



Stadt Zürich
Amt für Hochbauten

01 | 2013

Studienauftrag
Graue Energie von
Hallendächern

Fachstelle
Nachhaltigkeit

Inhalt

Zusammenfassung	3
Einleitung	4
Zielsetzung	5
Bewertungssystem	6
Nutzung der Resultate im Projektablauf	7
Kleine Halle	8
Grosse Halle	10
Ergebnisse	12
Schlussbemerkungen und Ausblick	17
Grundlagen und weiterführende Informationen	18
Anhang.....	19

Impressum

Auftraggeber:

Stadt Zürich
Amt für Hochbauten
Lindenhofstrasse 21
8021 Zürich

Auftragnehmer:

dsp Ingenieure & Planer AG
Tramstrasse 1
8050 Zürich

Autoren:

Alexander Beck
Bruno Patt

Diese Broschüre ist als PDF verfügbar unter:

www.stadt-zuerich.ch/nachhaltiges-bauen → Fachinformationen → Baustoffe

Greifensee, Dezember 2012

Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wird untersucht, wie sich verschiedene Dachkonstruktionen bezüglich statischem System und Materialisierung auf die Kosten und die Umwelt auswirken. Die Auswirkungen auf die Umwelt werden mittels grauer Energie (nicht erneuerbare Primärenergie) und Treibhausgasemissionen, welche durch den Bau und Rückbau des Daches entstehen, quantifiziert. Für die Berechnungen werden zwei Hallengrundrisse (klein: $b \times l = 30 \times 45 \text{ m}$; gross: $b \times l = 60 \times 90 \text{ m}$) und zwei verschiedenen schwere Dachaufbauten (leicht: 100 kg/m^2 ; schwer: 300 kg/m^2) jeweils kombiniert und näher betrachtet. Es werden verschiedene statische Systeme mit variierenden Materialisierungen entwickelt und dann für das Tragwerk sowohl die Kosten als auch die graue Energie (bzw. Treibhausgasemissionen) pro Quadratmeter Dachfläche und Jahr der Nutzungsdauer geschätzt. Die Kosten und die Umweltbelastung können einander dann gegenübergestellt und mit Hilfe einer Matrixdarstellung interpretiert werden. Die Kosten werden auf der senkrechten Achse und die Umweltbelastung auf der horizontalen Achse abgetragen.

Bezüglich Materialisierung sind die Lösungen aus Holz ökologisch gesehen am besten, aber gleichzeitig auch am kostenintensivsten. Stahllösungen fallen ökologisch gesehen stark ab, sind aber günstig. Spannbetonlösungen sind sowohl günstig als auch ökologisch effizient. Für die statischen Systeme gilt, dass der Materialverbrauch und somit die Umweltbelastung sinkt, wenn eine aufgelöste Konstruktion (z.B. ein Fachwerk) oder ein Bogentragwerk verwendet wird. Die Kosten sinken dabei aber weniger stark oder steigen sogar, da bei solchen Konstruktionen der Arbeitsaufwand pro Materialeinheit zunimmt. Eine andere sehr effiziente Massnahme zur Materialeinsparung ist es, Vorspannung einzusetzen, zum Beispiel im Beton oder als Unterspannung.

Die Ergebnisse der Studie können verwendet werden, um bereits im Variantenstudium festzulegen, welche statischen Systeme und Materialisierungen für die Dachkonstruktion in Frage kommen. Die Bauherrschaft legt fest, wie stark sie Kosten und Umwelt gewichten will. Anhand dieser Angaben kann mit Hilfe der in diesem Bericht enthaltenen Diagramme eine Grob beurteilung vorgenommen werden, welche Varianten effizient sind und zu den vorgegebenen Zielvorgaben führen.

Einleitung

Bei der Planung von neu zu erstellenden Gebäuden sind heutzutage nicht mehr nur die Erstellungs-, Unterhalts- und Rückbaukosten von entscheidender Bedeutung für eine Investition. Bei einem Bauvorhaben bildet immer öfter die Nachhaltigkeit, über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes in den Bereichen Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft betrachtet, die Entscheidungsgrundlage. Die Möglichkeit der quantitativen Beurteilung, ob ein Bauvorhaben mit der gewählten Konstruktion und Materialisierung nachhaltig ist, spielt somit eine wichtige Rolle.

Der vorliegende Studienauftrag zielt darauf ab, ein systematisches Beurteilungsschema zur Nachhaltigkeit von Hallendachkonstruktionen, die verschiedene Materialisierungen und statische Tragsysteme aufweisen, zu entwickeln. Für die Beurteilung der untersuchten Dachvarianten wird nur deren Tragkonstruktion betrachtet. Dabei werden sowohl der wirtschaftliche wie auch der ökologische Aspekt der Nachhaltigkeit beurteilt.

Die untersuchten Tragkonstruktionen müssen die vorgegebene Halle stützenfrei überspannen. In der Studie werden zwei Grundrisse näher betrachtet: Eine kleine Halle mit den Abmessungen von 30x45 m und eine grosse Halle mit den Abmessungen von 60x90 m. Neben den Grundrissabmessungen können auch der Dachaufbau und somit die ständigen Lasten, die aus diesem resultieren, variieren. Es wird ein Leichtdach untersucht, das Auflasten von 50 kg/m² aufweist, sowie ein schweres Dach mit Auflasten von 250 kg/m². Dieses schwere Dach eignet sich zum Beispiel für die Retention von Regenwasser. Bei beiden Dächern wird zusätzlich noch 50 kg/m² für eine Solarstromanlage eingerechnet, da sich solche grosse Dachflächen gut für die Alternativstromerzeugung eignen. Für die Nutzlasten wird davon ausgegangen, dass die Dächer nicht begehbar sind und somit Schnee mit einer Last von 100 kg/m² (für das schweizerische Mittelland) der massgebende Lastfall ist.

	Leichtes Dach	Schweres Dach	
Kleine Halle	$b \times l = 30 \times 45 \text{ m}$ $q_{k,A} = 100 \text{ kg/m}^2$	$b \times l = 30 \times 45 \text{ m}$ $q_{k,A} = 300 \text{ kg/m}^2$	Grundrissabmessungen Breite x Länge: $b \times l$ Ständige Lasten aus Dachaufbau: $q_{k,A}$
Grosse Halle	$b \times l = 60 \times 90 \text{ m}$ $q_{k,A} = 100 \text{ kg/m}^2$	$b \times l = 60 \times 90 \text{ m}$ $q_{k,A} = 300 \text{ kg/m}^2$	

Tab. 1: Untersuchte Hallendachvarianten

Zielsetzung

Die Studie hat zum Ziel, verschiedene Hallendachkonstruktionen bezüglich grauer Energie respektive Treibhausgasemissionen und Kosten zu bewerten. Es werden zwei Hallengrößen (gross und klein) und zwei verschieden schwere Dachaufbauten (leicht und schwer) für verschiedene statische Systeme und unterschiedliche Materialisierungen (Holz, Stahl und Spannbeton) miteinander verglichen. Ziel ist es eine quantitative und vergleichende Bewertung der Varianten zu erstellen. Über Kriteriengruppen, die nicht quantitativ festgehalten werden können, wie zum Beispiel Flexibilität der Konstruktion, Konstruktionshöhe usw., sind im ausführlichen Bericht [1] qualitative Aussagen erfasst, die die Vor- und Nachteile der gewählten Konstruktion beschreiben. Diese fließen allerdings nicht in die vergleichende Gesamtbewertung ein.

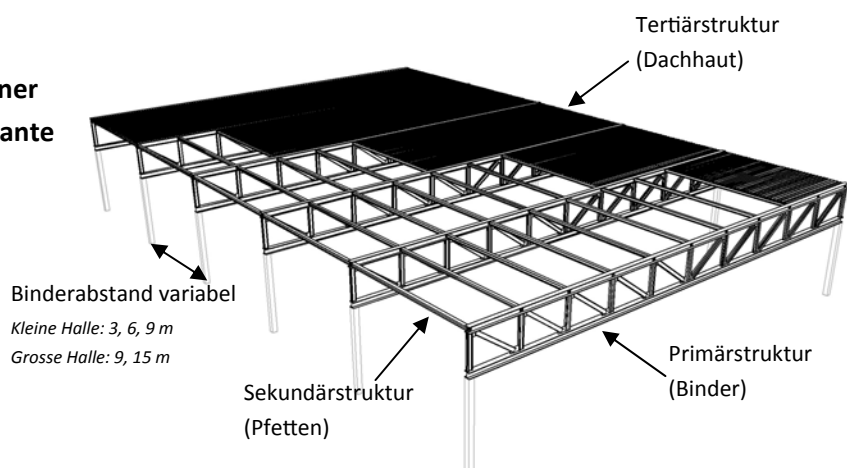
Für die Bewertung der Varianten wird nur die statisch notwendige, tragende Dachkonstruktion zur Abtragung der vertikalen Lasten auf das Stützenraster betrachtet. Das heisst, dass folgende Elemente nicht Teil der Beurteilung sind:

- Stützen zur Abtragung der Lasten in den Untergrund
- Horizontalaussteifung der Dachkonstruktion sowie der Halle insgesamt
- Nicht tragende Teile der Konstruktion (Dachaufbau, Isolation, Fassade, Haustechnik etc.)

Neben den vertikalen Lasten können auch andere Gefährdungsbilder wie Schwingungen, lokale Instabilitäten usw. massgebend werden. Da diese aber durch konstruktive Massnahmen ausgeschlossen werden können, werden sie nicht weiter betrachtet.

Neben dieser Abgrenzung wird die tragende Konstruktion zur Abtragung der vertikalen Lasten für die Bewertung weiter unterteilt in Primär-, Sekundär- und — wo vorhanden — Tertiärstruktur. In anderen Worten heisst das Binder, Pfetten und Dachhaut, wobei je nach Binderabstand die Dachhaut direkt auf die Binder abgetragen werden kann. Aus diesem Grund kann es auch sein, dass verschiedene Binderabstände unterschiedliche Lösungen für die wirtschaftliche und ökologische Nachhaltigkeit ergeben. Deshalb wird jede Variante für verschiedene Binderabstände bewertet. Im Fall der kleinen Halle sind die Binderabstände zu 3, 6 und 9 m gewählt, während die grosse Halle für Binderabstände von 9 und 15 m bewertet wird.

Abb. 1: Beispiel einer untersuchten Variante (Stahlfachwerk)



Bewertungssystem

Um die verschiedenen Lösungen miteinander vergleichen und Schlüsse über die wirtschaftliche und ökologische Nachhaltigkeit ziehen zu können, werden die Kosten und die Umweltbelastung der Konstruktionen in ihren jeweiligen Einheiten auf einen Quadratmeter Dachfläche und pro Jahr der Lebensdauer normiert. Die Konstruktionen werden in verschiedene Teile unterteilt (Primär-, Sekundär- und Tertiärstruktur), damit der Einfluss der einzelnen Teile ersichtlich wird und auch bei einem Dach, dessen Binder nicht aus dem selben Material bestehen wie Pfetten und Dachhaut, eine Aussage gemacht werden kann. Die Konstruktionselemente ihrerseits sind ebenfalls unterteilt in die verschiedenen Materialien (z.B. Beton, Spannstahl und Bewehrungsstahl), aus denen sie bestehen. Für den Gesamtvergleich der verschiedenen Varianten wird ein Diagramm erstellt, das in einer Matrixdarstellung, in der auf der einen Achse die Umweltbelastung und auf der anderen die Kosten dargestellt sind, die untersuchten Varianten gegeneinander aufzeigt.

Kosten

Die Erstellungskosten der Dachkonstruktionen werden aus Erfahrungswerten ermittelt. Für die Erstellung des Tragwerks spielen dabei der Materialaufwand, die Herstellungsart sowie die Transport- und Einbaukosten eine Rolle. Die Unterhaltskosten über die gesamte Nutzungsdauer werden nicht eingerechnet, da davon ausgegangen wird, dass die tragende Konstruktion, die sich im Inneren einer Halle befindet, nicht stark unterhalten werden muss und die Unterhaltskosten somit nicht gross ins Gewicht fallen. Die Entsorgung bzw. der Rückbau der Tragkonstruktion wird ebenfalls vernachlässigt, da diese kostenmässig sehr schwer zu quantifizieren, aber im Vergleich zur Erstellung klein sind. Bei einer Einrechnung würde sich dabei vor allem die Frage stellen, ob die Konstruktion wiederverwertet oder entsorgt wird, was bei der Umweltbelastung viel stärker ins Gewicht fällt.

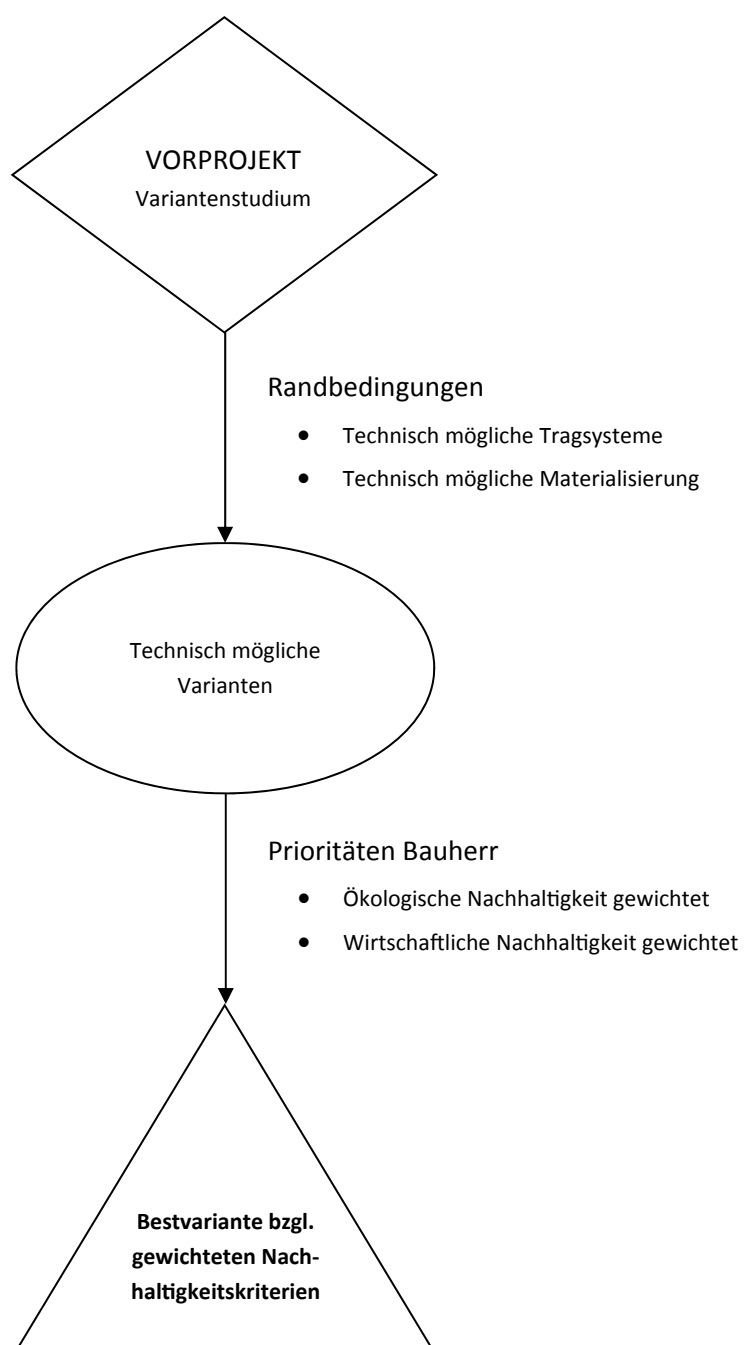
Für die Bewertung werden die Erstellungskosten auf die Dachfläche und die Lebensdauer normiert (in Fr. pro Quadratmeter Dachfläche und Jahr). Die Einheitspreise für die Materialien, die zur Berechnung der Kosten verwendet werden, können den Grundlagen und weiterführenden Informationen (S.18) entnommen werden.

Umweltbelastung

Die ökologische Nachhaltigkeit der verschiedenen Lösungen wird durch Angabe der nicht erneuerbaren Primärenergie (graue Energie, in MJ pro Quadratmeter Dachfläche und Jahr) und der Treibhausgasemissionen bezogen auf die Leitsubstanz CO₂ (in kg pro Quadratmeter Dachfläche und Jahr) quantifiziert. Die Zahlenwerte beziehen sich auf Herstellung und Entsorgung der verwendeten Baustoffe und sind der Empfehlung «Ökobilanzen im Baubereich, 2009/1, Stand Januar 2011» des KBOB, eco-bau, IPB entnommen (siehe weiterführende Informationen, S.18). Die Bestimmungen über die graue Energie aus dem Merkblatt SIA 2032:2010 «Graue Energie von Gebäuden» verweisen auf diese Datensätze. Die Umweltbelastung für den Transport, Einbau und Unterhalt des Tragwerks wird vernachlässigt. Dies ist einerseits durch das Merkblatt SIA 2032:2010 zugelassen und andererseits dadurch gerechtfertigt, dass der Einfluss dieser Lebenszyklusabschnitte aus den weiter oben genannten Gründen klein ist. Beim Transport ist eine Vernachlässigung aber nur solange akzeptabel, wie sich die Transportwege nicht extrem stark unterscheiden. Man denke etwa an einen Holzbalken aus der Schweiz und Stahl aus China. Dies ist allerdings nicht berücksichtigt und jeweils gesondert zu betrachten.

Nutzung der Resultate im Projektablauf

Ziel ist es, für die Projektierung von Hallendächern die vorliegende Studie als Unterstützung für die Planung heranziehen zu können. Je nach dem, welche Prioritäten von Seiten der Bauherrschaft gesetzt werden, muss die ökologische oder wirtschaftliche Nachhaltigkeit in den Vordergrund gestellt werden. Das kann dadurch erreicht werden, indem eine Gewichtung angesetzt wird, was in den Diagrammen (siehe Ergebnisse, S.12 ff.) einer Achsenstreckung gleichkommt. Umso wichtiger ein Kriterium, umso kleiner wird das Intervall. Im Folgenden ist illustrativ dargestellt, wie man im Projektablauf diese Kriterien einfließen lassen kann. Es ist von Vorteil, wenn dies schon im Variantenstudium während des Vorprojekts geschieht.



Kleine Halle - Übersicht

Für die kleine Halle mit einem Grundriss von 30 x 45 m werden die verschiedenen statischen Systeme aus den Materialien gemäss Tabelle 2 untersucht. Die Bezeichnung des Tragwerks gilt für den Binder. Die Sekundär- und Tertiärstruktur sind pro Materialisierung jeweils gleich, unterscheiden sich jedoch in der Dimension abhängig vom Binderabstand. Sie sind nachfolgend kurz beschrieben:

- Holz: Die Sekundärstruktur besteht aus einem Hohlkastenfertigelement aus Holz, das gleichzeitig den Dachabschluss bildet.
- Stahl: Die Sekundärstruktur besteht aus H-Profilen, auf welche als Tertiärstruktur ein Trapezblech aufgelegt ist.
- Beton: Die Sekundärstruktur besteht aus vorgefertigten, vorgespannten Rippenplatten, die gleichzeitig den Dachabschluss bilden.

Tragwerk	Holz	Stahl	Beton
Vollwandträger			
Fachwerkträger			—
Unterspannte Träger			
Hohlkastenträger		—	—
Bogenträger			—

Tab. 2: Untersuchte Tragwerke für die kleine Halle

Grundlagen zur Berechnung und Bewertung der kleinen Halle

- Grundrissabmessungen: 30 x 45 m
- Binderabstand: $a = 3, 6, 9 \text{ m}$
- Auflasten: $q_{k,A} = 300 \text{ kg/m}^2$ (schweres Dach), $q_{k,A} = 100 \text{ kg/m}^2$ (leichtes Dach)
- Schneelasten: $q_{k,S} = 100 \text{ kg/m}^2$

Kleine Halle - Berechnungsbeispiel

Nachfolgend wird für die kleine Halle ein ausführliches Berechnungsbeispiel einer Variante vorgestellt. Die Systematik kann analog auf alle Konstruktionen und Materialisierungen übertragen und im Detail dem ausführlichen Bericht [1] entnommen werden. Beim Beispiel handelt es sich um den Vollwandträger aus Holz für einen Binderabstand von $a = 9\text{ m}$ und eine Auflast von $q_{k,A} = 300\text{ kg/m}^2$.

Grundlagen für die Berechnung der Umweltbelastung (aus „Ökobilanzen im Baubereich 2009/1“) und der Kosten:

Lebensdauer 60 Jahre

Primärstruktur (Binder) aus Brettschichtholz:

Graue Energie 8.11 MJ/kg

Treibhausgasemissionen 0.53 kg/kg

Kosten 2.80 Fr./kg

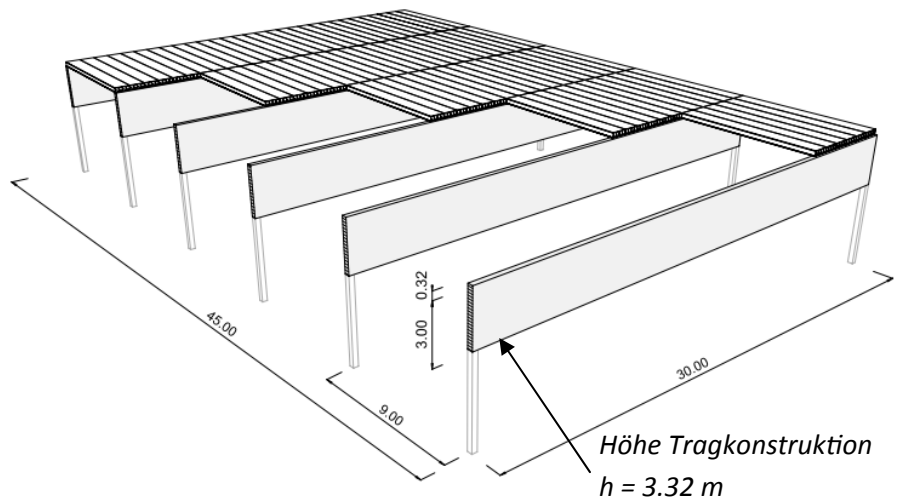
Sekundärstruktur (Dachhaut) aus Hohlkastenelementen (massiv):

Graue Energie 2.62 MJ/kg

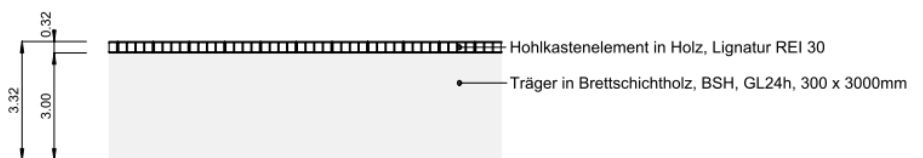
Treibhausgasemissionen 0.11 kg/kg

Kosten 4.50 Fr./kg

Perspektive Tragstruktur



Ansicht Primärstruktur



Ansicht Sekundärstruktur

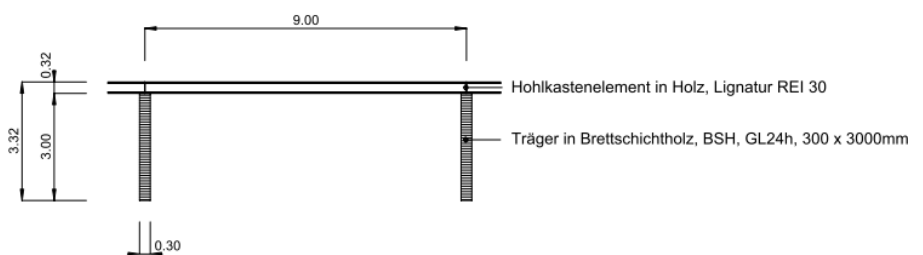


Abb. 2: Vollwandträger in Holz, $a = 9\text{ m}$, $q_{k,A} = 300\text{ kg/m}^2$ (schweres Dach)

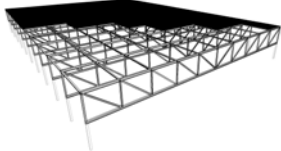
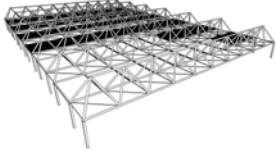
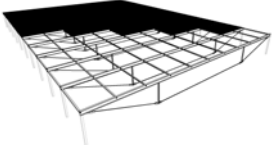
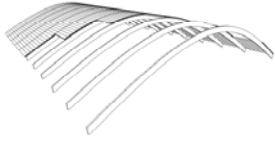
Tragwerksteil	Ausmass [kg/m ²]	Graue Energie [MJ/(m ² ·a)]	Treibhausgasemissionen [kg/(m ² ·a)]	Kosten [Fr./(m ² ·a)]
Holz Primärstruktur	60.00	8.11	0.53	2.80
Holz Sekundärstruktur	51.00	2.23	0.09	3.82
Total	111.00	10.34	0.62	6.62

Tab. 3: Umweltbelastung und Kosten pro m² Dachfläche und Jahr (a)

Grosse Halle - Übersicht

Für die grosse Halle mit einem Grundriss von 60 x 90 m werden die verschiedenen statischen Systeme aus den Materialien gemäss Tabelle 4 untersucht. Die Bezeichnung des Tragwerks gilt für den Binder. Die Sekundär- und Tertiärstruktur sind pro Materialisierung jeweils gleich, unterscheiden sich jedoch in der Dimension abhängig vom Binderabstand. Sie sind nachfolgend kurz beschrieben:

- Holz: Die Sekundärstruktur besteht aus einem Hohlkastenfertigelement aus Holz, das gleichzeitig den Dachabschluss bildet.
- Stahl: Die Sekundärstruktur besteht aus H-Profilen, auf welche als Tertiärstruktur ein Trapezblech aufgelegt ist.
- Beton: Für eine Halle mit diesen Dimensionen wird Beton nicht mehr untersucht, da die Fertigelemente, die auf die Baustelle geliefert werden müssen, nicht mehr transportiert werden können.

Tragwerk	Holz	Stahl	Beton
Fachwerkträger	—		—
Fachwerkträger 3D	—		—
Unterspannte Träger	—		—
Bogenträger		—	—

Tab. 4: Untersuchte Tragwerke für die grosse Halle

Grundlagen zur Berechnung und Bewertung der kleinen Halle

- Grundrissabmessungen: 60 x 90 m
- Binderabstand: $a = 9, 15 \text{ m}$
- Auflasten: $q_{k,A} = 300 \text{ kg/m}^2$ (schweres Dach), $q_{k,A} = 100 \text{ kg/m}^2$ (leichtes Dach)
- Schneelasten: $q_{k,S} = 100 \text{ kg/m}^2$

Grosse Halle - Berechnungsbeispiel

Nachfolgend wird für die grosse Halle ein ausführliches Berechnungsbeispiel einer Variante vorgestellt. Die Systematik kann analog auf alle Konstruktionen und Materialisierungen übertragen und im Detail dem ausführlichen Bericht [1] entnommen werden. Beim Beispiel handelt es sich um den Fachwerkträger aus Stahl für einen Binderabstand von $a = 9\text{ m}$ und eine Auflast von $q_{k,A} = 100\text{ kg/m}^2$.

Grundlagen für die Berechnung der Umweltbelastung (aus „Ökobilanzen im Baubereich 2009/1“) und der Kosten:

Lebensdauer 60 Jahre

Primärstruktur (Fachwerkbinder) aus Stahlprofilen:

Graue Energie 15.70 MJ/kg

Treibhausgasemissionen 0.93 kg/kg

Kosten 3.80 Fr./kg

Sekundärstruktur (Pfetten) aus Stahlprofilen:

Graue Energie 15.70 MJ/kg

Treibhausgasemissionen 0.93 kg/kg

Kosten 3.50 Fr./kg

Tertiärstruktur (Dachhaut) aus Profilblech verzinkt:

Graue Energie 58.30 MJ/kg

Treibhausgasemissionen 3.59 kg/kg

Kosten 5.00 Fr./kg

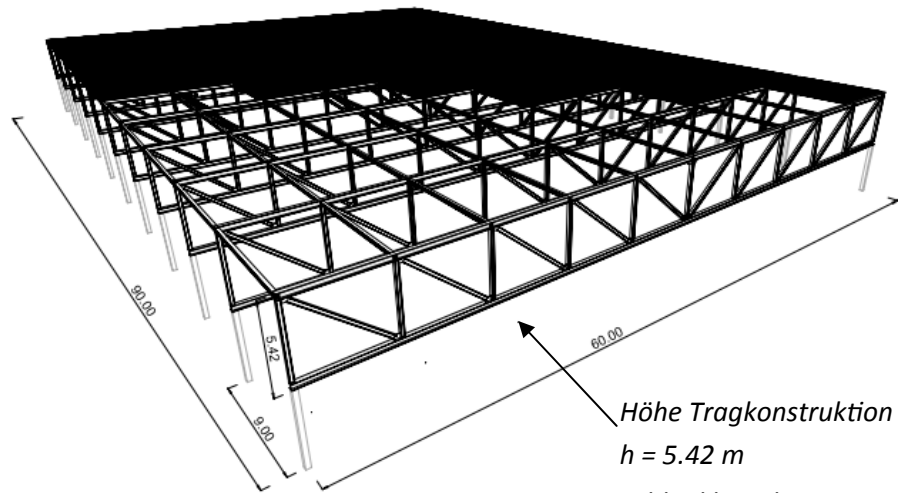
Beschichtung (Pulverbeschichten):

Graue Energie 83.30 MJ/m²

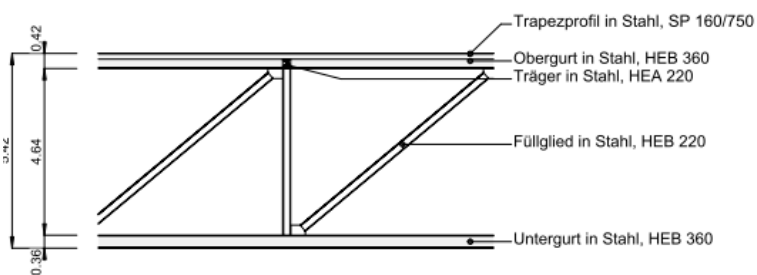
Treibhausgasemissionen 4.57 kg/m²

Kosten 1.50 Fr./m²

Perspektive Tragstruktur



Ansicht Primärstruktur



Ansicht Sekundärstruktur

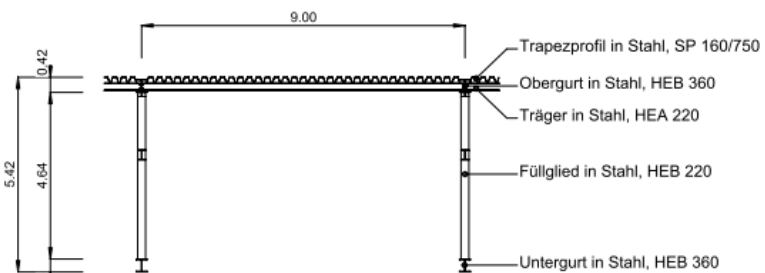


Abb. 3: Fachwerkträger in Stahl, $a = 9\text{ m}$, $q_{k,A} = 100\text{ kg/m}^2$ (leichtes Dach)

Tragwerksteil	Ausmass [kg/m ²]	Graue Energie [MJ/(m ² ·a)]	Treibhausgasemissionen [kg/(m ² ·a)]	Kosten [Fr./(m ² ·a)]
Profile Fachwerkträger	54.10	15.26	0.90	3.45
Profile Sekundärträger	9.25	2.74	0.16	0.55
Profilblech Tertiärträger	11.77	11.44	0.70	0.98
Total	75.12	29.44	1.76	4.97

Tab. 5: Umweltbelastung und Kosten pro m² Dachfläche und Jahr (a)

Ergebnisse - Kosten vs. Graue Energie

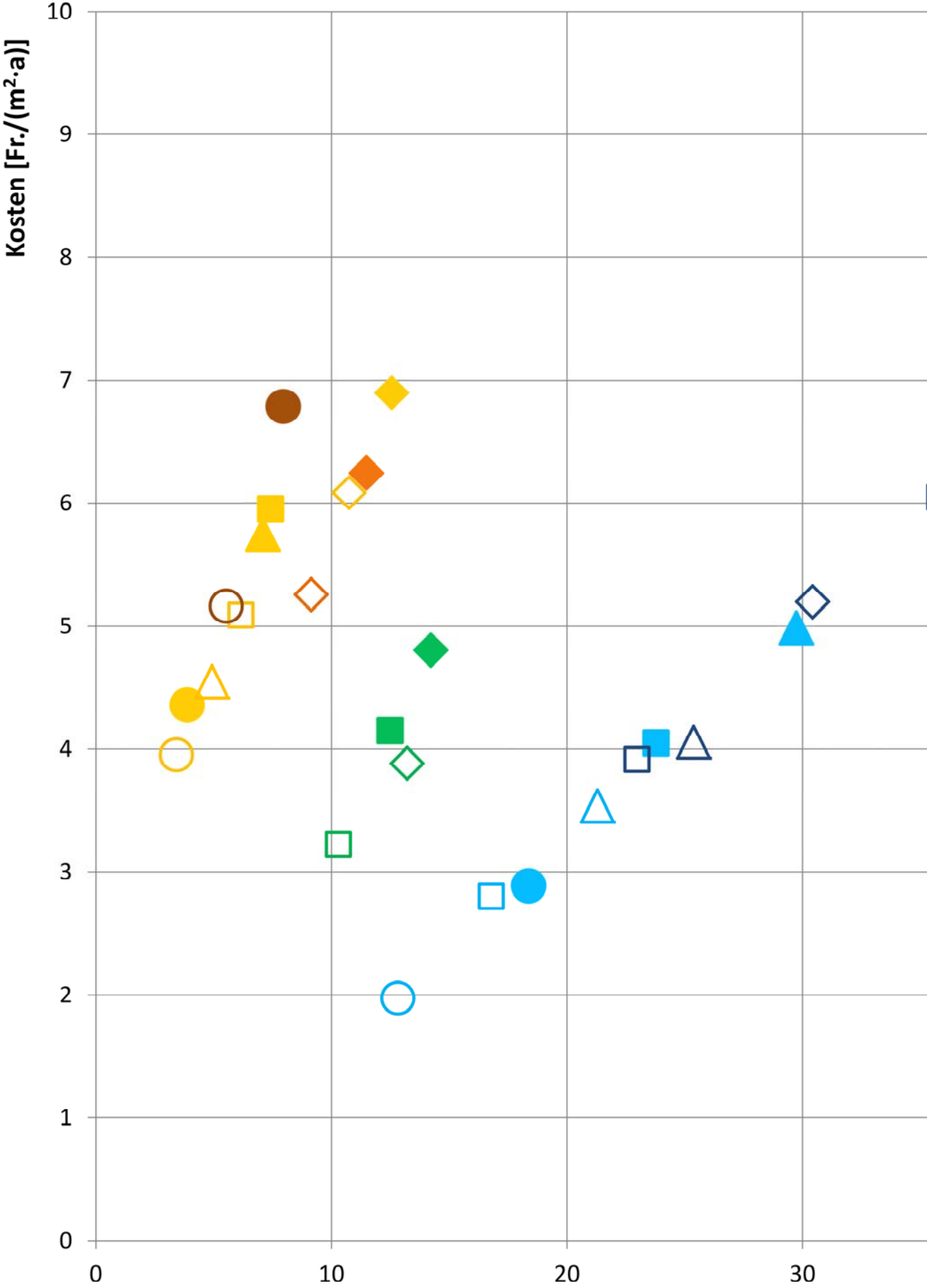
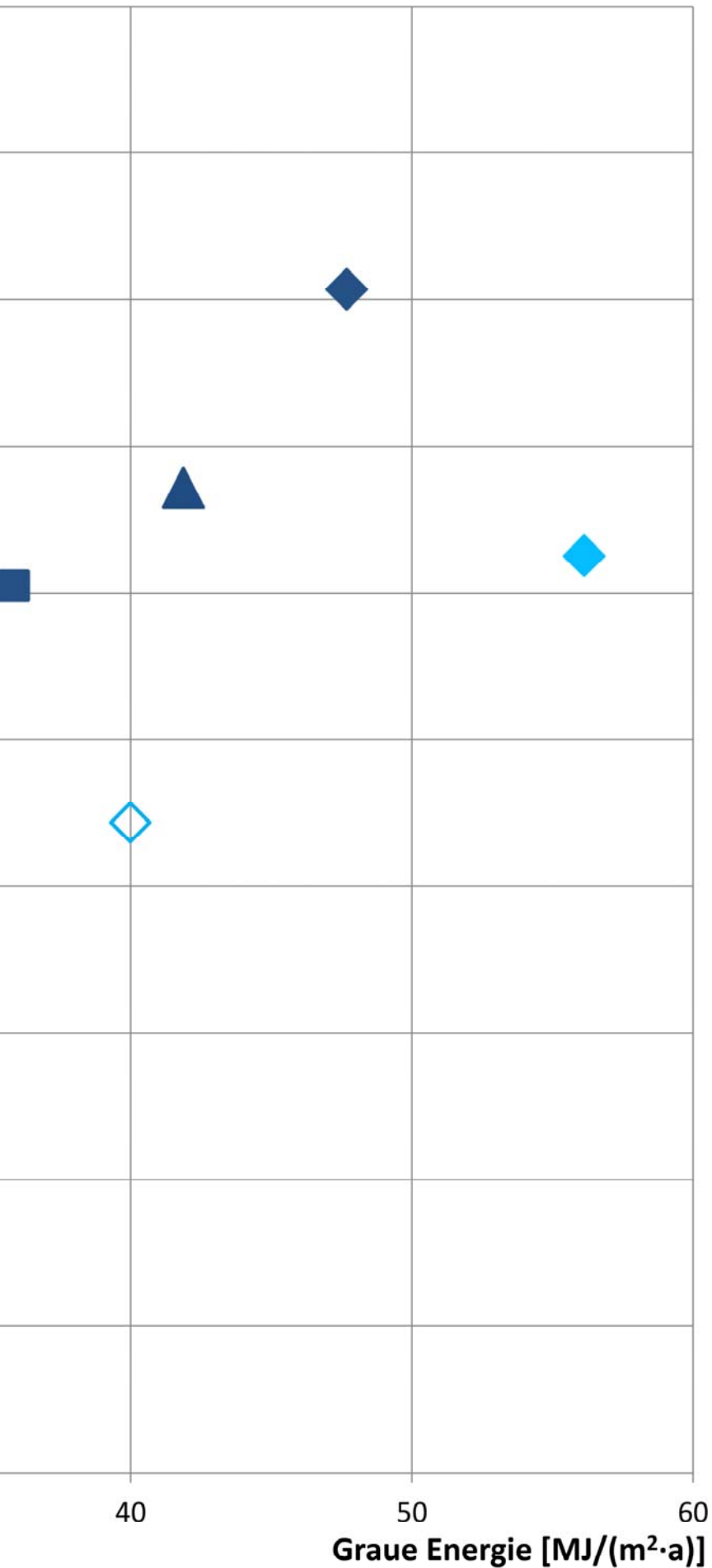


Abb. 4: Kosten vs. Graue Energie



Ergebnisse - Kosten vs. Treibhausgasemissionen

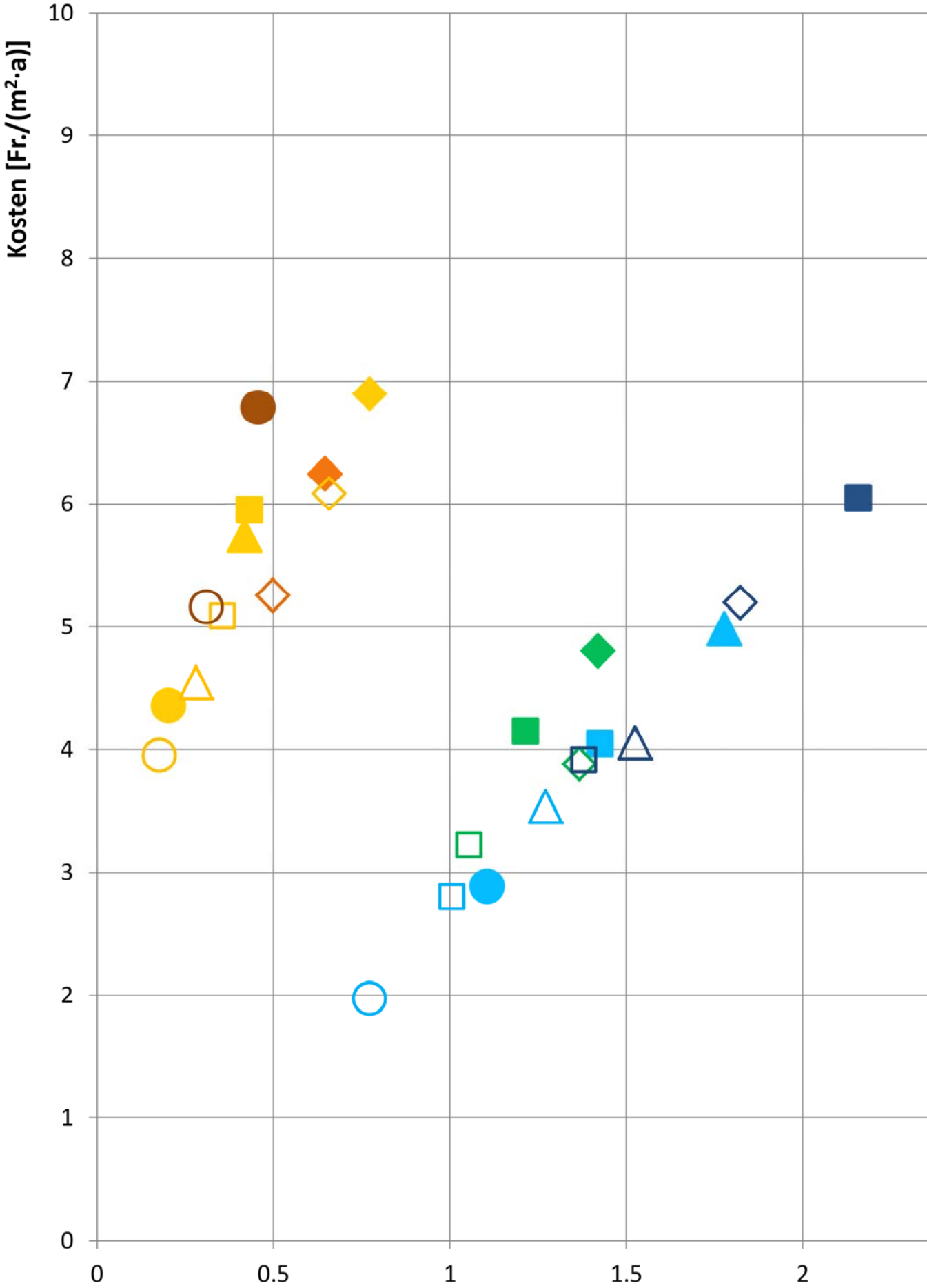
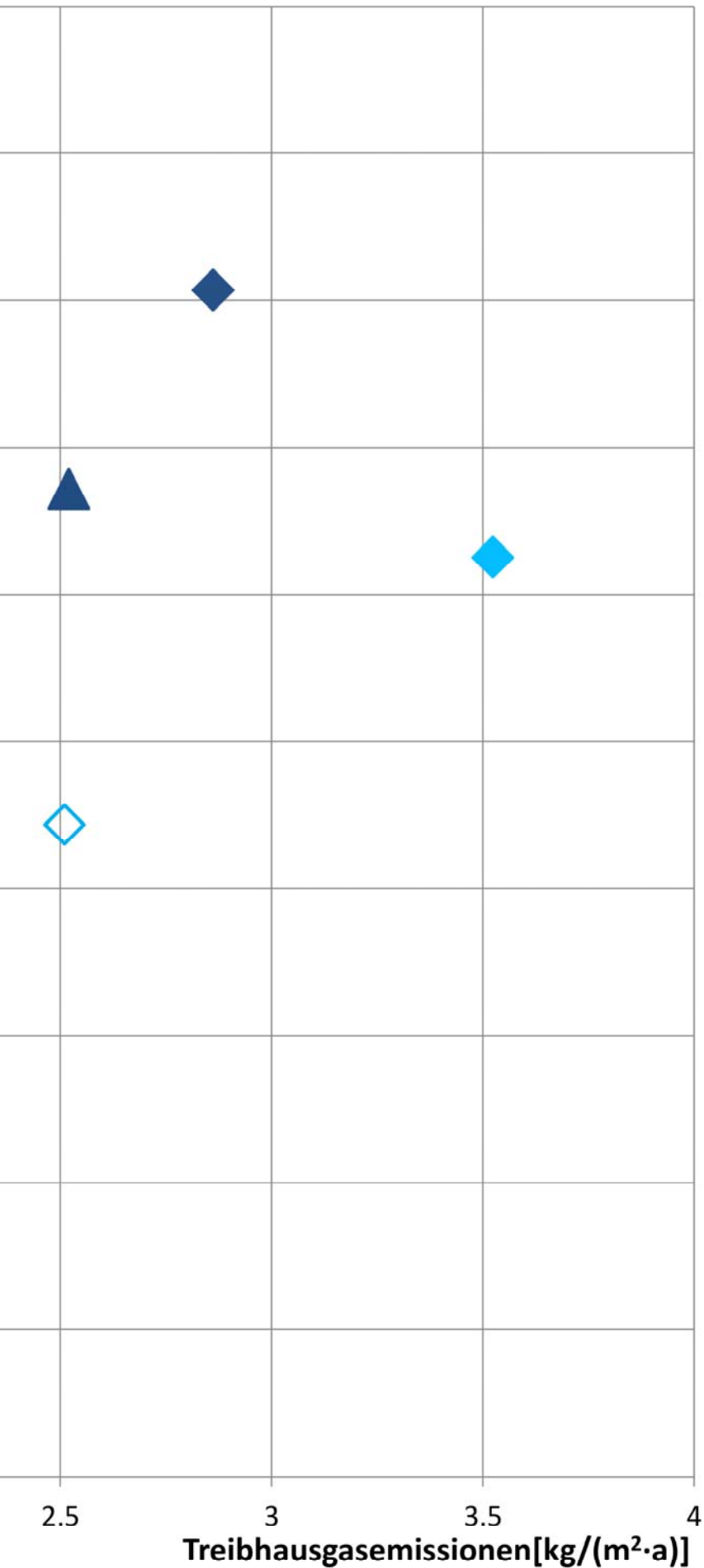


Abb. 5: Kosten vs. Treibhausgasemissionen



Kleine Halle

Schweres Dach

- ◆ Vollwandträger Holz
- ◆ Hohlkastenträger Holz
- ▲ Fachwerkträger Holz
- Unterspannte Holzträger
- Bogenträger Holz
- ◆ Vollwandträger Stahl
- ▲ Fachwerkträger Stahl
- Unterspannte Stahlträger
- Bogenträger Stahl
- ◆ Vollwandträger Beton
- Unterspannte Betonträger

Leichtes Dach

- ◆ Vollwandträger Holz
- ◆ Hohlkastenträger Holz
- ▲ Fachwerkträger Holz
- Unterspannte Holzträger
- Bogenträger Holz
- ◆ Vollwandträger Stahl
- ▲ Fachwerkträger Stahl
- Unterspannte Stahlträger
- Bogenträger Stahl
- ◆ Vollwandträger Beton
- Unterspannte Betonträger

Grosse Halle

Schweres Dach

- Bogenträger Holz (ohne Zugband)
- ◆ Fachwerkträger Stahl
- ▲ Fachwerkträger Stahl 3D
- Unterspannte Stahlträger

Leichtes Dach

- Bogenträger Holz (ohne Zugband)
- ◆ Fachwerkträger Stahl
- ▲ Fachwerkträger Stahl 3D
- Unterspannte Stahlträger

Ergebnisse - Fazit

Die wichtigsten Erkenntnisse aus der Studie zur wirtschaftlichen und ökologischen Nachhaltigkeit von Hallendachkonstruktionen, die in den Abbildungen 4 und 5 graphisch dargestellt sind, werden im Folgenden dargelegt und beschrieben.

- **Dachkonstruktionen aus Holz sind ökologisch nachhaltiger als die Varianten aus Stahl und Beton, aber teurer.** Die Spannbetonlösungen sind bezüglich grauer Energie nur unwesentlich schlechter gestellt als Holz, allerdings um einiges günstiger in der Erstellung. Diese Aussage gilt nicht bezüglich Treibhausgasemissionen, da die Herstellung von Beton sehr grosse Mengen davon verursacht.
- **Für die leichten Dächer sinken sowohl die Kosten als auch die Umweltbelastung pro Quadratmeter Dachfläche, da Material eingespart werden kann.** Die Relationen der Kosten sowie der Umweltbelastung zwischen den verschiedenen Varianten sind für das schwere und leichte Dach in etwa gleich.
- **Bei Verwendung von Vorspannung, sei es im Beton oder als externe Unterspannung, kann die graue Energie stark reduziert werden.** Vorspannung ist somit ökologisch sehr effizient und auch die Kosten können reduziert werden. Die energetischen Werte für Vorspannung sind aus Mangel an Literaturwerten gleich denjenigen für Bewehrung gesetzt.
- **Ein Vollwandträger aus Stahl ist für Hallendächer mit so grossen Spannweiten weder wirtschaftlich noch ökologisch effizient.**
- **Die Bogentragwerke sind für alle untersuchten Baustoffe sehr effizient, da viel Material eingespart werden kann.** Voraussetzung ist, dass der Horizontalschub über ein Zugband abgetragen werden kann (z.B. ein Zugstab, Dach, Bodenplatte).
- Für die kleine Halle ist das Stahlfachwerk schlechter gestellt als die unterspannte Konstruktion. Bei Holz verhält es sich genau andersherum, da das Fachwerk nur aus Holz und die unterspannte Konstruktion aus Holz und Spannstahl besteht.
- **Für die grosse Halle eignet sich vor allem Stahl als Material, in Form von einem Fachwerk oder unterspannten Träger. Ein Holzbogen ist ebenfalls eine wirtschaftliche und sehr ökologische Lösung.** Voraussetzung dafür ist, dass die Horizontalkräfte in den festen Bau oder in den Untergrund eingeleitet werden können und nicht eine Unterspannung aus Stahl erstellt werden muss. Ein Fachwerk aus Holz wird nicht untersucht, da die einzuleitenden Knotenkräfte zu gross werden und diese somit in Holz nicht mehr ausführbar sind. Beton kann in diesen Abmessungen nicht vorfabriziert werden. Auch die Betonierung auf der Baustelle kommt aus schaltechnischen Gründen nicht in Frage.
- **Für die grosse Halle ist die unterspannte Stahlkonstruktion dem einfachen Fachwerk ökologisch und kostenmässig überlegen,** da eine Unterspannung sehr effizient ist. Das dreidimensionale Fachwerk kommt der Unterspannung aber bei der untersuchten Spannweite von 60 m sehr nahe. Das liegt daran, dass durch das dreidimensionale System viel Material, auch bei der Sekundärstruktur, eingespart werden kann.
- **Die grosse Halle ist materialintensiver und somit schlechter für Kosten und Umwelt.** Das liegt daran, dass das Stützenraster grösser ist und somit die Struktur pro Quadratmeter mehr Lasten tragen muss. Ausserdem vergrössert sich die Spannweite der Sekundärstruktur zugunsten eines angemessenen Abstandes der Primärstruktur.

Schlussbemerkungen und Ausblick

Dieser Bericht bildet eine Grundlage zur Beurteilung der ökologischen und wirtschaftlichen Nachhaltigkeit von Hallendachkonstruktionen. Mit Hilfe der Diagramme kann abgeschätzt werden, mit welchen Materialien und statischen Systemen welche Ziele am besten erreicht werden. Neben der Kurzfassung gibt es auch einen ausführlichen Bericht [1], in dem jede einzelne, untersuchte Variante beschrieben und die Berechnungen tabelliert sind. Dieser Bericht ist auf der Homepage des AHB abrufbar (siehe weiterführende Informationen, S.18).

In den Tabellen im ausführlichen Bericht [1] wird jeweils unterschieden zwischen Primär-, Sekundär- und Tertiärstruktur. Das ist wichtig, da die Sekundärstruktur je nach Wahl des Abstandes der Primärstruktur verschieden effizient sein kann und somit der Einfluss auf Kosten und Ökologie stark variieren kann. Es kann damit auch berechnet werden, wie sich etwa eine Mischung von Materialien (z.B. ein Stahltragwerk mit Dachhaut aus Holz) auf die untersuchten Kriterien auswirkt.

Die hier und im ausführlichen Bericht hergeleiteten Zahlen sollen nicht als genau betrachtet werden. Wenn in einer fortgeschrittenen Projektphase die graue Energie bzw. die Treibhausgasemissionen untersucht werden müssen, ist eine detaillierte Analyse vorzunehmen. Denn je mehr zu wählende Randbedingungen ein statisches System voraussetzt, desto unterschiedlicher sind die Lösungen von verschiedenen Planern. Das heisst, dass die Werte für einfache Systeme wie einen Vollwandträger bei verschiedenen Ingenieuren näher zusammen liegen, als bei komplizierteren Systemen wie der unterspannten Konstruktion aus verschiedenen Materialien. Eine Optimierung mit Hauptaugenmerk auf die untersuchten Kriterien kann Aufschluss darüber geben, bei welchen geometrischen Randbedingungen das Verhältnis von Kosten zu Umweltbelastung am besten ist. Dieses Dokument bildet eine Grundlage zur Beurteilung verschiedener statischer Systeme, es ersetzt aber nicht die genaue Nachrechnung der geschätzten Kosten und Auswirkungen auf die graue Energie und die Treibhausgasemissionen in einer späteren Projektphase, wenn dies gewünscht ist.

Bezüglich ökologischer Nachhaltigkeit sind in der Studie die graue Energie und die entstehenden Treibhausgasemissionen einkalkuliert worden, nicht aber andere Auswirkungen auf die Umwelt, also zum Beispiel negative Einflüsse des Ressourcenabbaus im Herkunftsland.

Für eine ganzheitliche Betrachtung der Kosten und Umweltbelastung einer Hallendachkonstruktion müssen für eine genauere Analyse weitere Faktoren beachtet werden, die nicht Teil dieser Studie sind. So ist zum Beispiel nicht ausser Acht zu lassen, dass verschiedene Konstruktionen unterschiedliche Horizontalaussteifungssysteme erfordern, oder dass grössere Binderabstände und Konstruktionshöhen Mehrkosten und zusätzlichen Materialaufwand für die Fassadenkonstruktion verursachen.

Grundlagen und weiterführende Informationen

Verwendete Grundlagen

- Merkblatt SIA 2032:2010 «Graue Energie von Gebäuden»
- Empfehlung «Ökobilanzen im Baubereich, 2009/1, Stand Januar 2011» des KBOB, eco-bau, IPB, www.kbob.ch
- Althaus H.-J., Lehmann M. (2010). Ökologische Baustoffliste (v2.2e), Empa Abteilung Technologie und Gesellschaft, Dübendorf, 2010, www.empa.ch/baustoffliste
- Preisbasis: Die Einheitspreise für die verwendeten Materialien, die zur Berechnung herangezogen werden, sind in der folgenden Tabelle 6 aufgelistet:

Material	Kosten [Fr./kg]
Brettschichtholz für Rechteckquerschnitt	2.80
Furniersperrholz für Stege Hohlkastenträger	4.00
Brettschichtholz für Fachwerk	4.00
Brettschichtholz für unterspannte Konstruktion	3.50
Massivholz (Hohlkastenelemente für Dachabschluss)	4.50
Stahlblech, blank für Vollwandträger	3.50
Stahlprofil, blank für Pfetten	3.50
Stahlprofil blank für Fachwerk/Bogenträger	3.80
Stahlblech verzinkt (Profilblech für Dachabschluss)	5.00
Pulverbeschichtung (Fr./m ²)	1.50
Beton	0.22
Bewehrung schlaff	2.28
Spannstahl (auch für Unterspannung)	12.65

Tab. 6: Einheitspreise für die verwendeten Materialien [Fr./kg]

Weiterführende Informationen

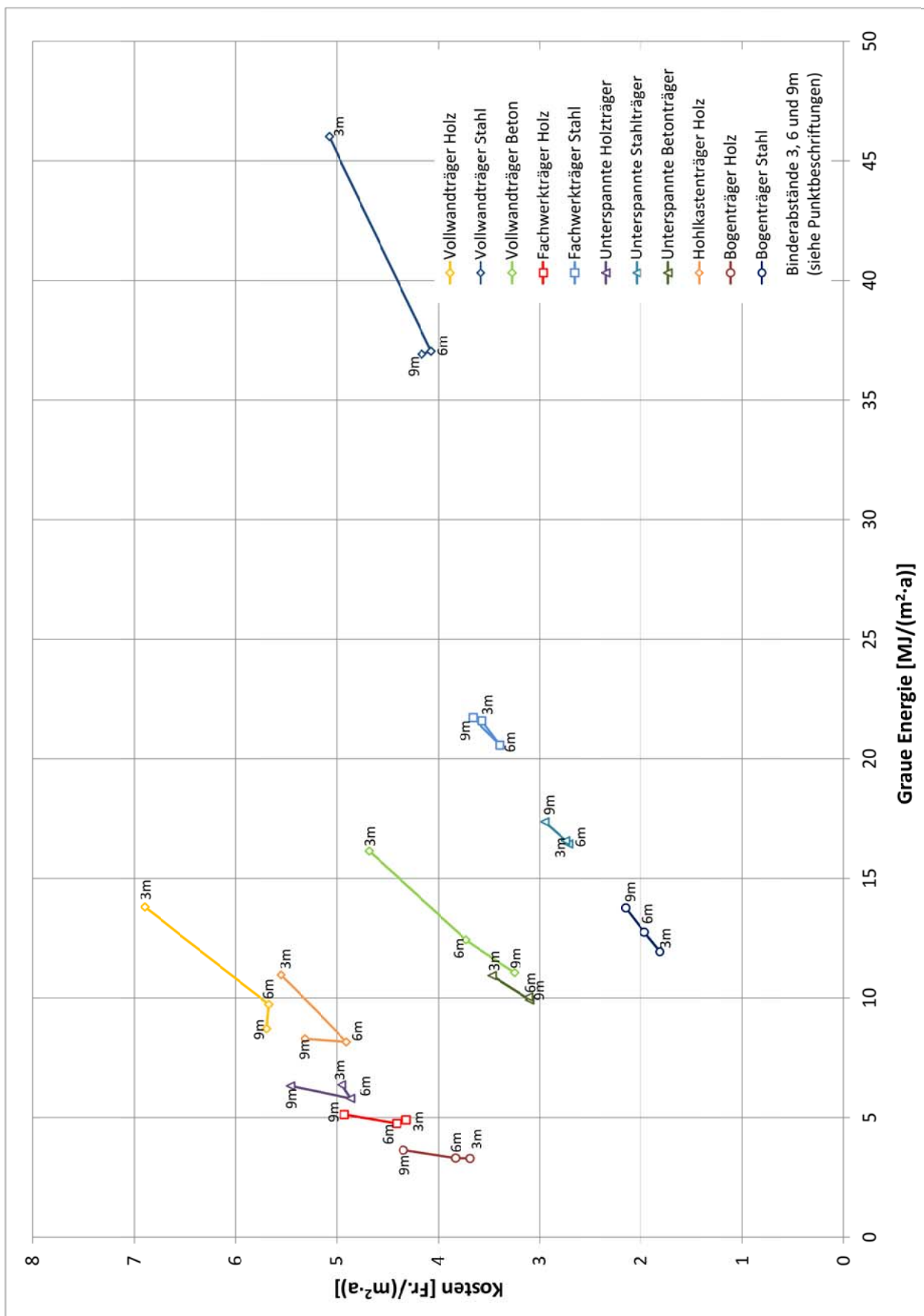
- [1] Patt, B., Beck, A. (2012); Graue Energie von Hallendächern - Studienauftrag, Ausführlicher Bericht, Verfügbar unter www.stadt-zuerich.ch/nachhaltiges-bauen → Fachinformationen → Baustoffe

Anhang

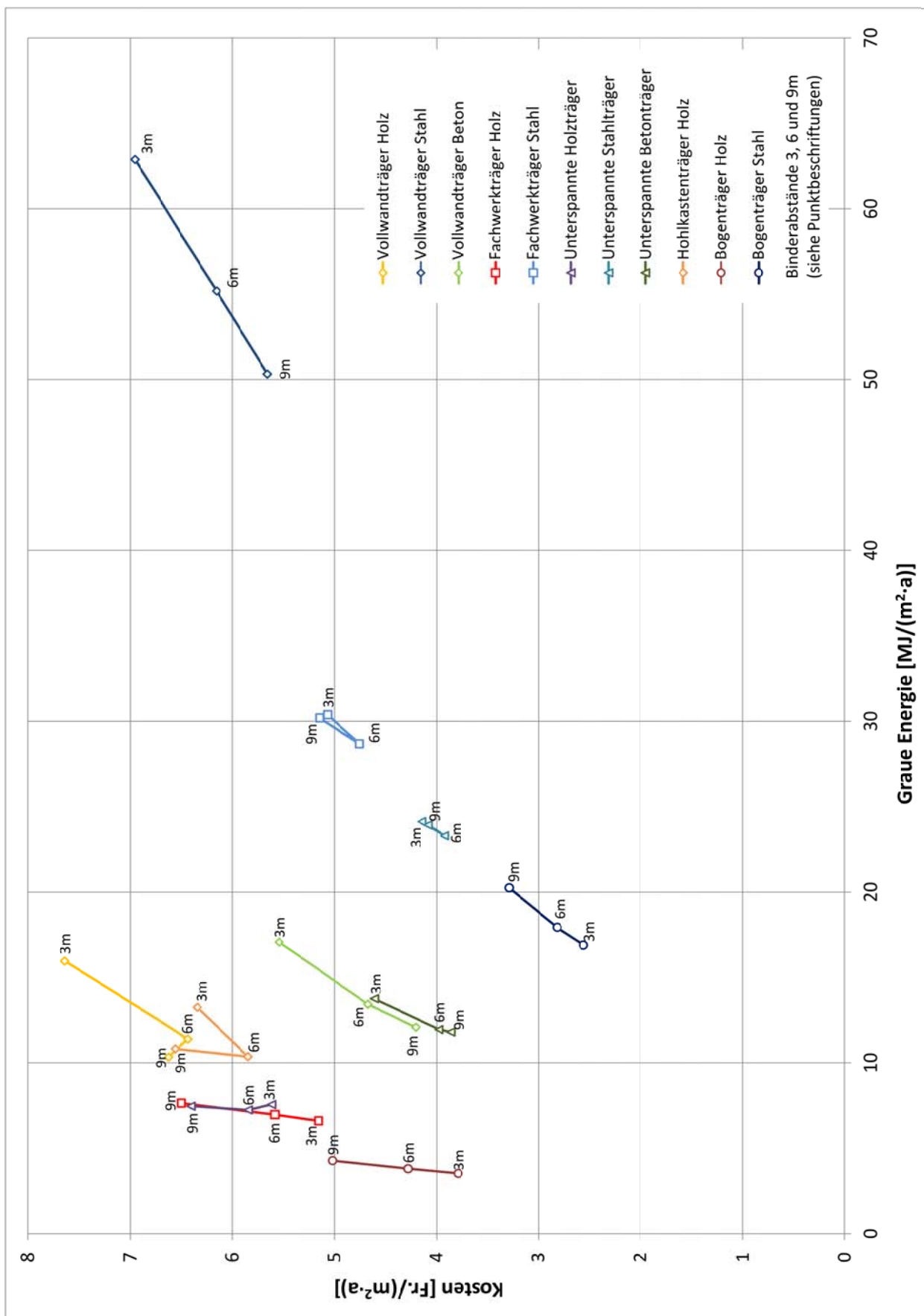
Auf den nachfolgenden Seiten sind die Ergebnisse der Studie auf insgesamt 8 Diagrammen dargestellt. Während die Diagramme auf den Seiten 12-15 sowohl die kleine als auch die grosse Halle sowie den leichten und schweren Dachaufbau auf einmal enthalten, wird in den angehängten Diagrammen differenziert. Aus diesen Diagrammen ist zudem ersichtlich, wie sich unterschiedliche Binderabstände (3.00, 6.00, 9.00 m für die kleine und 9.00, 15.00 m für die grosse Halle) auf die Kosten sowie die Umweltbelastung auswirken. Diese Diagramme sind vor allem dann hilfreich, wenn die Grösse der Halle und der Dachaufbau bereits bekannt sind. Sie sind in folgender Reihenfolge angehängt:

- A.1. Kleine Halle, Leichtes Dach - Kosten vs. Graue Energie
- A.2. Kleine Halle, Schweres Dach - Kosten vs. Graue Energie
- A.3. Grosse Halle, Leichtes Dach - Kosten vs. Graue Energie
- A.4. Grosse Halle, Schweres Dach - Kosten vs. Graue Energie
- A.5. Kleine Halle, Leichtes Dach - Kosten vs. Treibhausgasemissionen
- A.6. Kleine Halle, Schweres Dach - Kosten vs. Treibhausgasemissionen
- A.7. Grosse Halle, Leichtes Dach - Kosten vs. Treibhausgasemissionen
- A.8. Grosse Halle, Schweres Dach - Kosten vs. Treibhausgasemissionen

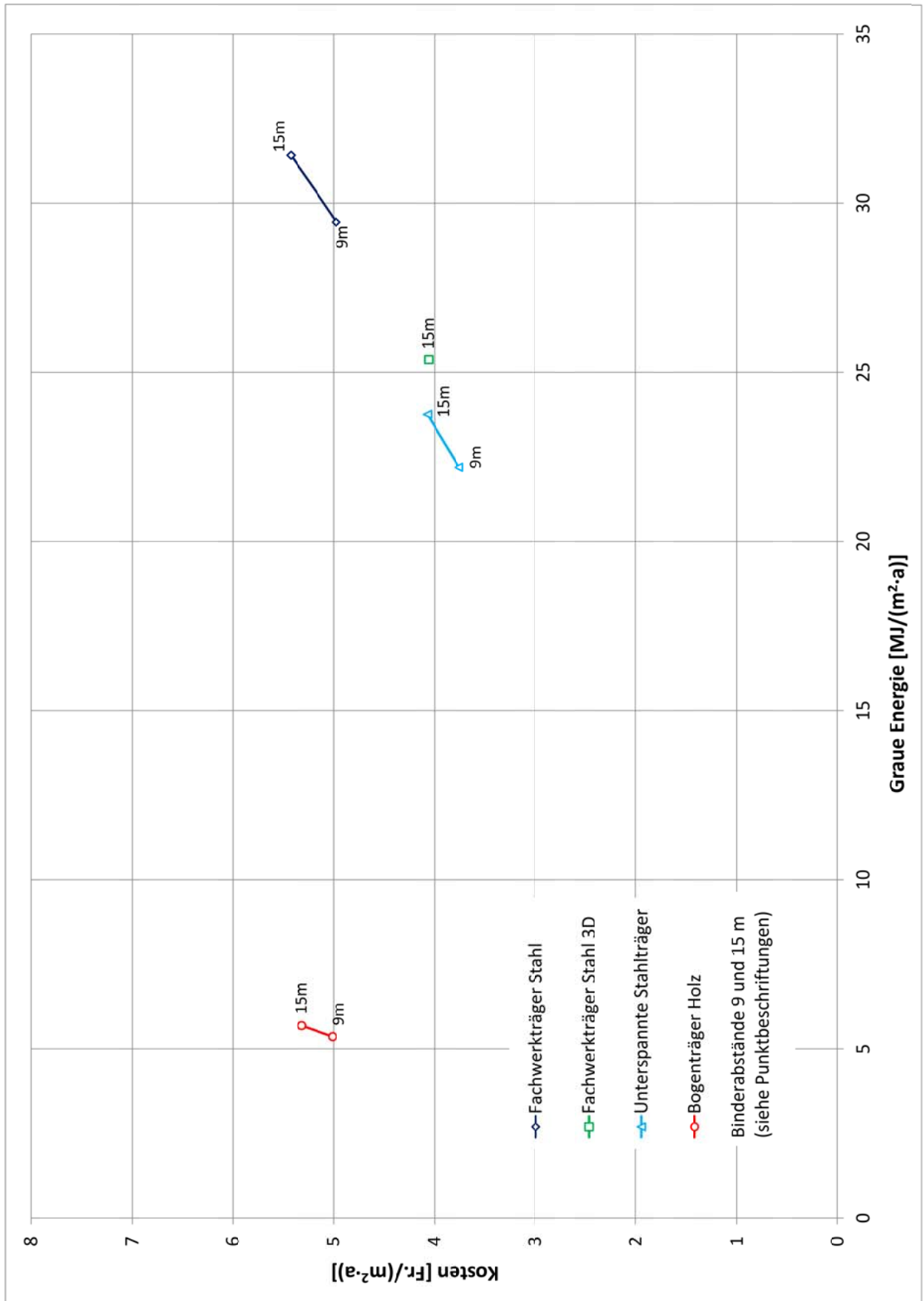
A.1. Kleine Halle, Leichtes Dach - Kosten vs. Graue Energie



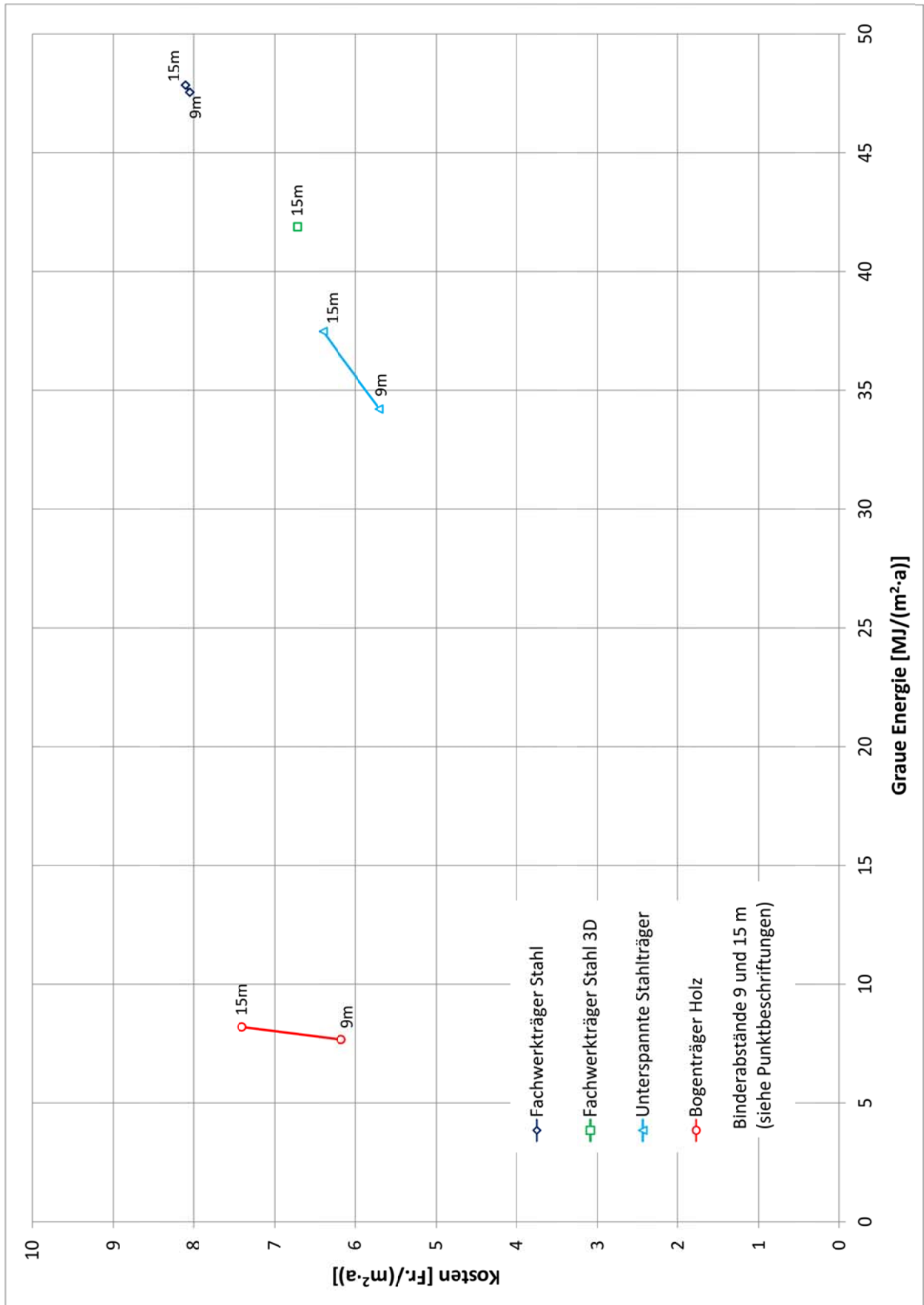
A.2. Kleine Halle, Schweres Dach - Kosten vs. Graue Energie



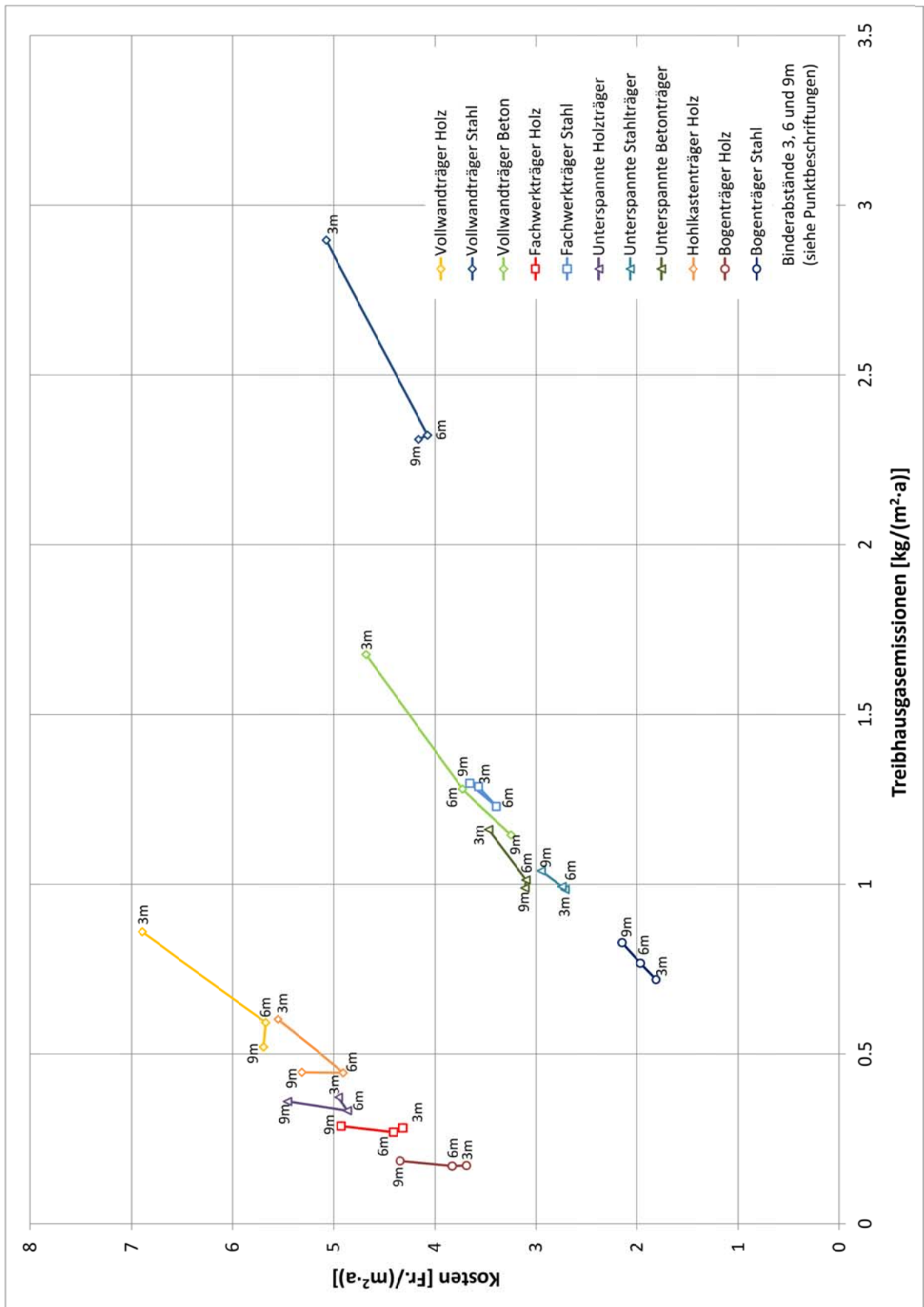
A.3. Grosse Halle, Leichtes Dach - Kosten vs. Graue Energie



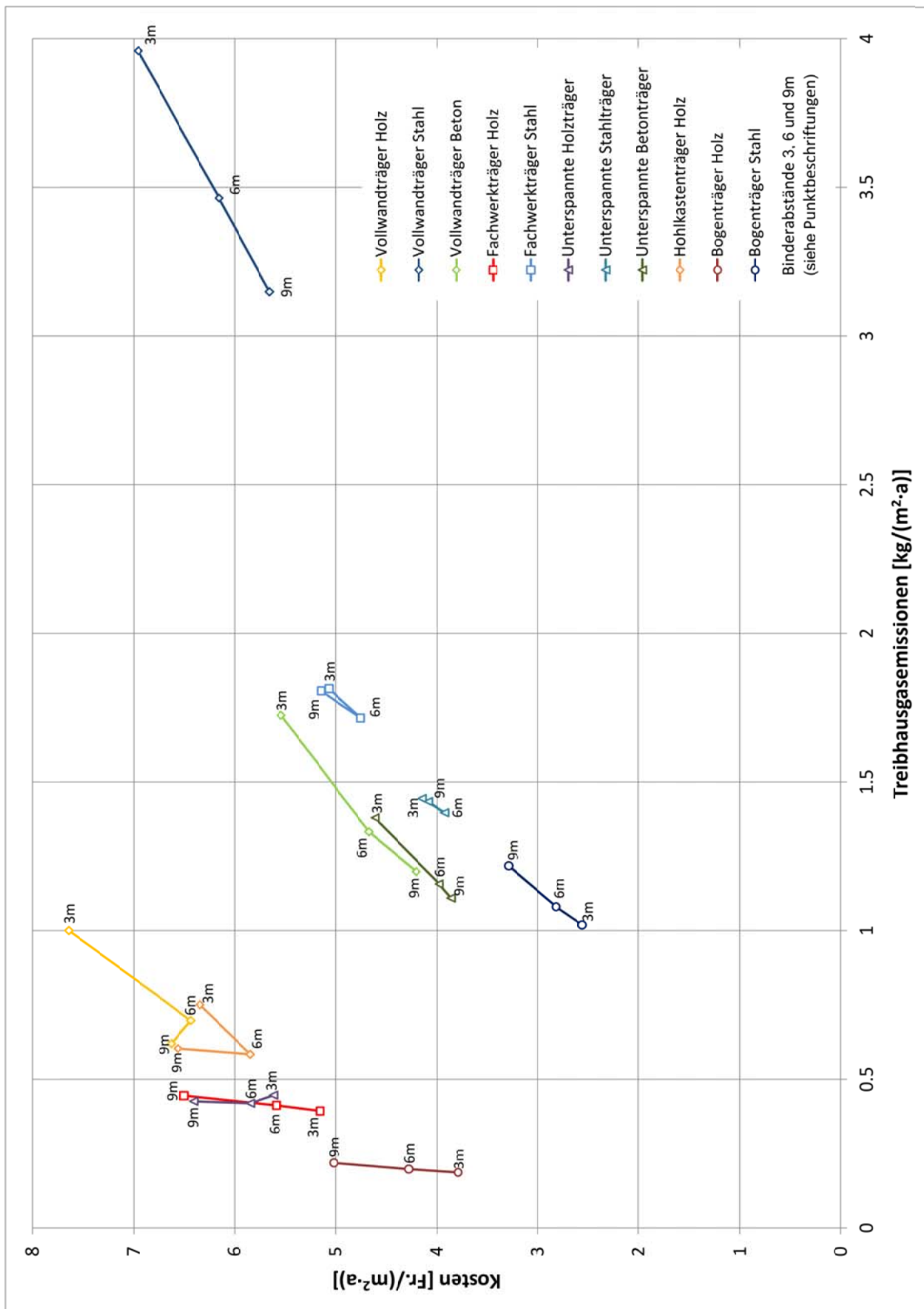
A.4. Grosse Halle, Schweres Dach - Kosten vs. Graue Energie



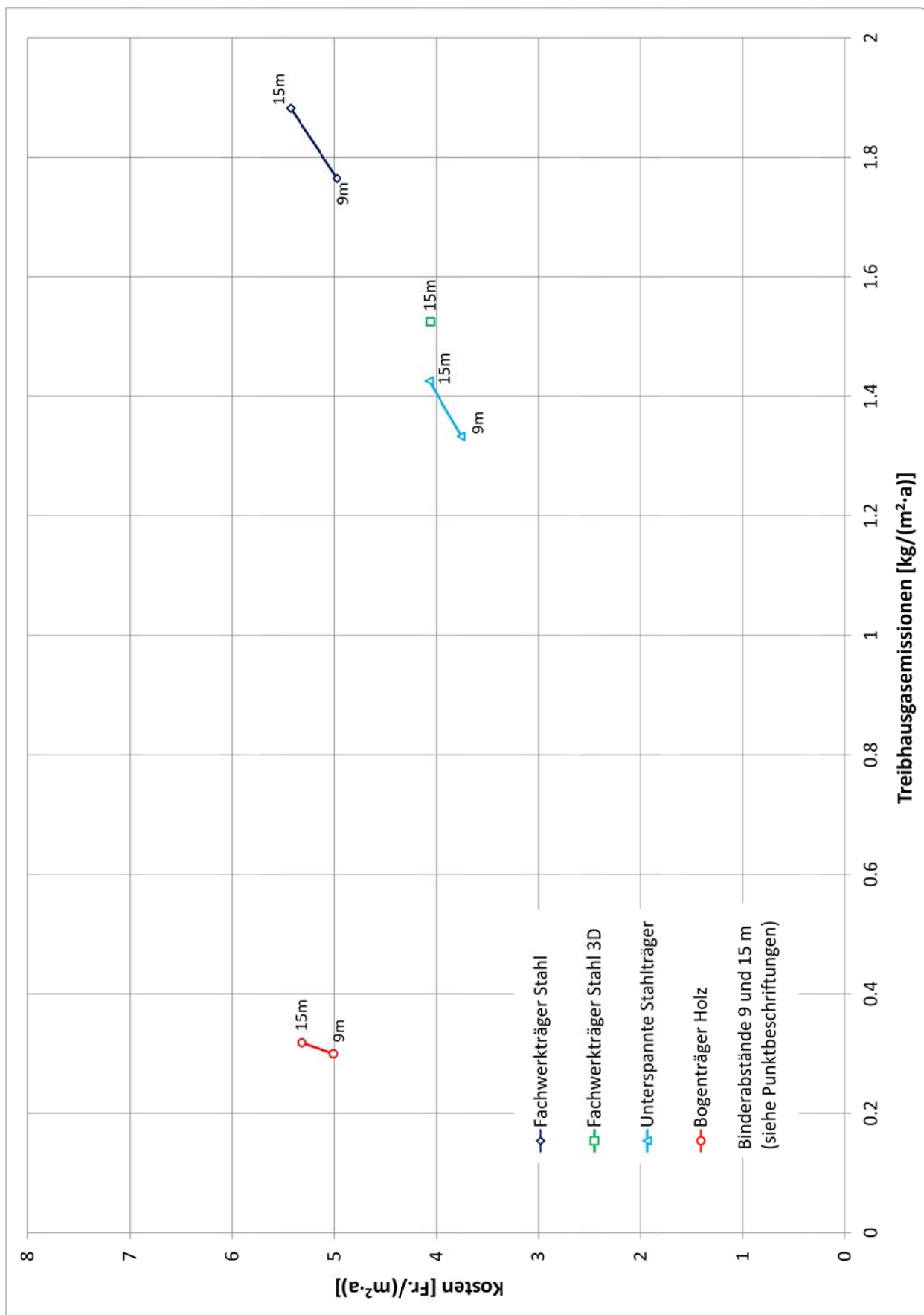
A.5. Kleine Halle, Leichtes Dach - Kosten vs. Treibhausgasemissionen



A.6. Kleine Halle, Schweres Dach - Kosten vs. Treibhausgasemissionen



A.7. Grosse Halle, Leichtes Dach - Kosten vs. Treibhausgasemissionen



A.8. Grosse Halle, Schweres Dach - Kosten vs. Treibhausgasemissionen

