Enden des Untergurts und dem Flansch der Stütze vorgesehen werden.

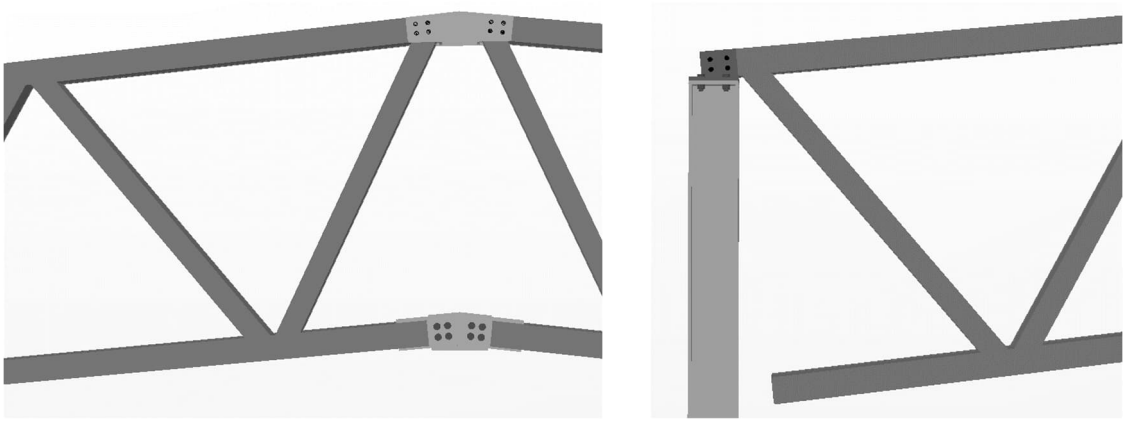


Abb. .412 Verbindungsstücke, die die Montage von Fachwerkbindern mit unterschiedlichen Neigungen ermöglichen [31]

4.5 Ausgesteifte kastenförmige Tragwerke

Ausgesteifte kastenförmige Konstruktionen bieten gute Möglichkeiten zur Wiederverwendung, da sich die Bauteile leicht standardisieren lassen. Alle Verbindungen zwischen den Bauteilen können gelenkig ausgeführt werden, was eine einfache Detaillierung und eine minimale Anzahl an Schrauben erfordert. Diese Lösung erfordert ein Aussteifungssystem in Längsrichtung des Gebäudes sowie eine Dachverbandsaussteifung, die von den ausgesteiften Giebelrahmen getragen wird. Diese Giebelrahmen gewährleisten die Stabilität der Rahmen in der Ebene (sieheAbb. .413). Dieses Konzept wird häufig bei temporären Tragwerken verwendet, kann jedoch auch für eingeschossige Gebäude mit kurzen Spannweiten in Betracht gezogen werden.

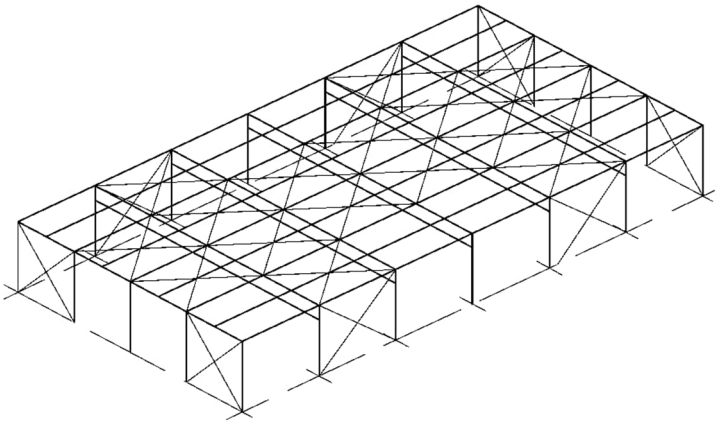
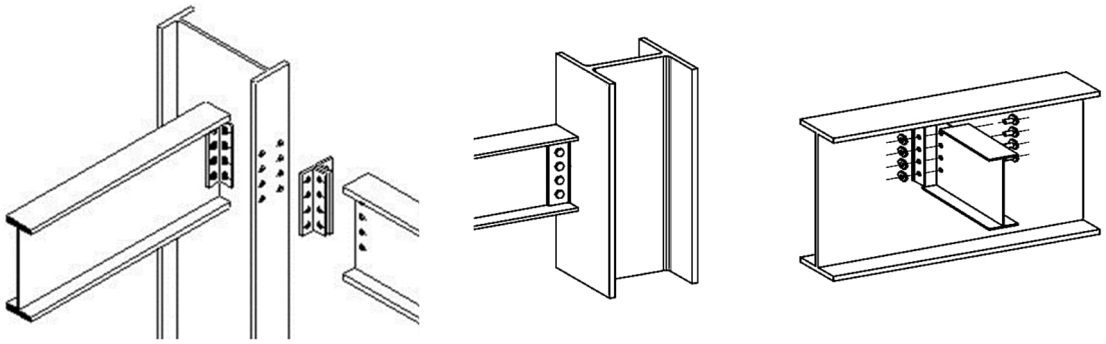


Abb. .413 Beispiele für ausgesteifte Kastenstrukturen [5]

4.6 Zwischengeschosse

Es wird empfohlen, für Zwischengeschosse ein Stützenraster mit einem Vielfachen von 1,5 m, typischerweise 6 m, zu verwenden. Für Rahmenkonstruktionen mit einer Traufhöhe von 7,5 m wird eine Standardhöhe von 4 m über dem Erdgeschoss vorgeschlagen. Zwischengeschosse sollten ein Raster aus gelenkig gelagerten Trägern mit Winkelverbindungen verwenden (sieheAbb. .414 a). Bauteile mit gleichem Querschnitt sollten identische detailliert werden.

Beim Anschluss von Trägern an die schwache Achse einer Stütze ist sind Winkelverbindungen unter Umständen nicht möglich. In solchen Fällen kann ein Anschluss mit Fahnenblech verwendet werden (sieheAbb. .414 b). Allgemein wird empfohlen, keine Schweißverbindungen an Trägern von Zwischengeschossen anzuordnen. Werden Hohlprofilstützen verwendet, sind Hollo-Bolt- oder Blind-Bolt-Lösungen als Verbindungselemente empfehlenswert (sieheAbb. .415).



a) Winkelverbindung b) Verbindung mit Fahnenblech

Abb. .414 Empfohlene Anschlüsse für Zwischengeschossträger

a) Hollo-Bolt b) Blind-Bolt

Abb. .415 Hollo-Bolt und Bild Bolt Lösungen [32]

Eine Alternative zu den Winkel- und Fahnenblechverbindungen stellt das inAbb. .416 dargestellte System dar, das die Montage- und Rückbauprozesse beschleunigen kann. Eine weiterführende Beschreibung dieses Konzepts findet sich unter [33].

Abb. .416 Quicon-Verbindungen [34]

Eines der kritischen Details, das die Wiederverwendbarkeit von Zwischengeschossen erschwert, ist die dauerhafte Verbindung zwischen der Deckenplatte und den Trägern, wie z. B. bei der herkömmlichen Lösung mit Verbunddecken, bei denen Schubdübel angeschweißt sind. Um die Wiederverwendbarkeit der Deckenträger zu erhöhen, wird die Verwendung von lösbaren Deckensystemen empfohlen, wie sie inAbb. .417 bisAbb. .420 dargestellt sind.

Die inAbb. .420 vorgeschlagene demontierbare Verbunddeckenlösung bietet den Vorteil der Demontierbarkeit bei gleichzeitig erhöhter Steifigkeit und Tragfähigkeit, die sich aus der Verbundwirkung zwischen dem Stahlträger und der Betonschicht über dem Stahlblech ergibt. Hinweise zur Bemessung und zum Entwurf solcher Systeme finden sich unter [35].

Abb. .417 Demontierbares Deckensystem mit Fertigteilen und Bodenaussteifung [29]

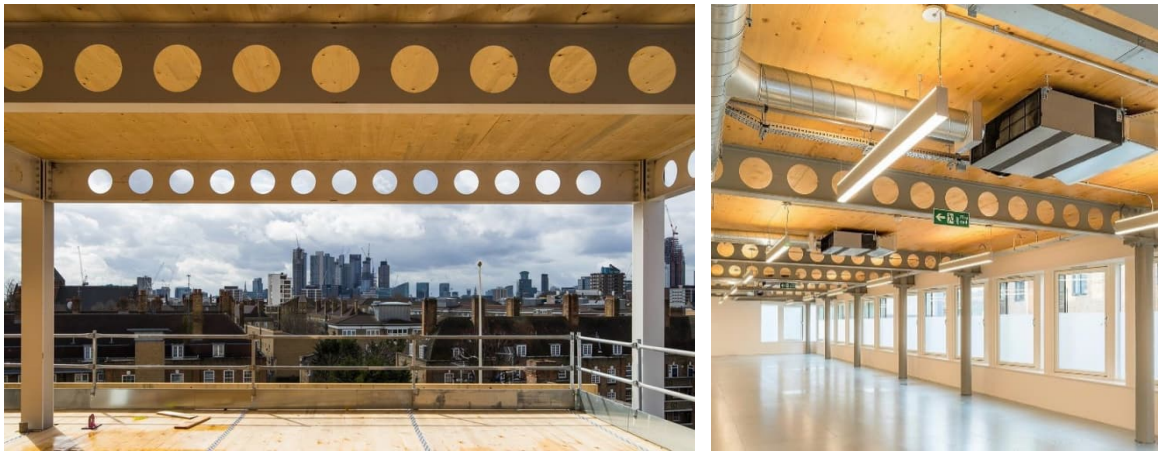


Abb. .418 Demontierbares Deckensystem mit Brettsperrholz (CLT) [36]

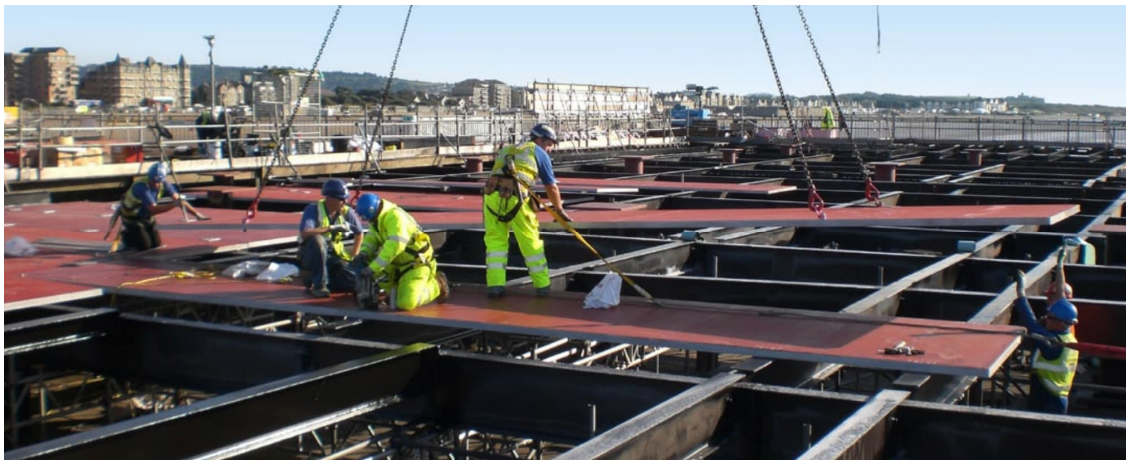


Abb. . 419 Demontierbares Deckensystem mit SPS-Paneelen - zwei Stahlplatten mit Polymerkern [37]

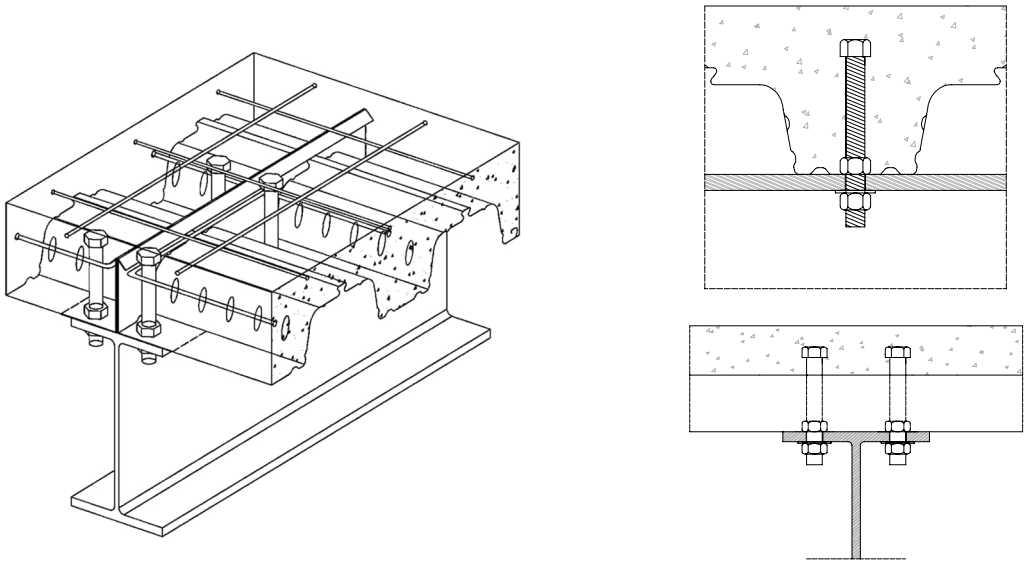


Abb. .420 Demontierbares Verbunddeckensystem mit eingegossenem Randstreifen, der eine Schnittlinie bildet, um die Wiederverwendung von Deckensegmenten zu ermöglichen [35]

4.7 Sekundärtragwerk und Verkleidungen

Sekundärtragwerk und Verkleidung sind die beiden kritischsten Gebäudeteile für ein effizientes, wiederverwendbares eingeschossiges Gebäude. Dies liegt vor allem an der beträchtlichen Anzahl von Verbindungen und Befestigungen zwischen der Primär- und Sekundärstruktur sowie der Fassade. Das Entfernen einer dieser beiden Schichten erleichtert den Rückbau- und Wiederverwendungsprozess erheblich. Daher wird, wann immer möglich, der Einsatz von weitgespannten Verkleidungssysteme empfohlen, um die Montage von Sekundärkonstruktionen vor Ort zu vermeiden. Werden Sekundärkonstruktionen jedoch notwendig, sollte die Anzahl solcher Bauteile auf ein Minimum reduziert werden, um auch die Anzahl der Verbindungselemente zwischen den Ebenen zu senken.

4.7.1 Sekundärtragwerk

Sekundäre Bauteile sind in der Regel Z-Profile als Pfetten für Dächer und C-Profile als Wandriegel. Z-Profile werden häufig mit Muffen oder Überlappungen über den Stützen konstruiert, um eine kontinuierliche Tragwirkung zu gewährleisten. Dazu werden die Pfetten über Winkel mit dem oberen Flansch der Träger verschraubt. Um die Wiederverwendung der Träger zu erleichtern, sollten diese Winkel mit 2 Schrauben in einem Mindestabstand von 1,8 m entlang des Trägers befestigt werden. Daher wird analog zum Mindestabstand der Schrauben auch ein Mindestabstand der Pfetten von 1,8 m empfohlen. Bei einer Spannweite von 7,5 m haben die überlappenden Pfetten häufig eine Höhe 250 mm.

In vielen Ländern werden Kassettensysteme als Alternative zu C-Profil-Riegeln verwendet, da sie die Außenverkleidung und die Dämmung in der Kassettenschale tragen. Kassetten sind besonders effizient bei Stützenabständen von bis zu 6 m.

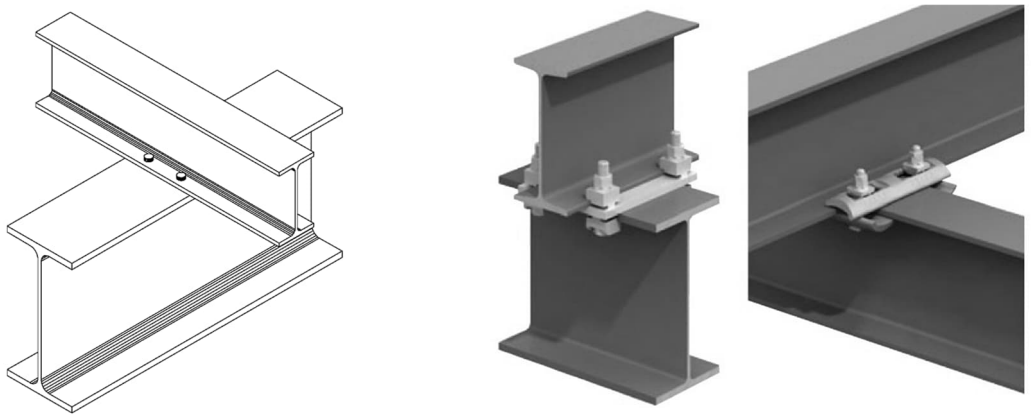
Omegaförmige Pfetten sind für Anwendungen mit geplanter Wiederverwendung besonders geeignet, da sie keine zusätzlichen Winkel benötigen und direkt mit den Trägern verschraubt werden. Jedoch sind diese nicht für große Spannweiten (über 6 m) geeignet, es sei denn, es werden Muffen oder Überlappungen angeordnet.

Aussteifungsstäbe sollten möglichst vermieden werden, da sie zu einem deutlich höheren Montageaufwand führen und Bohrungen in der Sekundärstruktur erfordern, wodurch die Wiederverwendbarkeit beeinträchtigen wird. Obwohl der Verzicht auf diese zu schwereren Lösungen führen, ist der deutlich Montageprozess schneller. Die Wandriegel werden in der Regel mit Aussteifungsstäben versehen, um ihre Position während der Montage der Verkleidungselemente zu stabilisieren. Durch eine geeignete Planung und Konstruktion in und außerhalb der Ebene lassen sich aussteifende Stäbe in vielen Fällen vermeiden.

4.7.2 Alternative Systeme für Sekundärtragwerke

Die übliche Lösung für Sekundärtragwerke beruht auf kaltgeformten Pfetten und Riegeln, die in der Regel eine wirtschaftliche Lösung bei Abständen von 1,8 m bis 2 m zwischen den Elementen darstellen. Eine mögliche Maßnahme zur Verringerung der Verbindungsanzahl zwischen den Gebäudeschichten stellt die Wahl von größeren Abständen der Pfetten bzw. Riegel dar (z. B. 3,5 bis 4 m). Dies erfordert jedoch stärkere und steifere Elemente, für die Hohlprofile (typischerweise rechteckig) oder warmgewalzte Profile verwendet werden können.

Die Vorteile einer durchgehenden Sekundärkonstruktion kann durch ein Gerber-System erreicht werden. Bei diesem werden einfache Verbindungen an Punkten der erwarteten Nullmomente (Gegenbiegung) angeordnet, wodurch keine Schweißverbindungen an Hilfsstahlteilen erforderlich sind. Bei offenen Querschnitten werden keine zusätzlichen Winkel oder andere Beschläge benötigt, da das Sekundärtragwerk direkt mit der Primärkonstruktion verschraubt werden kann (sieheAbb. .421 a). Alternativ kann eine Klemmverbindung verwendet werden, um Bohrungen in den Stahlelementen zu vermeiden (sieheAbb. .421 b).



a) Geschraubte Verbindung zwischen warmgewalzter Pfette und Primärkonstruktion

b) Klemmverbindung zwischen warmgewalzter Pfette und Primärkonstruktion [38]

Abb. .421 Verbindungen zwischen warmgewalzter Pfetten und primärer Stahlkonstruktion

4.7.3 Verkleidung

Verkleidungssysteme werden in der Regel mit selbstbohrenden oder selbstschneidenden Schrauben befestigt, was die Wiederverwendbarkeit der Verkleidungen beeinträchtigt. Zusätzlich zu den Befestigungen zwischen der Verkleidung und der sekundären Stahlkonstruktion sind zusätzliche Schrauben zwischen den Verkleidungselementen erforderlich, was den Arbeitsaufwand beim Rückbau erhöht. Diese Verbindungen werden an der Oberseite der Trapezprofile angebracht, um das Eindringen von Wasser zu verhindern. Der Einsatz von Abschlussblechen an den Gebäudekanten erhöht die Komplexität des Systems sowie die Anzahl der erforderlichen Verbindungen. Beispiele solcher Details sind Trauf- und Giebelabschlüsse, Firstabschlüsse oder einfache Wandanschlüsse.

Der entscheidende Aspekt für ein wiederverwendbares Verkleidungssystem ist die Anzahl und Art der Verbindungen, sowohl zwischen den Verkleidungselementen als auch zwischen Verkleidung und der Sekundär-/Primärstruktur. Für alle Verkleidungssysteme, einschließlich der Abdeckungselemente, werden Schraubverbindungen empfohlen. Die Verbindungspunkte sollten idealerweise durch Stehfalzverbindungen zwischen den Elementen verdeckt werden.

Bei standardisierten Dachneigungen besteht die Möglichkeit, Standarddetails für Traufen, Brüstungen, Firste usw. mit möglichst wenigen Schraubverbindungen zu entwickeln. Dadurch kann der Arbeitsaufwand für die Montage und Demontage auf der Baustelle erheblich reduziert werden.

Wie bereits erwähnt, wird die Verwendung von weitgespannten Verkleidungen empfohlen, da diese keine Pfetten/Seitenschienen benötigen. Durch den damit einhergehenden Wegfall einer kompletten Gebäudeschicht kann die Anzahl der Verbindungen erheblich reduziert werden, was die Wiederverwendbarkeit der Verkleidungssysteme deutlich erhöht.

Eine mögliche Maßnahme, zur Effizienzsteigerung bei eingeschossigen Gebäuden hinsichtlich der Wiederverwendung, ist die Optimierung der Verbindungen der Verkleidung an der sekundären Stahlkonstruktion. Sandwichpaneele oder Kassettenprofile könnten mit vormontierten Schienen/Schalen versehen werden, in denen Klemmen je nach Position der Sekundärkonstruktion justiert werden können. Dies könnte zwar zu einer komplexeren Montage der Verkleidungen führen, jedoch ließe sich die Anzahl der Verbindungen auf ein Minimum reduzieren und die Wiederverwendbarkeit der sekundären Stahlkonstruktion und der Verkleidung erhöhen. Wenn geeignete Verbindungssysteme (geschraubt oder geklemmt mit klar definierten Demontagepunkten) entwickelt werden, könnten diese Elemente leicht demontiert und wiederverwendet werden (siehe Abschnitt 4.7.5).

Die derzeit üblichen System für weitgespannte Verkleidungselemente mit Spannweiten von 6 bis 8 m basieren auf tiefen Trapezblechen (Abb. .423) oder tiefen Sandwichpaneelen im Dachbereich(Abb. .424Abb. .425) sowie horizontal verlegten Sandwichpaneelen an Wänden, die zwischen den Primärahmen gespannt sind (sieheAbb. .422). Solche Lösungen sind in Finnland und Schweden weit verbreitet, wo aufgrund hoher Wärmedämmanforderungen dicke Paneele erforderlich sind, die gleichzeitig eine hohe Tragfähigkeit für horizontale Montage zwischen den Primärrahmen ohne Pfetten ohne aufweisen.

Eine mögliche Lösung für Wand-Sandwichelemente mit Klemmverbindungen ist inAbb. .422 dargestellt.

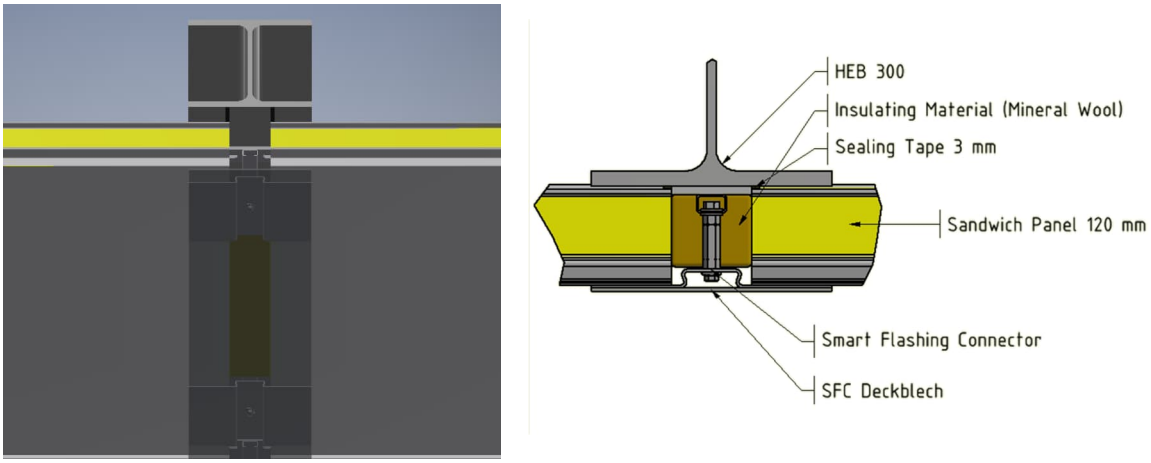


Abb. .422 Klemmbefestigungssystem für weit gespannte Wandverkleidungen

Abb. .423 Beispiel eines Dachsystems mit tiefer Abdeckung [31]

Der Einsatz von tiefen Abdeckungen eignet sich für die vorgeschlagenen Standarddachneigungen von 3° und 6° bei Verwendung von warmgewalzten Trägern oder Fachwerken. Das Dach besteht üblicherweise aus mehreren Schichten, welche sich aus einem Trapezblech, einer Dampfsperre, einer Dämmschicht (Mineralwolle oder PIR) und einer Dichtbahn (PVC oder Bitumen) zusammensetzt. Die tiefen Abdeckungen können durch Überlappung ein durchgehendes Tragverhalten gegenüber der Primärstruktur erreichen. Eine typische Überlappung von 0,10 × Spannweite über den Lagerpunkten kann angenommen werden. Alternativ können Gerber-Systeme angeordnet werden, wofür eine Überlappung von 150 mm notwendig ist. Eine Mindestbreite von 150 mm für die Obergurt zur Auflage der Stahlbleche wird empfohlen.

Abb. .424 Beispiel eines Dachsystems mit weitgespannten Verbundplatten [31]

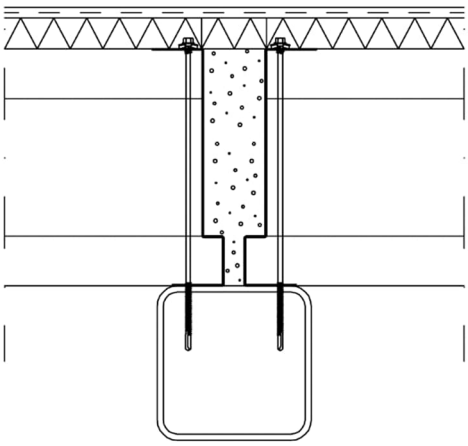


Abb. .425 Verbindungen zwischen weitgespannten Verbundplatten und Primärkonstruktion [31]

4.7.4 Verwendung vorgefertigter Leichtbaukassetten in Rahmenkonstruktionen

Vorgefertigte Kassetten werden häufig für Geschossdecken und Dächer in leichten Stahlrahmenkonstruktionen im Wohnungsbau verwendet. Die Kassetten bestehen aus kaltgeformten C-Profilen, die zwischen Z- oder U-Profilen an den Enden spannen. Bei Fußböden beträgt der typische Abstand der C-Profile 400 oder 600 mm. Die maximale Breite der Kassetten liegt bei 2,4 m, um für den Transport und das mechanische Heben geeignet zu sein.

Die gleiche Kassettenform kann auch für Dächer (nur für Wartungsarbeiten zugänglich) und Wänden in Rahmenkonstruktionen für Spannweiten von 6 bis 7,5 m verwendet werden. Die Kassette kann mit einem Rand-Z-Profil am oberen Flansch eines Trägers aufgehängt werden, sieheAbb. .426.

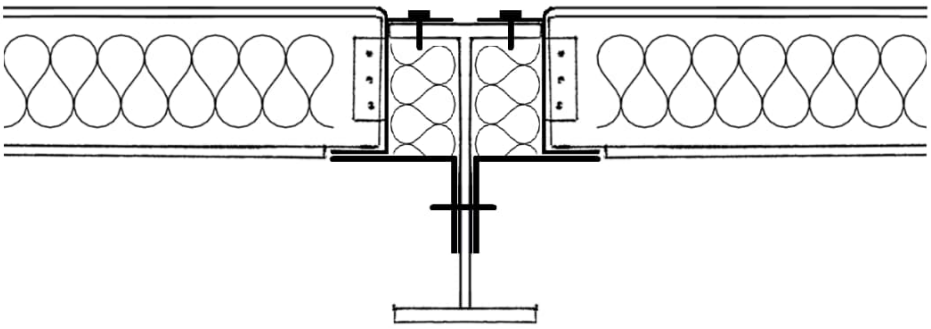


Abb. .426 Verwendung vorgefertigter, isolierter Dach- oder Geschosskassetten [5]

Alternativ kann die Kassette auf dem Obergurt aufgelegt werden, wobei an den Enden U-Profile verwendet werden (sieheAbb. .427 undAbb. .428). Ein kleiner Abstand zwischen den Kassetten kann die Montage erleichtern. Dieser wird im Anschluss mit einer dünnen Dämmschicht ausgefüllt. Eine Mindestbreite von 150 mm des oberen Flansches wird empfohlen. Zur Befestigung der Kassette an der primären Stahlkonstruktion können selbstbohrende Schrauben mit Dichtscheiben verwendet werden. Diese Lösung ist auch für Fachwerklösung mit Hohlprofilen geeignet.

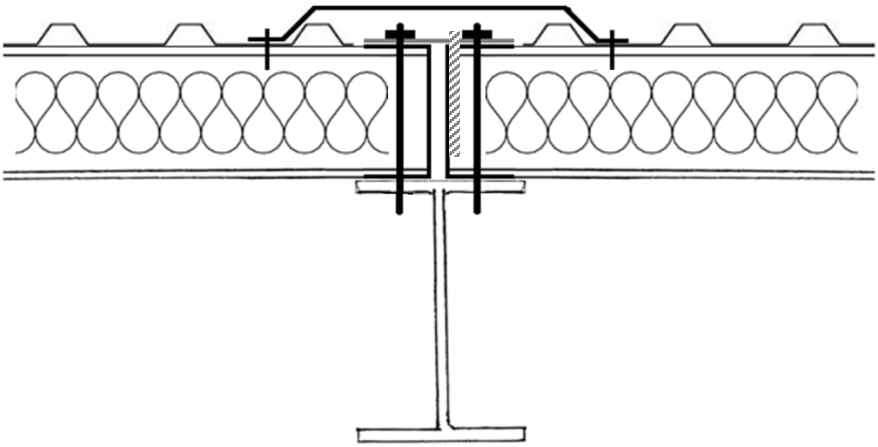


Abb. .427 Verwendung vorgefertigter isolierter Dachkassetten, aufliegend auf dem Obergurt [5]

Bei einer Schneelast von nicht mehr als 1 kN/m^2 sind C-Profile mit einer Tiefe von 200 mm für eine Spannweite von 6 m sowie C-Profile mit einer Tiefe von 250 mm für eine Spannweite von 7,5 m geeignet. Die Kassette werksseitig verschalt und gedämmt, so dass sie bereits während der Bauphase wettergeschützt ist.

Die Details einer typischen Dachkassette sind inAbb. .428 undAbb. .429 dargestellt. Um Toleranzen auszugleichen, sollte das Z-Profil 75 mm breit sowie 2 bis 3 mm dick sein und so positioniert werden, dass eine glatte Unterkante auf Höhe der Kassette entsteht. Die C-Profile sind 1,2 bis 2 mm dick und werden in einem Abstand von 600 bis 900 mm angeordnet, abhängig von Lasten und Spannweite. Zur Verbesserung der Wärmedämmung können C-Profile mit perforierten Stegen verwendet werden, wodurch der potenzielle Verlust durch Wärmebrücken um 70 bis 80 % reduziert werden kann (siehtAbb. .429[31]

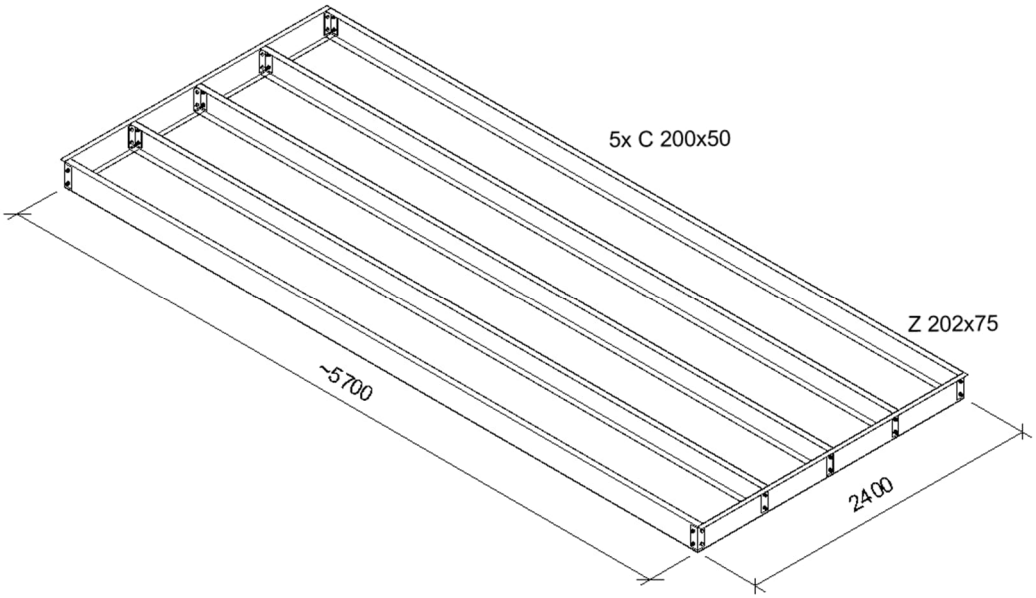


Abb. .428 Leichtbaukassette für vorgefertigte Dachkonstruktionen bei 6 m Trägerabstand (abzüglich der Trägerbreite von nominell 300 mm) [5]

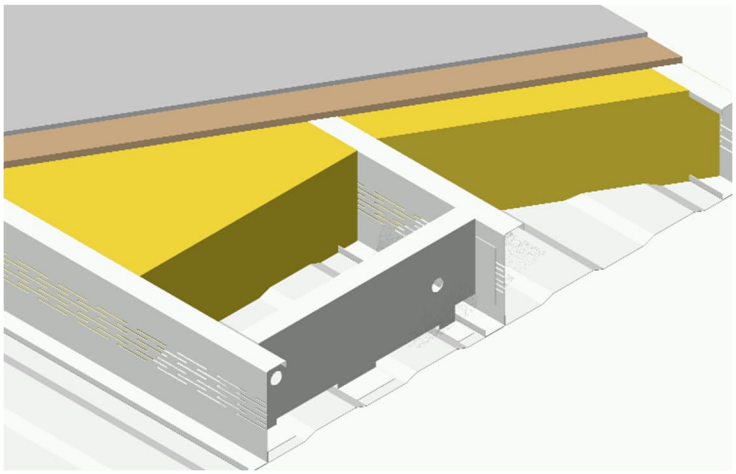


Abb. .429 Leichtbaukassette mit perforierten Stegen [31]

Die C-Profile sind über Blechwinkel mit 3 Schrauben mit den umlaufenden Z/U-Profilen verbunden. Überstehende Schraubengewinde werden ggf. abgeschnitten, um das Aufsetzen der Kassette auf den Träger nicht zu behindern. Bei einigen Kassettensystemen werden Durchsetzfügen oder pneumatisch gestanzte Nieten bevorzugt. Alle Verbindungen zwischen einzelnen Kassetten, sowie zwischen Kassetten und Trägern von Verkleidungselementen müssen mit Schrauben ausgeführt werden.

Zur Fixierung der Dämmschicht können Folien oder OSB-Platten verwendet werden. Diese sollten witterungsbeständig sein, wenn die Kassette vor der endgültigen Dacheindeckung noch frei liegt. Die Unterseite sollte ebenfalls robust und optisch ansprechend sein, damit diese sichtbar bleiben kann. Kalziumsilikatplatten bieten einen zusätzlichen passiven Brandschutz für die C-Profile und Träger.

Durch das vorgefertigte System entsteht eine witterungsbeständige, gedämmte Gebäudehülle. Mit einer Dämmung aus mineralwolle erreicht die Kassette einen U-Wert von 0,15 W/m^{2}K. Zudem kann auch das Gebäudevolumen reduziert werden, da Pfetten über den Trägern entfallen. Dies führt zusätzlich zu Kosteneinsparungen für das Verkleidungssystem.

Die Scheibenwirkung wird durch die an den Kassetten angebrachte Verkleidung und die Verbindungspunkte mit Schrauben an die Träger erreicht. Zugkappenplatten können genutzt werden, um zwei Dachkassetten über einem Träger zu verbinden, (sieheAbb. .427), was dazu die Scheibenwirkung verbessert.

Bei dem inAbb. .426 gezeigten System kann der obere Teil des Trägers zwischen den Dachkassetten zusätzlich gedämmt werden, um Wärmebrücken zu reduzieren. Dies kann von der Innenseite des Gebäudes erfolgen. Zusätzliche durchgehende Winkel können mit dem Steg des Trägers verschraubt werden, um durch Zug-Druck-Wirkung eine Torsionsbegrenzung zu bewirken und ein seitliches Ausknicken des Trägers (Biegedrillknicken) bei negativer Biegung zu verhindern.

Die abschließende Dacheindeckung kann durch eine Flachdachabdeckung erfolgen. Dafür stehen zahlreiche marktgängige Lösungen zur Verfügung. Die Unterseite der Kassette kann je nach Anwendung oder Kundenanforderung mit Platten oder Blechen verkleidet werden. Für eine Bodenkassette, an der eine Verkleidung angebracht wird, reicht beispielsweise eine gewöhnliche OSB-Platte aus. Für eine sichtbar bleibende Dachunterseite kann ein Stahlblech oder eine dekorative Platte verwendet werden.

Die abschließende Verkleidung des Gebäudes kann bereits in die Kassette integriert werden (ähnlich zu Sandwichpaneelen) oder vor Ort auf vormontierten Abstandshaltern angebracht werden. Letzteres hat den Vorteil, dass die Dacheindeckung später leicht ersetzt werden kann, ohne die Kassetten zu beschädigen oder die Nutzung des Gebäudes zu beeinträchtigen.

Installationen, wie Beleuchtungen können durch die 150 mm großen Öffnungen in den C-Profilen geführt werden. Die Kassetten können wiederverwendet werden, wobei die Verschalung ggf. ersetzt werden muss. Dasselbe Kassettensystem kann auch für Zwischengeschosse verwendet werden, die auf I-Profil-Trägern lagern.

Kassettensysteme sind eine Alternative zu weitgespannten Sandwichpaneelen, die auf bestimmten Märkten möglicherweise nicht zu wettbewerbsfähigen Preisen verfügbar sind. Kassetten ermöglichen eine optimierte Lösung für eine bestimmte Last und Spannweite, da sie nicht an standardisierte Kataloggrößen gebunden sind.

4.8 Tragwerksplanung für mehrgeschossige Stahlkonstruktionen

4.8.1 Standardisierung von mehrgeschossigen Stahlkonstruktionen

Die Standardisierung von mehrgeschossigen Stahlkonstruktionen ist ein wichtiger Ansatz, zur Steigerung der Effizienz und Nachhaltigkeit der Gebäudekonstruktion und ihrer künftigen Wiederverwendung. Nachfolgend sind einige wichtige Aspekte aufgeführt, die hierzu zu berücksichtigen sind:

1. **Modularer Aufbau**: Die Anwendung modularer Konstruktionsprinzipien ermöglicht die Vorfertigung und Standardisierung von Bauelementen, wodurch Montage,

Demontage und Wiederverwendung in unterschiedlichen Konfigurationen oder Projekten erleichtert wird,

2. **Flexibilität beim Entwurf:** Trotz standardisierter Komponenten kann durch modulare Ansätze ein hohes Maß an Gestaltungsfreiheit erreicht werden, sodass Gebäude bei Bedarf leicht umkonfiguriert oder erweitert werden können,
3. **Standardisierung von Materialien**: Die Verwendung von standardisierten Stahlprofilen und Verbindungen vereinfacht den Entwurfsprozess, senkt die Herstellungskosten senken und erhöht die Kompatibilität bei der Wiederverwendung von Bauteilen in neuen Strukturen,
4. **Verbindungssysteme**: Die Standardisierung von Verbindungsmethoden erleichtert die Demontage und die erneute Montage, was für eine spätere Wiederverwendung entscheidend ist. Schraubverbindungen anstelle von Schweißverbindungen unterstützen diesen Prozess,
5. **Dokumentation und Kennzeichnung**: Eine umfassende Dokumentation und Kennzeichnung der Bauelemente unterstützt die Nachverfolgbarkeit und spätere Wiederverwendung, indem sie eine einfache Identifizierung und Zuordnung der Komponenten ermöglicht,
6. **Digitale Technologien**: Der Einsatz von Building Information Modelling (BIM) und anderen digitalen Werkzeuge im Planungsprozess verbessert die Visualisierung und Koordinierung standardisierter Komponenten,
7. **Lebenszyklus-Bewertung (LCA)**: Die Einbeziehung von LCA-Werkzeugen bereits in der Planungsphase ermöglicht eine Bewertung der Umweltauswirkungen und der Nachhaltigkeit der verwendeten Materialien und fördert somit den Einsatz rückgewonnener Komponenten.

4.8.2 Leitfaden für mehrgeschossige Stahlkonstruktionen

Die bestehenden Lösungen für mehrgeschossige Stahlkonstruktionen, die zumeist eine Stahl-Beton-Verbundstruktur aufweisen, stellen eine erhebliche Herausforderung für die Rückgewinnung und Wiederverwendung von Stahlkonstruktionen dar. Die Stahlträger sind über Schubverbindungen mit der Betonverbunddecke verbunden, wobei diese nur sehr eingeschränkt zugänglich sind. Aufgrund der dauerhaften Verbindung von Stahl und Beton können Stahlverbunddecken nach dem Bau nicht in ihrer ursprünglichen Form wiederverwendet werden. Dennoch sind sowohl Stahl als auch Beton recycelbar, sodass eine umweltverträgliche Entsorgung möglich ist, auch wenn eine direkte Wiederverwendung ausgeschlossen bleibt.

Daher sind konventionelle mehrgeschossige Stahlkonstruktionen aufgrund ihrer komplexen Konstruktion, der Verbundwerkstoffe und der standortspezifischen Bemessung in der Regel nur am ursprünglichen Standort wiederverwendbar. Ein Versetzen des Gebäudes an einen neuen Standort würde ein umfangreiche Neubemessung und Anpassung erfordern, was für die meisten Projekte nicht praktikabel ist.

Die in diesem Leitfaden beschriebenen Empfehlungen können für mehrgeschossige Stahlkonstruktionen in nicht erdbebengefährdeten Regionen oder in Regionen, in denen die Erdbebenbemessung nach dem DC1-Konzept (niedrige Duktilitätsklasse oder DCL) erfolgt, was wiederum eine niedrige seismische Einwirkung gemäß prEN 1998-1-2[39] bedeutet.

Bauwerke, die nach dem Konzept des dissipativen Tragwerksverhaltens bemessen werden, sind den Duktilitätsklassen DC2 oder DC3 zuzuordnen. Diese Klassen verlangen eine höhere Fähigkeit der Struktur zur Energiedissipation durch plastische Verformungen. Abhängig von der Duktilitätsklasse gelten spezifische Anforderungen hinsichtlich Querschnittsklasse der Stahlprofile sowie der Rotationskapazität der Verbindungen. In solchen Fällen wird die Wiederverwendung von rückgewonnen Bauteilen nur unter mindestens einer der folgenden Bedingungen empfohlen:

(i) Als Bauteil des Schwerkraft- oder sekundären Lastabtragsystems (nicht als Teil des Aussteifungssystems, wie z. B. gelenkig gelagerte Deckenträger) oder

(ii)) Als Elemente einer DC1-Struktur.

Folglich liegt auch bei nicht erdbebengefährdeten Gebieten oder in DC1-Erdbebengebieten die größte Herausforderung für die Wiederverwendung bei mehrgeschossigen Stahlkonstruktionen in der nicht-trennbaren Verbundwirkung der Geschossdecken.

Warmgewalzte Stahlrahmen mit Fertigteildecken sind eine bewährte Lösung, die bei verschiedenen Typen von mehrgeschossigen Gebäuden verwendet werden [10]. In diesem Fall kommen nicht-verbundene Stahlträger zum Einsatz, auf denen vorgefertigte Betonfertigelemente auflagern. Diese können entweder auf dem Trägerflansch oder auf einer Konsole, welche an den Steg angeschlossen sind, auflagern. Da keine strukturelle Verbindung der Stahlträger zur Betonplatte zustande kommt, entsteht somit auch keine Verbundwirkung. Ein Beispiel für eine schlanke Lösung ist das sogenannte Slimfloor-System, bei dem die Fertigteilplatten auf einem breiten Unterflansch oder einer an den unteren Flansch angeschweißten Platte auflagert.

Der Stahlträger ist so bemessen, dass dieser eigenständig tragfähig ist, ohne dass die Betonplatte für zusätzliche Tragfähigkeit oder Steifigkeit sorgen muss. Die Fertigteile dienen hauptsächlich als Geschossdecke und als Schalung für eine ggf. aufgebrachte Ortbetonbetonschicht sowie als seitliche Aussteifung der Träger während des Baus. Die Betonfertigteile werden entweder als Hohlkörper mit einer Höhe von 150 bis 400 mm mit Spannweiten von bis zu 15 m oder als massive Platte mit einer Höhe von 75 mm bis 100 mm hergestellt.

Hinweise zur Bemessung solcher Systeme sind in mehreren SCI-Publikationen enthalten, *P287: Design of composite beams using precast concrete slabs* [40] *, P342: Design of asymmetric Slimfloor beams with precast concrete slabs* [41] und *P334: Bemessung von mehrstöckigen ausgesteiften Rahmen* [42].

Peikko hat eine zu dem oben beschriebenen System ähnliche Lösung entwickelt [43]. DELTABEAM® ist ein Slimfloor-Verbundträger, der vollständig in die Geschossdecke integriert ist. Der Träger wird vor Ort vollständig mit Beton verfüllt. Nach dem Erhärten des Betons bilden dieser und der DELTABEAM® eine Verbundstruktur. Vor dem Erreichen der erforderlichen Betonfestigkeit wirkt der DELTABEAM® als eigenständiger Stahlträger. Das System kann mit verschieden Holzdecken verwendet werden, einschließlich Massivholzplatten (CLT, GLT, NLT, DLT , Holzverbundplatten oder Balkendecken. Auch vorgefertigte Verbundelemente können verwendet werden.

Stahlträger ohne Verbund, die mit Betonfertigteilen verwendet werden, bieten erhebliche Vorteile für die Wiederverwendung, da ihre Baugruppen mit minimaler Beschädigung

demontiert werden können. Dadurch können sowohl Träger als auch Platten unversehrt rückgewonnen und mit nur geringfügigen Änderungen in neuen Strukturen wiederverwendet werden. Dies fördert nachhaltige und zirkuläre Baupraktiken.

Im Rahmen des RFCS-Projekts REDUCE ([44]) wurden neue demontierbare Verbunddeckensysteme entwickelt und getestet. zusätzlich wurden Bemessungsempfehlungen und praktische Hinweise zur Fertigung und Ausführungsplanung dieser Systeme sowohl für den ersten als auch den zweiten Nutzungszyklus erarbeitet. Das Ziel des Projekts bestand darin, die Kreislaufwirtschaft sowie die Serienproduktion von Tragwerkselementen zu fördern sowie die Eignung für die Einbindung in BIM oder andere digitale Tools zu prüfen. Die Grundlage bildet ein "Plug-and-Play"-Struktursystem[45] bestehend aus demontierbaren Träger- und Deckenelemente sowie anpassbaren Stahlverbindungen (sieheAbb. .430).

Es wurden Push-out- und Biegeversuche an neuen, demontierbaren Schubverbindungssystemen durchgeführt. Diese Versuche wurden an Fertigteil- und Verbundbelägen unter Verwendung von Reibungsbolzen sowie eingelassenen Kupplungen durchgeführt, wobei bei einigen Harz injiziert wurde, um den anfänglichen Schlupf zu reduzieren.

Darüber hinaus wurde an der Technischen Universität Delft ein großmaßstäblicher Versuch mit einem demontierbaren Parkhaus durchgeführt. Die Teststruktur bestand aus vier Fertigteildecken (7,2 m× 2,6 m), die auf drei 14,4 m langen, konischen Stahlträgern lagerten. Die Verbundwirkung wurde durch harzinjizierte, eingelassene Kupplungen erreicht. Die Versuche dienten dazu, die praktische Umsetzbarkeit, Kosten der Montage, Demontage und Wiedermontage von demontierbaren Verbunddecken in Parkhäusern zu ermitteln.

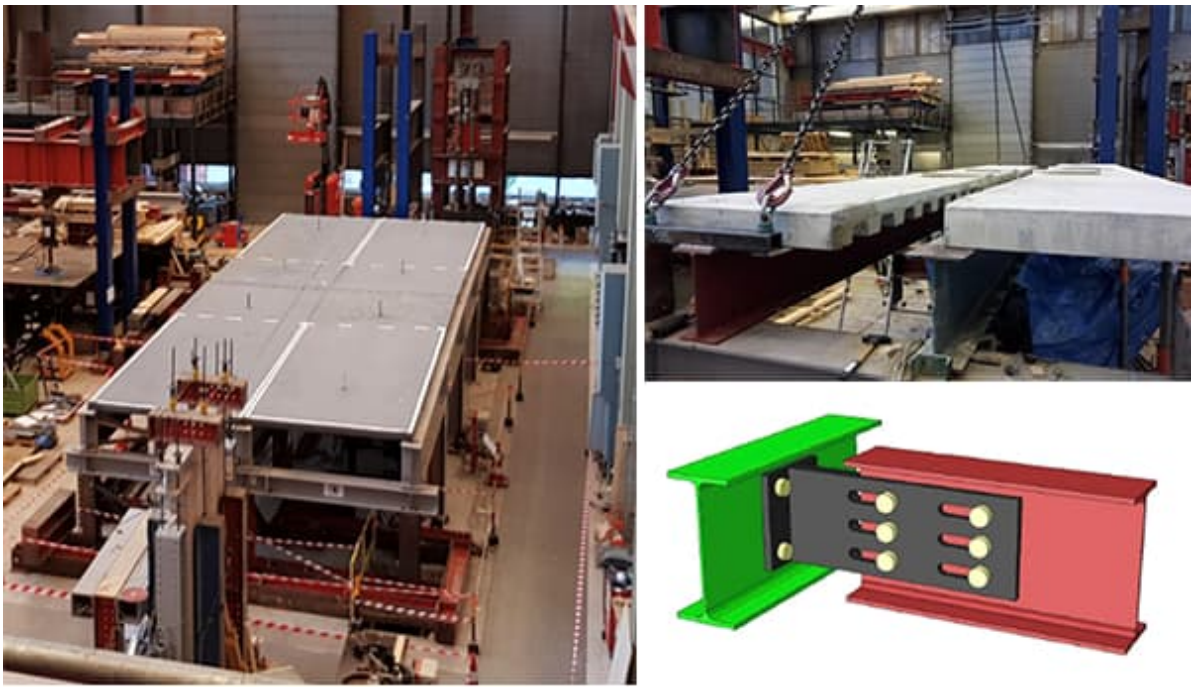


Abb. .430 Übersicht über den Versuchsaufbau ,[44][46] , [47]

Es wurden Versuche an Verbundträgern mit verschiedenen demontierbaren Schubverbindungen und in unterschiedlichen Anordnungen durchgeführt. Nach einer ersten Prüfung im elastischen Bereich wurden einige Deckenplatten in Längsrichtung aufgetrennt, demontiert, wieder zusammengesetzt und bis zum Versagen geprüft. Die entscheidende Komponente für die Demontierbarkeit und Wiederverwendbarkeit solcher Systeme ist die Art der Schubverbinder (sieheAbb. .431), die die Verbindung zwischen dem Stahlträger und der Decke (für Ortbeton- oder Fertigteilplatten) herstellen [44], [46], [47].

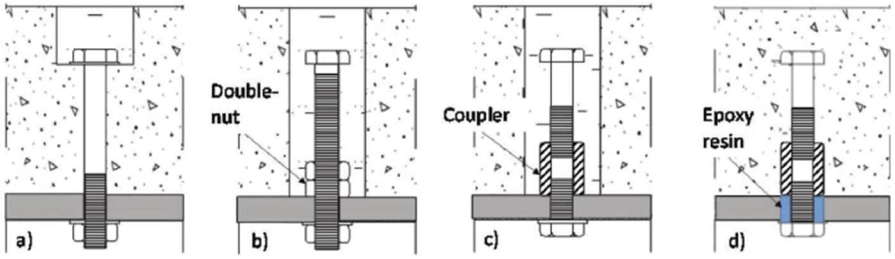


Abb. .431 Arten von demontierbaren Schraubverbindern a) Reibschlussbolzen, b) Doppelmutter, c) Kupplungssystem, d) injizierte Schraubschubverbinder mit Kupplungssystem [44]

Darüber hinaus wurden Versuche an standardisierten Verbindungen durchgeführt, die den Rückbau und die Wiederverwendung der Träger erleichtern. Getestet wurden u.a. ein geschlitzter Träger-zu-Träger-Verbinder sowie ein Blockverbinder [45].

Der Bemessungsleitfaden P428 [48] enthält ein Bemessungsverfahren sowie Anwendungsbeispiele für Verbundträger mit demontierbaren Schubverbindern, die auf den Grundsätzen des Eurocode 4 (EN 1994-1-1) basieren. Die Bemessung berücksichtigt die unterschiedlichen Eigenschaften der demontierbaren Schubverbindungen hinsichtlich ihrer Scherfestigkeit, Steifigkeit und Duktilität. Bemessungsdaten zur Tragfähigkeit von zwei Arten demontierbarer Schubverbindern mit hochfesten Schrauben und Kupplungssystemen werden vorgestellt. Zudem wurden mehrere Lösungen für den Einsatz in Gebäude vorgestellt, darunter Hybrid- oder Verbundbauteile und Verbindungen für mehrgeschossige Konstruktionen. Da es jedoch keine etablierten technischen Standards für die Bemessung demontierbarer Verbundstrukturen gibt, ist umfangreiche Forschung erforderlich, um robuste Bemessungsverfahren zu entwickeln.

Romero und Odenbreit [49] stellten außerdem ein innovatives demontierbares Stahl-Holz-Verbunddeckensystem (STC) vor, das sich für eine Wiederverwendung eignet. Das STC-System besteht aus warmgewalzten I-förmigen Stahlprofilen und Furnierschichtholzplatten (LVL), die durch neuartigen Schubverbindern miteinander verbunden sind. Dieses System bietet eine Alternative zu herkömmlichen Stahl-Beton-Bodensystemen. Die neuartigen Schubverbindungen erleichtern die Demontierbarkeit, Anpassungsfähigkeit, Neukonfiguration und Verlagerung von Komponenten (sieheAbb. .432).

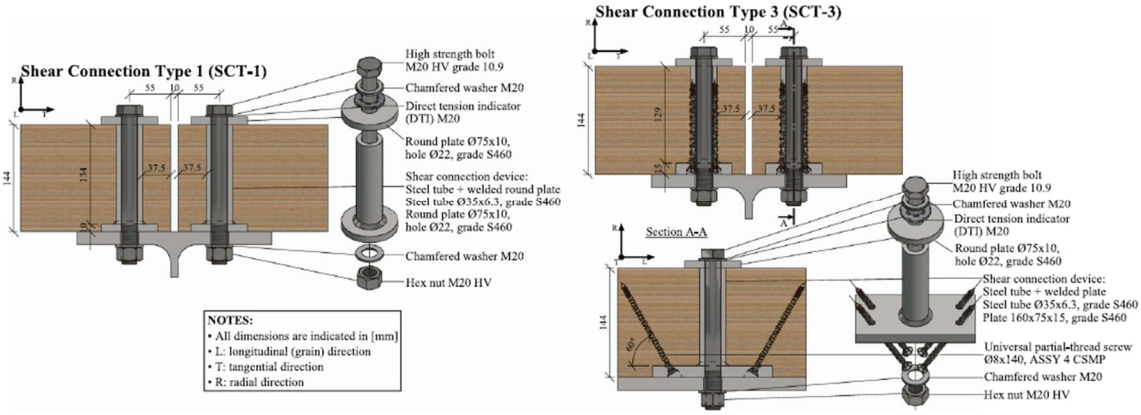


Abb. .432 Details der Schubverbindungen SCT-1 und SCT-3, die in den in dieser experimentellen Untersuchung getesteten demontierbaren Stahl-Holz-Verbundträgern realisiert wurden [49]

Darüber hinaus zeigt dieses Deckensystem großes Potenzial in Bezug auf Modularisierung, Standardisierung und Serienproduktion. Dies prädestiniert es für eine industrielle Fertigung in standardisierten Größen und Modulen. Die Struktur kann vollständig demontiert und an einen anderen Standort versetzt werden oder einzelne Komponenten können in verschiedenen Bauvorhaben wiederverwendet werden. Dadurch ergeben sich sowohl ökologische als auch wirtschaftliche Vorteile.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden zwei STC-Träger mit einer Spannweite von jeweils 10 m, einer LVL-Plattenbreite von 2,51 m und einer Dicke von 144 mm geprüft. Die LVL-Platten waren mit einem IPE 400-Stahlprofil verbunden. Die Träger wurden als einfach gelagerte Einfeldträger unter Sechs-Punkt-Biegung geprüft, um ihr Biegeverhalten zu beurteilen (sieheAbb. .433). Die Versuchsergebnisse belegen sowohl eine hohe Tragfähigkeit als auch eine hohe Verformbarkeit und bestätigen das Potenzial für eine Wiederverwendung. Zudem zeigen sie die Effektivität der neuartigen Schubverbindungen sowie die allgemeine strukturelle Integrität der Träger.

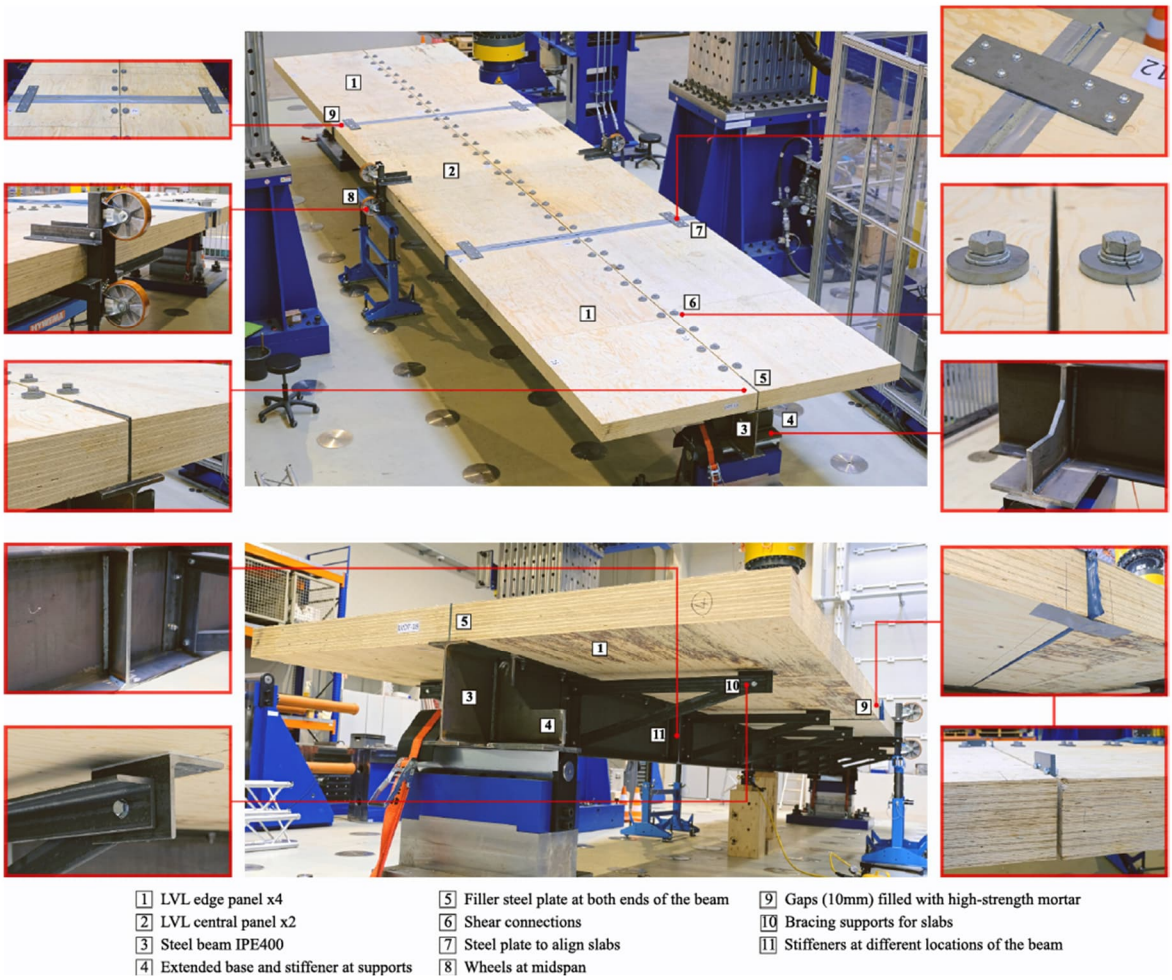


Abb. .433 Komponenten der untersuchten STC-Träger [49]

Bompa et al.[50] untersuchten die Demontierbarkeit und das Wiederverwendungspotenzial von Stahl-Holz-Schubverbindungen. Hierzu wurden Versuche mit doppelten Schubkonfigurationen durchgeführt, bei denen Schrauben mit drei Durchmessern eingesetzt wurden. Zunächst erfolgten monotone Prüfungen jeder Konfiguration, um die Steifigkeit, Festigkeit und Duktilität zu bewerten (sieheAbb. .434). Anschließend wurden identische Vergleichsproben zehn Lastzyklen bei 40 % der bei den monotonen Prüfungen ermittelten Tragfähigkeit unterzogen, um den Verlust der Steifigkeit, die Schraubenverformungen und die möglichen Schäden an den Brettsperrholzplatten (CLT) zu bewerten.

Nach der Demontage und messtechnischen Erfassung wurden die Probekörper wieder zusammengesetzt und bis zum Versagen belastet. Die Schrauben wiesen nach der Demontage dauerhafte Verformungen auf, während die Holzplatten bei zyklischer Belastung nur begrenzte Schäden zeigten. Die wieder zusammengebauten Proben erreichten vergleichbare Steifigkeiten, Festigkeiten, Duktilitätswerte und Versagensarten wie die ursprünglich monoton geprüften Proben. Diese Ergebnisse lassen darauf schließen, dass sowohl das Stahlprofil als auch die CLT-Paneele vollständig wiederverwendbar sind. Zudem können die Prüfergebnisse für einen strukturellen Wiederverwendungsindex im Rahmen von Indikatoren zur Gebäudekreislauffähigkeit herangezogen werden.

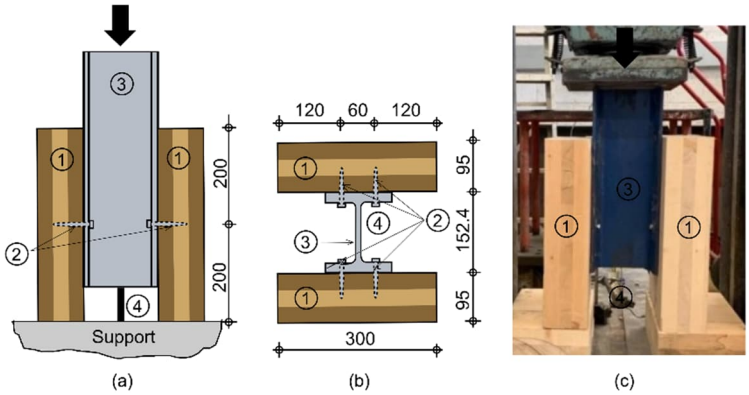


Abb. .434 Details der Probekörper: a) schematische Vorderansicht, b) Draufsicht, c) Ansicht eines Probekörpers (Legende: (1) CLT-Paneel, (2) Schrauben, (3) Stahlprofil, (4) Wegaufnehmer, Pfeil markiert Reaktionspunkt)

Der Design Guide 37 - *Hybrid Steel Frames with Wood Floors* [51] empfiehlt die Verwendung von Massivholzböden im Bauwesen. Der Leitfaden bietet einen umfassenden Überblick zu dieser neuen Gebäudetypologie und beschreibt Strategien zur Beschleunigung der Anwendung von hybriden Holz-Stahl-Konstruktionen im mehrgeschossigen Wohn- und Gewerbebau. Massivholz zeichnet sich durch ein geringes Eigengewicht aus, während Stahl hohe Tragfähigkeiten bereitstellt und die Anforderungen an Schwingungsverhalten und Spannweiten von Gebäuden effizient erfüllen kann. Die im Design Guide 37 vorgestellten Lösungen sind auf eine rückbau- und wiederverwendungsorientierte Planung ausgelegt.

Die aktuellen Ergebnisse der Veröffentlichung ECCS Nr. 145 [52] liefern eine fundierte Grundlage für künftige Forschungsschwerpunkte, um einen vollständigen Entwurfsleitfaden Stahl-Holz-Verbund- bzw. Hybridkonstruktionen zu entwickeln. Die Empfehlungen gliedern sich in folgende Bereiche: (1) Holzwerkstoffe und -produkte; (2) Schubverbindungen; (3) Verbindungen; (4) Träger und Platten; (5) Stützen; (6) Wände, Scheiben und Aussteifungen; (7) Brandbemessung und (8) Nachhaltigkeit.

Ferdous et al. [53] präsentierten einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik. Hierzu sind systematisch die jüngsten Fortschritte, die mechanischen Leistungen, die Herausforderungen und die Aussichten von modularen Gebäuden untersucht worden.

Loss et al. [54], [55] entwickelten ein mehrgeschossiges, vorgefertigtes, modulares Bausystem, dessen Haupttragglieder aus einer hochoptimierten Lösung einer Holz-Stahl-Kombination bestehen und vollständig im Werk vorgefertigt werden können. Die Untersuchungen belegten das hohe Potenzial von Stahl-Holz-Hybridsystemen in Bezug auf Nachhaltigkeit, insbesondere durch leichte, moderne, erdbebensichere Konstruktionen und einfache Demontage. Zudem werden Prüfungen verschiedener innovativer Verbindungen vorgestellt sowie Prototypen neu entwickelter Stahl-Holz-Hybrid-Schubwand- und Deckenkomponenten präsentiert. Abb. .435 zeigt die 3D-Ansicht eines Referenzgebäudes, welches Stahlrahmen und -träger mit Brettsperrholzplatten (CLT) kombiniert.

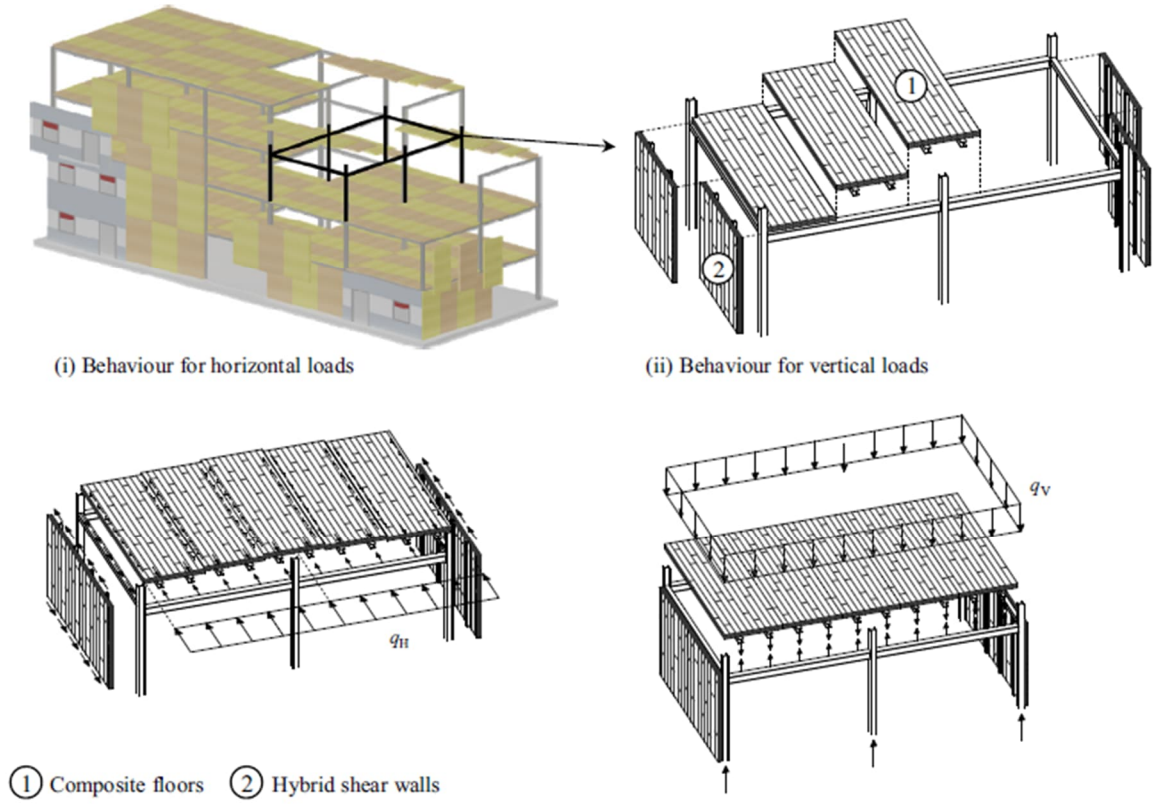


Abb. .435 Axonometrische Ansicht des Gebäudes sowie Explosionszeichnung der Hybridstruktur mit Darstellung des Lastabtrags für vertikale und horizontale Lasten [54]

Abb. .436 undAbb. .437 zeigen Satz I der Stahl-Holz-Verbindungen, welcher 20 verschiedene Konfigurationen umfasst, während Satz II vier verschiedene Anordnungen von Holz-Holz-Verbindungen enthält. Forschungsergebnisse zeigen, dass sich auf einfach Weise zusammengesetzte Deckenelemente herstellen lassen, die unter vertikalen Lasten ein ausgezeichnetes Biegeverhalten aufweisen.

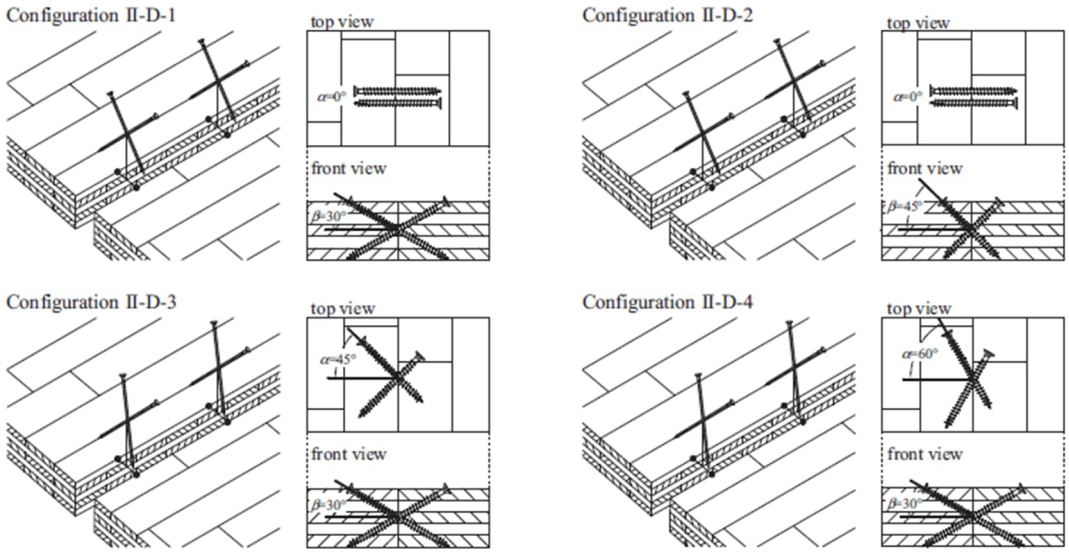


Abb. .436 Randverbindungen von Paneel zu Paneel für hybride Stahl-CLT-Decken und -Schubwände [54]

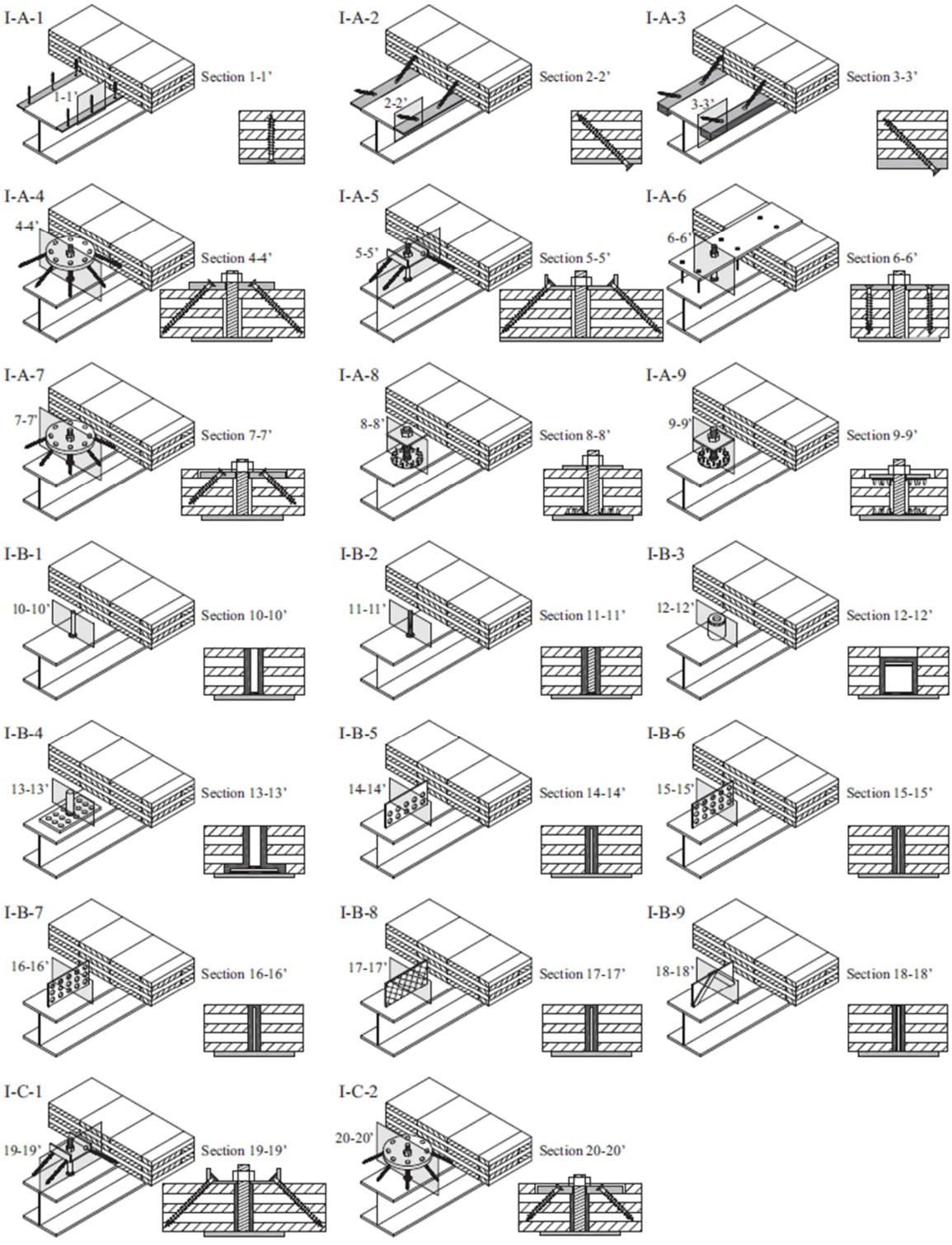


Abb. .437 Träger-Paneel-Verbindungen für hybride Stahl-CLT-Decken und -Schubwände [54]

Bei mehrgeschossigen Gebäuden können, sofern demontierbare Schubverbinder für die Decke verwendet werden und die Zugänglichkeit zu den Träger-Stützen-Verbindungen gewährleistet ist, die Schraubverbindungen problemlos demontiert werden.

Allerdings bestehen erhebliche Einschränkungen bei Tragwerken, die nach den dissipativen Tragwerkskonzepten (Duktilitätsklassen DC2 oder DC3 gemäß EN1998) bemessen sind. Das europäische Forschungsprojekt "Equaljoints plus" [56], [57], [58] hatte zum Ziel, Vorklassifizierungskriterien für Stahlverbindungen für die nächste Fassung von EN 1998-1-2 [39] zu erarbeiten. Die Forschungstätigkeiten umfassten die Standardisierung von Entwurfs- und Herstellungsverfahren für eine Reihe von Schraubverbindungen sowie eine geschweißte Dog-Bone-Verbindung mit schweren Profilen, die für verschiedene Leistungsstufen ausgelegt sind. Ein wesentliches Ziel des Projekts war die Entwicklung eines Belastungsprotokolls für eine europäische Vorklassifizierung von Verbindungen, basierend auf repräsentativen seismischen Anforderungen in Europa.

Im Rahmen des Projekts wurden vier Typen von geschraubten Träger-Stützen-Verbindungen untersucht:

(a) unversteifte, verlängerte Stirnplattenverbindungen mit Schrauben,

(b) versteifte, verlängerte Stirnplattenverbindungen mit Schrauben,

(c) verstärkte Schraubverbindungen und

(d) geschweißte Dog-Bone-Verbindungen (siehe [57][58]),

jeweils ausgelegt für unterschiedliche Leistungsanforderungen.

Die Schraubverbindungen wurden gemäß einem Bemessungsverfahren im Rahmen von prEN 1993-1-8 entworfen. Die Bemessung der Dog-Bone-Schweißverbindungen entsprach der US-Bauvorschrift ASCE 7-10 (Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures) [59] sowie den stahlbauspezifischen Normen AISC 341-16 (Seismic Provisions for Structural Steel Buildings) [60] , AISC 358-16 (Prequalified Connections for Seismic Applications)[61] und AISC 360-16 [62].

Für die Verwendung in den Duktilitätsklassen DC2 und DC3 wurden Leistungsziele definiert:

- Vollfeste Verbindung: Die gesamte plastische Beanspruchung konzentriert sich auf den angeschlossenen Träger, so dass die Verbindung und das Stegblech schadensfrei bleiben;
- Gleichfeste Verbindung: Die plastische Beanspruchung wird gleichmäßig zwischen der Verbindung und dem angeschlossenen Träger aufgeteilt;
- Teilfeste Verbindung: Die gesamte plastische Beanspruchung konzentriert sich auf die Verbindung.

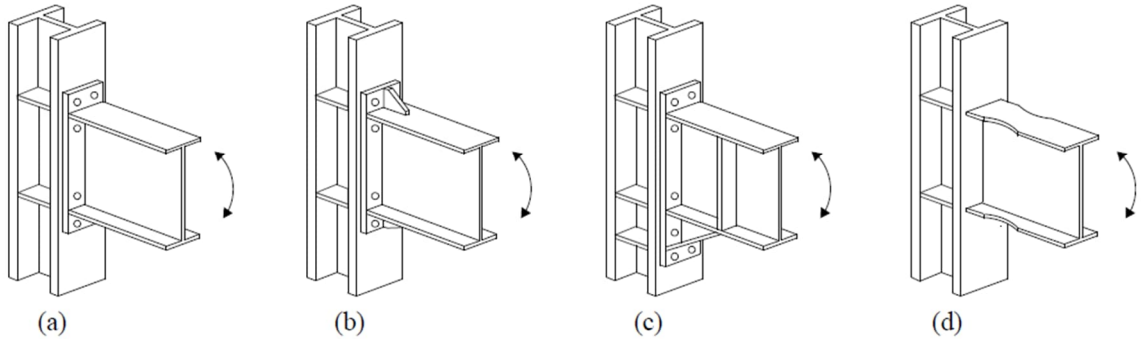


Abb. .438 Träger-Stützen-Verbindungen, die im Rahmen des EQUALJOINTS-Projekts präqualifiziert wurden: a) Geschraubte Voutenverbindung b) Geschraubte verlängerte, versteifte Endplattenverbindung c) Geschraubte verlängerte, unversteifte Endplattenverbindung d) Geschweißte Hundeknochenverbindung

Weitere innovative Lösungen für die Duktilitätsklassen DC2 und DC3 basieren auf Träger-Stützen-Verbindungen mit integrierten Reibungsdämpfern [63]. Der Träger wird hierbei mit einem klassischen, starren T-Stück an der oberen Flanschseite mit der Stütze verbunden, während an der unteren Flanschseite ein Reibungsdämpfer angeordnet ist (sieheAbb. .439). Der Reibungsdämpfer besteht aus einem Paket von Stahlplatten, die eine symmetrische Reibungswirkung gewährleisten sollen. Dieser ist so konstruiert, dass er bei einer Belastung zu gleiten beginnt, die unterhalb der Biegefestigkeit des angeschlossenen Trägers liegt. Auf diese Weise entstehen Verbindungen, die in der Lage sind, die seismische Eingangsenergie nahezu schadensfrei für die Stahlträger zu dissipieren.

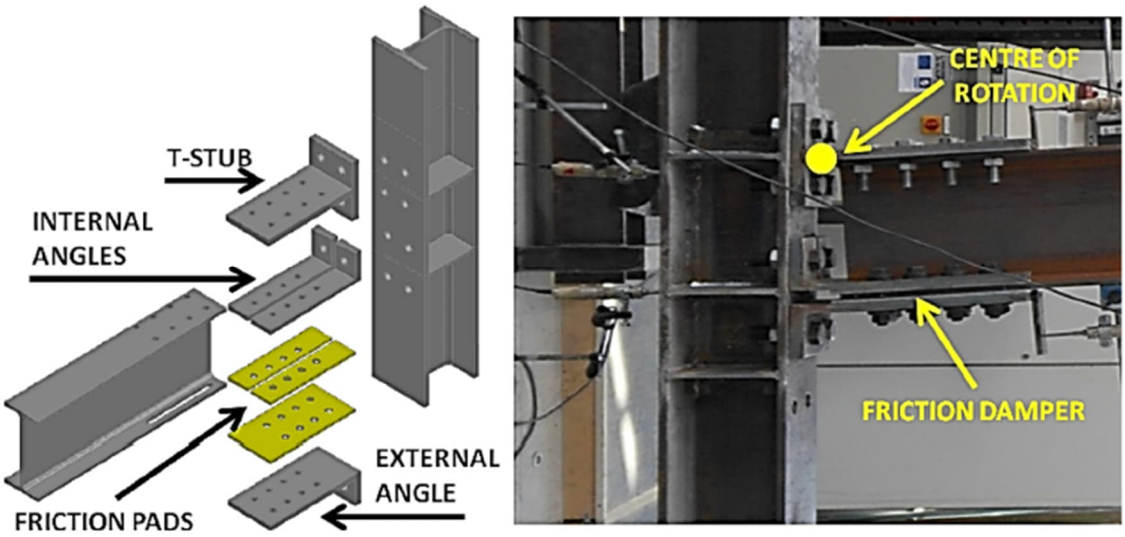


Abb. .439 Träger-Stützen-Verbindung mit Reibungsdämpfern [63]

Um die Ausnutzung des angeschlossenen Trägers zu maximieren, kann zusätzlich der Einsatz einer Trägerendvoute empfohlen werden, um den Hebelarm zu vergrößern und gezielt zu kalibrieren (sieheAbb. .440). Die Ergebnisse des Versuchsprogramms mit dem Reibungsdämpfer haben gezeigt, dass die angeschlossenen Träger auch unter

wiederholter zyklischer Belastung durch Erdbebenlasten schadensfrei gehalten werdne können.

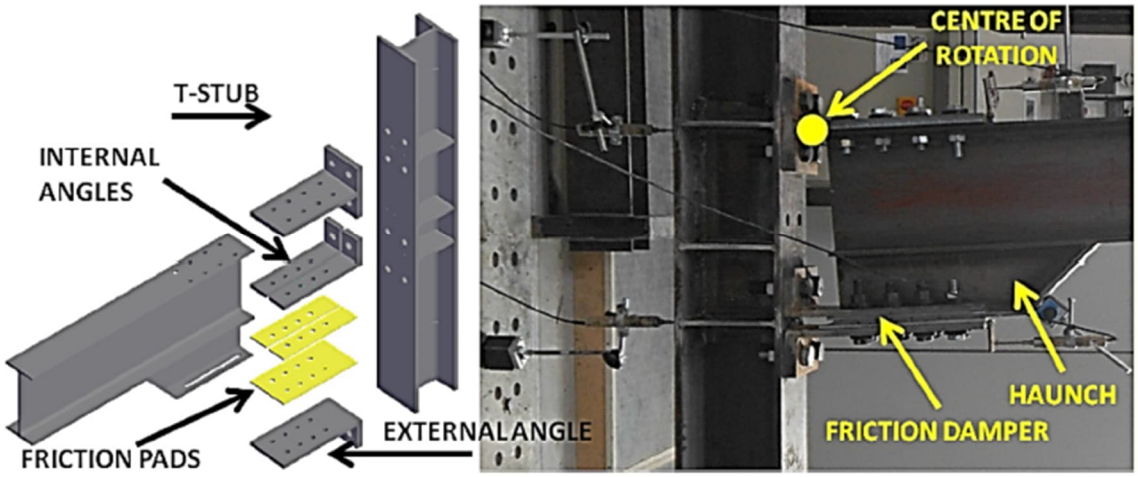


Abb. .440 Träger-Stützen-Verbindung mit Reibungsdämpfern und zusätzlicher Voute [63]

5 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Die wachsende Notwendigkeit, die Umweltauswirkungen des Bausektors zu verringern, hat zu einem erheblichen Interesse an der Wiederverwendung von Baumaterialien, insbesondere von Baustahl, geführt. Die vorliegende Veröffentlichung greift diesen Bedarf auf, indem sie Konstruktionsstrategien zeigt, die eine zukünftige Demontage und Wiederverwendung von Stahlelementen ermöglichen. Ein zentrales Thema ist die frühzeitige Integration von „Design for Disassembly“ (DfD)-Prinzipien in den Entwurfsprozesses. Dadurch wird sichergestellt, dass Bauwerke nicht nur funktional und dauerhaft sind, sondern auch an zukünftige Anforderungen angepasst werden können. Besonderes Augenmerk gilt modularen Bauweisen, standardisierten Komponenten und zugänglichen mechanischen Verbindungen, die zusammengenommen den Rückbau erleichtern und den Lebenszyklus von Materialien verlängern.

Darüber hinaus wird die Notwendigkeit der Rückverfolgbarkeit und einer umfassenden Dokumentation während der gesamten Lebensdauer eines Bauwerks hervorgehoben. Durch die Implementierung von Building Information Modelling (BIM) und die Führung detaillierter Gebäudedokumentationen wird sichergestellt, dass wesentliche Informationen wie Materialeigenschaften, Konstruktionsspezifikationen und Fertigungsdetails erhalten bleiben, wodurch eine zukünftige Wiederverwendung erheblich erleichtert wird. Der Leitfaden berücksichtigt zudem die Anforderungen an die Belastung und die Tragwerksanalyse mit dem Ziel, dass für die Demontage vorgesehene Bauwerke sowohl in ihrer anfänglichen als auch späteren Nutzungsphase hohe Leistungsanforderungen erfüllen. Durch die Verbindung technischer Präzision mit praktischen Strategien bietet der Leitfaden einen ganzheitlichen Ansatz für nachhaltiges Bauen.

Diese Empfehlungen markieren eine entscheidende Abkehr von den traditionellen Konstruktionspraktiken hin zu einem Modell der Kreislaufwirtschaft, in dem Materialien länger im Nutzungskreislauf verbleiben. Die Integration ökologischer Gesichtspunkte in den konstruktiven Entwurf, ohne Beeinträchtigung der Funktionalität oder Sicherheit, unterstreicht die Umsetzbarkeit der vorgeschlagenen Strategien. Die Publikation bietet eine solide Grundlage für die Förderung der Nachhaltigkeit im Bausektor und unterstützt Planer, Ingenieure und politische Entscheidungsträger, langfristige Umweltziele zu erreichen.

Die wesentlichen Schlussfolgerungen lauten:

- **Design for Reuse:** Die frühzeitige Integration von „Design for Disassembly“ (DfD)-Prinzipien in den Entwurfsprozess ermöglicht die zukünftige Wiederverwendung von Stahlbauelementen und unterstützt so die Umsetzung einer zirkulären Bauwirtschaft.
- **Modularität und Standardisierung:** Modulare Baukonzepte und standardisierte Stahlkomponenten erleichtern den Rückbau und erhöhen das Potenzial für Materialrückgewinnung und Wiederverwendung.
- **Reversible Verbindungen:** Die Verwendung von Schraub- und mechanischen Verbindungen anstelle dauerhafter Schweißverbindungen erleichtert die Demontage und Wiederverwendung.
- **Rückverfolgbarkeit und Dokumentation:** Detaillierte Aufzeichnungen, einschließlich Building Information Modelling (BIM) und Gebäudedokumentationen,

sichern essenzielle Daten zu Material und Fertigung für eine zukünftige Wiederverwendung.

- **Strukturelle Leistungsfähigkeit:** Konstruktionen müssen Wiederverwendbarkeit mit strengen Leistungsstandards in Einklang bringen, um Dauerhaftigkeit, Sicherheit und Anpassungsfähigkeit über mehrere Nutzungszyklen hinweg zu gewährleisten.
- **Reduktion der Umweltbelastungen:** Die Wiederverwendung von rückgewonnenen Stahlprodukten reduziert Bauabfälle und Kohlenstoffemissionen erheblich.
- **Fortschritt für die Bauindustrie:** Die Richtlinien fördern einen Wandel in der Bauindustrie hin zu nachhaltigen Praktiken, ohne die Funktionalität, die Wirtschaftlichkeit oder die Sicherheit zu beeinträchtigen.
- **Abstimmung von Politik und Praxis:** Die Publikation unterstützt die Entwicklung von Industriestandards und Vorschriften, die eine breitere Akzeptanz von wiederverwendungsorientierten Designstrategien fördern.

REFERENZEN

[1] Gorgolewski M (2006). Die Auswirkungen von Wiederverwendung und Recycling auf die Konstruktion von Stahlgebäuden. Can J Civ Eng 33, 489-496.

[2] Allianz Stahl (2008). Eingeschossige Gebäude, Teil 1: Leitfaden für Architekten. Entwurfsleitfaden, erstellt im Rahmen des RFS2-CT-2008-0030 Erleichterung der Marktentwicklung für Profile in Industriehallen und Gebäuden mit geringer Höhe (SECHALO).

[3] Allianz Stahl (2008). Mehrstöckige Gebäude, Teil 1: Leitfaden für Architekten. Entwurfsleitfaden, erstellt im Rahmen des RFS2-CT-2008-0030 Erleichterung der Marktentwicklung für Profile in Industriehallen und Flachbauten (SECHALO).

[4] SCI P399 (2015). Design of Steel Portal Frame Buildings to Eurocode 3. The Steel Construction Institute, UK.

[5] SCI P252 (2004). Bemessung von einfeldrigen Stahl-Portalrahmen nach BS5950-1:2000. Das Stahlbauinstitut, UK.

[6] CEN - Europäisches Komitee für Normung (2024). EN 1993-1-8: Eurocode 3: Bemessung von Stahlbauten, Teil 1-8: Bemessung von Verbindungen, Brüssel, Belgien.

[7] BSI - Britisches Normungsinstitut - BS 5950-1:2000. Strukturelle Verwendung von Stahlkonstruktionen im Bauwesen. Regelwerk für die Bemessung. Gewalzte und geschweißte Profile.

[8] CEN - Europäisches Komitee für Normung (2022). EN 1993-1-1: Eurocode 3: Bemessung von Stahlbauten, Teil 1-1: Allgemeine Regeln und Regeln für Gebäude, Brüssel, Belgien.

[9] CEN - Europäisches Komitee für Normung (2023). EN 1990: Eurocode: Grundlagen der statischen und geotechnischen Bemessung, Brüssel, Belgien.

[10] Allianz Stahl (2008). Mehrgeschossige Gebäude, Teil 2: Konzeptentwurf. Entwurfsleitfaden, erstellt im Rahmen des RFS2-CT-2008-0030 zur Erleichterung der Marktentwicklung für Profile in Industriehallen und Gebäuden mit geringer Höhe (SECHALO).

[11] ISO 12944-1. Beschichtungsstoffe - Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Schutzanstrichsysteme - Teil 1: Allgemeine Einführung, 2017 .

[12] ISO 1461. Feuerverzinkte Überzüge auf Eisen- und Stahlerzeugnissen - Spezifikationen und Prüfverfahren, 2009.

[13] ISO 14713-1:2017. Zinküberzüge - Richtlinien und Empfehlungen für den Korrosionsschutz von Eisen und Stahl in Bauwerken - Teil 1: Allgemeine Gestaltungsgrundsätze und Korrosionsbeständigkeit .

[14] ISO 14713-2. Zinküberzüge - Richtlinien und Empfehlungen für den Schutz gegen Korrosion von Eisen und Stahl in Bauwerken - Teil 2: Feuerverzinkung, 2009.

[15] ISO 14713-3:2017. Zinküberzüge - Richtlinien und Empfehlungen für den Korrosionsschutz von Eisen und Stahl im Bauwesen - Teil 3: Feuerverzinkung .

[16] CEN - Europäisches Komitee für Normung - EN ISO 19650-1:2018; Organisation und Digitalisierung von Informationen über Gebäude und Ingenieurbauwerke, einschließlich Gebäudedatenmodellierung (BIM) - Informationsmanagement unter Verwendung der Gebäudedatenmodellierung.

[17] CEN - Europäisches Komitee für Normung - EN ISO 19650-2:2018; Organisation und Digitalisierung von Informationen über Gebäude und Ingenieurbauwerke, einschließlich Building Information Modeling (BIM) - Informationsmanagement mit Hilfe von Building Information Modeling.

[18] CEN - Europäisches Komitee für Normung - prEN 17412 - Building information modelling - Level of information needed - concepts and principles .

[19] CEN - Europäisches Komitee für Normung - prEN ISO 23387-1 Gebäudeinformationsmodellierung (BIM) - Datenvorlagen für Bauobjekte, die im Lebenszyklus einer baulichen Anlage verwendet werden - Konzepte und Grundsätze .

[20] ISO/DIS 20887. Nachhaltigkeit in Gebäuden und Ingenieurbauwerken - Rückbaubarkeit und Anpassungsfähigkeit - Grundsätze, Anforderungen und Anleitung.

[21] CWA 17316: 2018. Intelligente CE-Kennzeichnung für Bauprodukte; CEN-CENELEC Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brüssel .

[22] Allianz Stahl (2008). Multi-storey buildings, Part 3: Actions. Konstruktionsleitfaden, erstellt im Rahmen des RFS2-CT-2008-0030 Erleichterung der Marktentwicklung für Profile in Industriehallen und Gebäuden mit geringer Höhe (SECHALO).

[23] CEN - Europäisches Komitee für Normung (2002). EN 1991-1-3: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen - Schneelasten (mit CEN-Berichtigungen Dez. 2004 und Jun. 2009 und CEN-Änderung A1:2015), Brüssel, Belgien.

[24] CEN - Europäisches Komitee für Normung (2002). EN 1991-1-4: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windeinwirkungen (unter Einbeziehung der CEN-Änderung A1:2010), Brüssel, Belgien.

[25] Kray T, Paul J (2015). Vergleichende Studie der Auswirkungen auf den durch vierunddreißig europäische Windlastnormen berechneten Spitzengeschwindigkeitsdruck. Proc. 14thInternational Conference on Wind Engineering, Porto Alegre, Brasil, June 21-26.

[26] Holický M (2009). Zuverlässigkeitsanalyse für Strukturdesign. Sun Press.

[27] CEN - Europäisches Komitee für Normung (2010). NEN-EN 1990+A1+A1/C2/NB. Nationaler Anhang zu NEN-EN 1990+A1:2006+A1:2006/C2:2010 Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung .

[28] CEN - Europäisches Komitee für Normung (2003). EN 1991-1-5: Eurocode 1. Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen - Thermische Einwirkungen, Brüssel, Belgien.

[29] Davison B, Owens GW (eds.) (2012). Steel designers' manual. The Steel Construction Institute, 7thedition, Wiley-Blackwell, UK.

[30] Forschungsfonds für Kohle und Stahl (RFCS): Progress - Case study Fokker 7 distribution Center Schiphol Airport; Bilder mit freundlicher Genehmigung von Tata Steel (https://www.tatasteeleurope.com/) .

[31] https://www.ruukki.com/

[32] SCI P358 (2014). Fugen im Stahlbau: Einfache Verbindungen nach Eurocode 3. The Steel Construction Institute .

[33] SCI P338 (2004). Quicon Design Guide to BS 5950-1. Das Stahlbauinstitut .

[34] https://www.newsteelconstruction.com/wp/quicon-wins-contract-at-ikea/

[35] SCI P428 (2020). Leitfaden für abnehmbare Verbundkonstruktionssysteme für die britische Praxis, 2020. Das Stahlbauinstitut .

[36] https://www.kloecknermetalsuk.com/westok/

[37] https://www.spstechnology.com/

[38] http://www.lindapter.com/

[39] CEN - Europäisches Komitee für Normung (2023). prEN 1998-1-2: Eurocode 8 - Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1-2: Gebäude , Brüssel, Belgien.

[40] SCI P287 (2003). Bemessung von Verbundträgern mit vorgefertigten Betonplatten. Das Stahlbauinstitut.

[41] SCI P342 (2006). Bemessung von asymmetrischen Slimfloor-Trägern mit vorgefertigten Betonplatten. Das Institut für Stahlbau.

[42] SCI P334 (2004). Bemessung von mehrstöckigen ausgesteiften Rahmen. Das Institut für Stahlbau.

[43] https://www.peikko.com/products/deltabeam-slim-floor-structures/technical-information /https://www.peikko.com/products/deltabeam-slim-floor-structures/technical-information.

[44] Forschungsfonds für Kohle und Stahl (RFCS): Wiederverwendung und Demontierbarkeit von Stahlkonstruktionen und Kreislaufwirtschaft - REDUCE, Projektnummer RFCS-02-2015.

[45] Odenbreit C, Yang J, Romero A, Kozma A (2023). Ein Lego-ähnliches Stahlskelettsystem für Standardisierung und Serienproduktion. Stahlbau 16(1), 56-64.

[46] Kavoura F, Veljkovic M (2023). Entwurfsstrategien für wiederverwendbare Strukturkomponenten in der gebauten Umwelt. *Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems, Biondini & Frangopol (Eds). 799-806.*

[47] Kozma A, Odenbreit C, Braun MV, Veljkovic M, Nijgh MP (2019). Push-out tests on demountable shear connectors of steel-concrete composite structures, Structures 21, 45-54.

[48] SCI P428 (2020). Guidance on Demountable Composite Construction Systems for UK Practice. Das Institut für Stahlbau.

[49] Romero A, Odenbreit C (2024). Innovative zerlegbare Stahl-Holz-Verbundbalken (STC): Experimentelle Biegeversuche in Originalgröße. Engineering Structures, 318, 118599.

[50] Bompa DV, Ungureanu V, Elghazouli AY, Afsal A (2024). Demontage und strukturelles Wiederverwendungspotenzial von Stahl-Holz-Schubverbindungen mit Schrauben. V. Ungureanu et al. (Eds.): CESARE 2024, LNCE 489, 1-12.

[51] AISC Design Guide 37 (2022). Hybride Stahlrahmen mit Holzböden. Amerikanisches Institut für Stahlbau.

[52] ECCS Nº145 (2024). Stand der Technik bei Stahl-Holz-(Beton-)Konstruktionen, 1st Ausgabe, ECCS: European Convention for Constructional Steelwork, ISBN: 978-92-9147-199-7.

[53] Ferdousa W, Baib Y, Ngoc TD, Manalod A, Mendisc P (2019). Neue Fortschritte, Herausforderungen und Möglichkeiten von mehrstöckigen modularen Gebäuden - Ein Überblick über den Stand der Technik. Engineering Structures 183, 883-893.

[54] Loss C, Piazza M, Zandonini R (2016). Connections for steel-timber hybrid prefabricated buildings. Part I: Experimental tests. Construction and Building Materials 122, 781-795.

[55] Loss C, Piazza M, Zandonini R (2016). Verbindungen für Stahl-Holz-Hybrid-Fertigbauten. Part II: Innovative modular structures. Construction and Building Materials 122, 796-808.

[56] Forschungsfonds für Kohle und Stahl (RFCS): European pre-QUALIfied Steel JOINTS - EQUALJOINTS-PLUS, Projektnummer 754048 - RFCS-02-2016.

[57] EQUALJOINTS-PLUS (2018): Informationsbroschüren für 4 seismisch qualifizierte Verbindungen. Nº EQJ1-EN, 1. Ausgabe, ECCS.

[58] Equaljoints PLUS (2018): Pränormative Bemessungsempfehlungen für seismisch qualifizierte Stahlverbindungen. Nº EQJ2-EN, 1. Ausgabe, ECCS.

[59] ASCE 7-10 (2010). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. Amerikanische Gesellschaft der Bauingenieure, USA.

[60] ANSI-AISC 341-10 (2010). Seismische Bestimmungen für Stahlkonstruktionen. Amerikanisches Institut für Stahlbau (AISC), USA.

[61] ANSI/AISC 358-16 (2016). Präqualifizierte Verbindungen für spezielle und mittlere Stahlmomentrahmen für seismische Anwendungen. Amerikanisches Institut für Stahlbau (AISC), USA.

[62] AISC 360-16 (2016). Spezifikation für strukturelle Stahlgebäude. Amerikanisches Institut für Stahlbau (AISC), USA.

[63] Latour M, Piluso V, Rizzano G (2018). Experimentelle Analyse von Träger-Stützen-Verbindungen, die mit gespritzten Aluminium-Reibungsdämpfern ausgestattet sind. Journal of Constructional Steel Research 146, 33-48.

Funded by the European Union

Das Ziel des ADVANCE-Projekts besteht darin, einen Beitrag zur Reduzierung von Treibhausgasen sowie zur Förderung von Kreislaufwirtschaft zu leisten, indem die damit verbundenen Herausforderungen sowohl beim Rückbau und bei der Wiederverwendung bestehender Stahlgebäude als auch bei der Planung neuer Gebäude, ihrem Bau und ihrer Dokumentation addressiert werden, um eine zukünftige Wiederverwendung zu erleichtern. Der Anwendungsbereich umfasst die Wiederverwendung von einzelnen Bauteilen, zusammengesetzten Bauteilen sowie von Baugruppen. Das wiederverwendete Material kann aus Primärstrukturen, Sekundärstrukturen oder Verkleidungen stammen. Die Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der Stahlindustrie ist in den vergangenen Jahren zu einer zwingenden Notwendigkeit geworden. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf dem Bausektor, da dieser den größten Einzelbeitrag zum ökologischen Fußabdrucks dieser Industrie leistet. Der Bausektor bietet die Möglichkeit, stahlbasierte Technologien in eine führende Position bei der Dekarbonisierung anderer relevanter Industrien zu etablieren, die von Stahllösungen abhängig sind.

ECCS
CECM
E K S

EUROPEAN CONVENTION FOR CONSTRUCTIONAL STEELWORK
CONVENTION EUROPÉENNE DE LA CONSTRUCTION MÉTALLIQUE
EUROPÄISCHE KONVENTION FÜR STAHLBAU

publications@steelconstruct.com | www.steelconstruct.com

TC14 ist der Technische Ausschuss innerhalb des ECCS für Nachhaltigkeit und Ökoeffizienz im Stahlbau. Ziel des Ausschusses ist es, Entwicklungen in Industrie, Forschung und Lehre zu fördern, welche das Wissen und Fähigkeiten in Bezug auf nachhaltigen Stahlbau stärken. Das breite Themensprektrum des TC14 umfasst unter anderem: Management der Gesamtleistung von Gebäuden über den gesamten Lebenszyklus; Techniken zur Verbesserung der Umweltverträglichkeit; Techniken zur Sicherstellung einer hohen Qualität und eines hohen Komfort des Raumklimas; Energieeffizienz; Minimierung des Ressourcenverbrauchs und des Einsatzes von Rohstoffen.