



NTNU – Trondheim
Norwegian University of
Science and Technology

Investigating the "CO₂-premium" for Building Height

Egil Karoliussen Ytrehus

Civil and Environmental Engineering

Submission date: Januar 2015

Supervisor: Rolf André Bohne, BAT

Norwegian University of Science and Technology
Department of Civil and Transport Engineering



Oppgavens tittel: Investigating the "CO ₂ -premium" for Building Height	Dato: 25.01.2015		
	Antall sider (inkl. bilag): 65		
	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave
Navn: Egil Ytrehus			
Faglærer/veileder: Rolf André Bohne			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere:			

Extract:

Increased building heights entail greater structural loads, requiring increased material use. On this basis, literature has described a “premium” for building height consisting of additional material quantity, embodied energy, and/or embodied carbon. This thesis examines a so-called “CO₂-premium”; that is increased material greenhouse gas (GHG) emissions per square meter floor area with increasing building heights.

The scope of this thesis is cradle-to-(factory)gate, limited to building structural systems. Heights of three to 70 stories are assessed, as are several structural systems. The calculation was based upon two main sets of factors. Material quantity data of building structures was combined with material GHG emission factors. Material emission factors were treated as a proxy for production conditions. The material quantity data was based upon literature sources.

The results oppose the idea of a ubiquitous CO₂-premium for height. The premium appears to be non-existent for the buildings up to 12 stories. The 20 story buildings may be heightened up to 30 stories with a negligible premium per story. For taller buildings, the premium is highly dependent upon structural solutions, material choices, and material emission factors.

Less favourable material emission scenarios evoke increased premiums. The premium is small for all structural material alternatives in a renewable, low-emission scenario. Excepting the best-case emission scenario, the steel structural alternative performs worse than the reinforced concrete structural alternatives for all building heights.

Stikkord:

1. CO ₂ -premium for height
2. Product stage emissions
3. Building height
4. Structural systems

Forord

Dette er en artikkel-basert masteroppgave. Det vil si at masteroppgaven innbefatter en vitenskapelig artikkel, og at et sentralt mål ved masterarbeidet var å utarbeide denne artikkelen.

Masteroppgaven er delt i to deler. Første del består av artikkelen «Investigating the "CO₂-premium" for building height». Andre del består av en prosessrapport som beskriver studien som er utført og prosessen med å utarbeide artikkelen. Prosessrapporten er skrevet på norsk. Artikkelen er skrevet på engelsk da den er myntet på internasjonal publikasjon. Artikkelen følger retningslinjer for form fra *Journal of Building Research and Information* da artikkelen er utformet for publisering i dette tidsskriftet. Leseren anbefales å lese oppgaven som den er oppbygd: først Del I: Artikkel, deretter Del II: Prosessrapport.

Denne masteroppgaven tilsvarer 30 studiepoeng, og er avsluttende oppgave i hovedprofil Bygnings- og materialteknikk, Institutt for bygg, anlegg og transport ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet NTNU).

Rolf André Bohne har vært hovedveileder for denne masteroppgaven, og er medforfatter av artikkelen. Jardar Lohne gitt veiledning og deltatt i arbeidet med utformingen av artikkelen, og er også medforfatter av artikkelen.

Abstract

Increased building heights entail greater structural loads, requiring increased material use. On this basis, literature has described a “premium” for building height consisting of additional material quantity, embodied energy, and/or embodied carbon. This thesis examines a so-called “CO₂-premium” for building heights; that is increased material greenhouse gas (GHG) emissions per square meter floor area with increasing building heights.

The scope of the study is cradle-to-(factory)gate, limited to building structural systems. Transportation of materials to construction site, the construction process, and the building foundations are defined outside the system boarder. The calculation was based on two main sets of factors. Material quantity data of building structures was combined with material GHG emission factors, estimating material GHG emissions of building structural systems. Both factors are variables in the calculations. Material quantity data vary by building height and structural alternative. Material emission factors vary by material production conditions and technology, represented by material emission scenarios.

Heights of three to 70 stories are assessed, as are several structural systems. For building heights of three to 12 stories the structural system is a flat-slab, cast-in-place, shearwall framed, reinforced concrete (RC) structure. For building heights of 20 to 70 stories the structural system is based upon a central core, and a rigid frame. A RC central core is a constant, while three different flooring and frame alternatives are evaluated; a steel-based column/beam frame with steel-concrete flooring; a RC-based structure of concrete columns and flat-slab flooring; a RC-based column/beam frame combined with a lightweight RC flooring system. The material quantity data used in the calculations is based upon literature sources.

The material emission factors utilized in the calculations are reflections of the chosen system boarder; a cradle-to-(factory)gate perspective, i.e. product stage emission factors. Three material emission scenarios are assessed; a reference scenario, a best-case scenario, and a worst-case scenario. The scenarios represent technological aspects and production conditions – and European conditions.

The results oppose the idea of a ubiquitous CO₂-premium for height. The premium appears to be non-existent for the buildings up to 12 stories. The 20 story buildings may be heightened up to 30 stories with a negligible premium per story. For taller buildings, the premium is highly dependent upon structural solutions, material choices, and material emission factors.

Less favourable material emission scenarios evoke increased premiums. The premium is small for all structural material alternatives in a renewable, low-emission scenario. Excepting the best-case emission scenario, the steel structural alternative performs worse than the RC structural alternatives for all building heights. The lightweight RC structural alternative performs worse than the ordinary RC structural alternative.

Concerning material GHG emissions of building structural systems, the results reveal that the CO₂-premium for height is small or negligible if the best practice structural solutions and best practice material choice solutions are followed.

Sammendrag

Om antall etasjer i et bygg økes må bæresystemet i bygget dimensjoneres for økte laster. Høyere bygg krever derfor økt materialbruk hva angår bæresystemet. I litteraturen er det på dette grunnlag beskrevet en «premie» for å bygge høyt. En premie bestående av økte materialmengder, økt innebygget energi, og/eller økte klimagassutslipp. I denne oppgaven undersøkes en såkalt «CO₂-premie» for å bygge høyt; økte klimagassutslipp fra bæresystemers materialbruk ved økte bygningshøyder.

Opgavens omfang er begrenset til bæresystemers materialbruk med perspektivet vugge-til-(fabrikk)port. Transport av materialer til byggeplass, konstruksjonsprosessen og fundamenter er ikke inkludert. Kalkulasjonen av klimagassutslipp fra bæresystemers materialbruk baseres på to hovedfaktorer; materialdata for bygningers bæresystem og bygningsmaterialers utslippsfaktorer. Begge disse hovedfaktorene er variabler i kalkulasjonen. Materialdata avhenger av bygningshøyder og strukturelt system. Utslippsfaktorer avhenger av produksjonsforhold og teknologi, representert ved utslippssenarioer.

Opgavens omfang dekker bygningshøyder fra tre til 70 etasjer. Flere typer bæresystemer er vurdert. Fra tre til 12 etasjer vurderes et bjelke/søyle-system av plass-støpt armert betong, med flatdekke og skjærvegger. Fra 20 til 70 etasjer vurderes et bæresystem med en sentral kjerne av armert betong og en momentstiv ramme. Oppgaven omfatter tre ulike alternativer for dette bæresystemet; et stål-basert søyle/bjelke-system med kombinert stål-betong dekke; et bæresystem med søyler og flatdekke av armert betong; et bæresystem med søyler og bjelker av armert betong med lettvekt betongdekke. Materialdataen som benyttes i kalkulasjonene er basert på litterære kilder. Utslippsfaktorene som anvendes i kalkulasjonen reflekter systemgrensene; vugge-til-(fabrikk)port. De omfatter dermed kun materialfasen (/produktfasen). Utslippsfaktorene konstituerer tre scenarier; ett referansesenario, ett lavutslippssenario, og et høyutslippssenario. Scenariene representerer teknologiske aspekter og produksjonsforhold – ved europeiske forhold.

Resultatene indikerer ingen ubikvitær CO₂-premie for bygningshøyde. For bygninger opp til 12 etasjer synes det ikke å foreligge noen premie for å bygge høyere. For bygningene med 20 til 30 etasjer synes premien å være neglisjerbar. For bygg høyere enn 30 etasjer er premiens størrelse svært avhengig av type bæresystem, materialvalg, og utslippssenario. Mindre gunstige utslippssenarioer resulterte i større premier for bygningshøyde. Lavutslippssenarioet medførte gjennomgående lave premier for alle typer bæresystemer. Sett bort ifra lavutslippssenarioet medførte det stål-baserte bæresystemet økte klimagassutslipp sammenlignet med bæresystemene av armert betong for alle bygningshøyder. Bæresystemet med lettvekt betongdekke medførte økte klimagassutslipp sammenlignet med det ordinære bæresystemet av armert betong med flatdekke.

Vedrørende klimagassutslipp fra bæresystemers materialbruk, indikerer resultatene at CO₂-premie for bygningshøyde er liten eller neglisjerbar om optimale strukturelle løsninger, bæresystem og materialvalg, velges.

Innholdsfortegnelse

Forord	ii
Abstract	iii
Sammendrag	iv
Del I: Artikkel.....	1
Abstract.....	3
Introduction	4
Theoretical framework	6
Building life cycle environmental impacts	6
Terminology.....	6
Literature.....	7
Method.....	10
System boundaries and scope	10
Calculation model	10
Material quantity data	11
Material emission factors	13
Results	17
Discussion.....	20
Material GHG emissions of the building structures	20
The “CO ₂ -premium” for building height	21
The method	21
The importance of the trends	22
Conclusions	23
References	24
Del II: Prosessrapport.....	29
1. Innledning	30
1.1 Temabakgrunn	30
1.2 Problemstilling.....	31
2. Rammer for studien	33
2.1 Teori.....	33
2.2 Litteraturstudien	34
2.3 Omfangsbegrensning	35
2.4 Datainnsamling	36

2.5 Beregningsprosessen.....	38
2.6 Resultatenes troverdighet.....	38
3. Valg- og beslutningsprosessen underveis.....	40
3.1 Utarbeidelse av problemstilling og mål	40
3.2 Metodiske beslutninger	41
3.3 Fastsettelse av utslippsfaktorer	41
4. Litteratur som ikke ble benyttet i den vitenskapelige artikkelen.....	45
5. Utdypet diskusjon	48
6. Anbefaling om videre arbeid	50
7. Arbeidsfordeling.....	51
Referanser.....	52

Figur- og tabellister

Del I: Artikkel

Figure 1: Building life cycle stages.....	6
Figure 2: Building structure material GHG emissions relative to building height.	17
Figure 3: Material GHG emissions per structural component	18
Figure 4: Additional GHG emission per extra story	19
Table 1: Constant specifications of the three, seven and 12 story building structure	11
Table 2: Material quantity data of the three, seven and 12 story buildings	12
Table 3: Structural alternatives, 20 to 70 stories	12
Table 4: Material quantity data of the 20-70 story buildings	13
Table 5: Material GHG emission factors, per scenario.....	14

Del II: Prosessrapport

Figur A: Bygningers livsløpsfaser.....	33
Tabell A: Utslippsfaktorer for konstruksjonsstål fra litteraturen.	42
Tabell B: Utslippsfaktorer for betong fra litteraturen	43
Tabell C: Utslippsberegninger fra case-studier	47

Del I: Artikkel

Investigating the "CO₂-premium" for building height

Egil Karoliussen Ytrehus, Rolf André Bohne and Jardar Lohne

Department of Civil and Transport Engineering, Norwegian University of Science and
Technology (NTNU), Høgskoleringen 7A, NO-7491 Trondheim, Norway
E-mails: egil.ytrehusmail.com, rolf.bohne@ntnu.no and jardar.lohne@ntnu.no

Abstract

Increased building heights entail greater structural loads, requiring increased material use. On this basis, literature has described a “premium” for building height consisting of additional material quantity, embodied energy, and/or embodied carbon. This article examines a so-called “CO₂-premium”; that is increased material greenhouse gas emissions per square meter floor area with increasing building heights.

The scope of this article is cradle-to-(factory)gate, limited to building structural systems. Heights of three to 70 stories are assessed, as are several structural systems. Material emission factors are treated as a proxy for production conditions. The material quantity data is based upon literature sources.

The results oppose the idea of a ubiquitous CO₂-premium for height. The premium appears to be non-existent for the buildings up to 12 stories. The 20 story buildings may be heightened up to 30 stories with a negligible premium per story. For taller buildings, the premium is highly dependent upon structural solutions, material choices, and material emission factors.

Less favourable material emission scenarios evoke increased premiums. The premium is small for all structural material alternatives in a renewable, low-emission scenario. Excepting the best-case emission scenario, the steel structural alternative performs worse than the reinforced concrete structural alternatives for all building heights.

Introduction

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) fifth assessment report asserted the severity of the impacts of climate change upon human and natural systems, and identified anthropological greenhouse gas (GHG) emissions as the dominant cause (IPCC, 2014b). The building sector contribute significantly to such emissions; the IPCC noted that the building sector accounted for approximately 19% of energy-related GHG emissions in 2010 (IPCC, 2014a). Furthermore, the IPCC accentuated building operational energy (OE) use as a category with potentially substantial – and cost-effective – mitigation measures (IPCC, 2014a). This emphasis on OE concur with research showing the use stage to be by far the most significant life cycle stage for conventional buildings, both from an energy and a GHG perspective (Cabeza, Rincón, Vilariño, Pérez & Castell, 2014; Ramesh, Prakash & Shukla, 2010; Sartori & Hestnes, 2007; Sharma, Saxena, Sethi, Shree & Varun, 2011).

With reductions in OE use as OE mitigation measures are implemented, the product (material production) stage increases in importance (Cabeza et al., 2014; Manish Kumar Dixit, Fernández-Solís, Lavy & Culp, 2010; Ghattas, Gregory, Olivetti & Greene, 2013; Ibn-Mohammed, Greenough, Taylor, Ozawa-Meida & Acquaye, 2013; Ramesh et al., 2010; Ruuska & Häkkinen, 2014; Sartori & Hestnes, 2007). Ruuska and Häkkinen (2014) describe three rationales explaining this. Firstly, reductions in OE use and/or GHG emissions of the use stage increase the relative importance of the product stage. Secondly, GHG emissions of the product stage may in some cases increase in absolute terms because of greater material use or changes of materials. And thirdly, short term emissions caused by material production can be regarded more clamant than future emissions caused by OE use, as discussed by Säynäjoki, Heinonen and Junnila (2011).

Material production emissions prove relevant also within a broader context. The IPCC have identified “Compact urban form” as a possible sectorial mitigation measure (IPCC, 2014c, p. 117-119). This measure have multiple possible positive impacts, most notably reducing the demand for personal transportation (IPCC, 2014c). The results of Norman, MacLean and Kennedy (2006) support such a measure, comparing high and low residential density urban layouts by life cycle analysis (LCA). The LCA included impacts resulting from material use, operational building energy use, and personal transportation; accounting for energy use and GHG emissions. The results showed low density urban layouts to be more energy and GHG intensive than higher density urban layouts. Furthermore, Norman et al. (2006) showed that the importance of material GHG emissions increases for higher density urban layouts. This effect can be regarded analogous to the effect of reductions in OE use. The importance of material GHG emissions increases on a relative basis largely as a result of reduced personal transportation emissions and on an absolute basis as material emissions per square meter of living area increases.

The densities of urban layouts are closely related to building form and building height, as discussed by Steadman (2014). Tall buildings are often tapered; because of restrictions to insure daylight access to neighbouring properties and streets, and because of implications of the elevator systems (p. 224, p. 233). Steadman writes: *“The key issue, for tall buildings as for low ones, is how closely they can be spaced without prejudicing light and ventilation.”* (p. 117.) The implication of which is that taller buildings does not always equal proportional higher densities. Steadman stipulates a law of diminishing returns, depending upon building form and restrictions.

Nevertheless, a popular understanding of higher density layouts and more compact urban form is taller buildings, i.e. increased building heights. Building height and its relation to material related GHG emissions are therefore of interest. This is particularly true when one considers the combined effect of a high density urban layout and low-energy buildings; both matters increasing the importance of material related GHG emissions. Additionally, as building heights increase, buildings are subjected to larger structural loads, requiring increased material quantities. This suggests increasing material GHG emissions per increasing building heights; a so-called “CO₂-premium” for building height. A CO₂-premium for building height, especially if viewed in combination with Steadman’s law of diminishing returns, could potentially reduce the effectiveness of compact urban form through taller buildings as a mitigation measure.

The purpose of this article is to examine the relationship between building structural systems’ material GHG emissions related to building height in light of the following questions:

- Is there a CO₂-premium for building height?
- Does such a premium vary with building height?
- Do structural material choices and structural solutions influence this premium?
- What is the significance of material production technologies on this premium?

These questions are investigated in this article through an examination of material GHG emissions attributed to material use in building structural systems. The scope of this article is limited to cradle-to-(factory)gate, covering building structures with heights ranging from three to 70 floors, with some variances of material types, structural solutions, and material production conditions.

Theoretical framework

Building life cycle environmental impacts

Standards Norway (2011a) – EN 15643-2:2011 – divide the building life cycle into four different stages comprising 13 different processes. This four stage division is also illustrated by EeBGuide Project (2011) with reference to EN 15978 and EN 15804 (Standards Norway, 2011b, 2012). Figure 1 illustrates the four stages and their underlying processes, in addition to a before use stage.

Before use stage		Use stage (USE)	End of life stage (EOL)
Product stage (P) <ul style="list-style-type: none"> • Raw material supply (R) • Transport (T) • Manufacturing (M) 	Construction process stage (C) <ul style="list-style-type: none"> • Transport • Construction-Installation 	<ul style="list-style-type: none"> • Use • Maintenance • Repair • Replacement • Refurbishment • Operational energy use • Operational water use 	<ul style="list-style-type: none"> • Deconstruction, demolition • Transport • Waste processing • Disposal

Figure 1: Building life cycle stages.

Lützkendorf, Foliente, Balouktsi and Wiberg (2014) similarly define four building stages, representing the same distinction, but using partly different terms. A three part division is also used in the literature. Standards Norway (2011a) includes a before use stage, comprising of both the product stage, and the construction stage, resulting in three main building stages. Blengini and Di Carlo (2010) similarly define a three part division, using the term life cycle phases. Irrespective of the terms used, or the division into stages, a buildings total life cycle environmental impact includes direct and indirect impacts occurring during the whole life cycle of the building.

Equation 1 illustrates this by defining a buildings total life cycle environmental impact (E_{tot}) as the sum of the environmental impact (E) of every building life cycle stage.

$$E_{Tot} = \sum E_P + E_C + E_{USE} + E_{EOL} \quad (1)$$

Equivalently, the environmental impact of each building life cycle stage is the sum of impacts resulting from each underlying process, exemplified for the product stage in equation 2.

$$E_P = \sum E_R + E_T + E_M \quad (2)$$

Terminology

As discussed by several articles, terms such as embodied carbon (EC) and embodied energy (EE) differ by their definitions among authors (Manish Kumar Dixit et al., 2010; Ibn-Mohammed et al., 2013; Moncaster & Symons, 2013). The definitions of the terms used are typically closely related to the system scope that is used. By the stages described above, Shipworth (2002) include all impacts resulting from the before use stage to the general term “Embodied impacts”. Similarly, Himpe et al. (2013) include all energy required for the before use stage as EE, and Sodagar, Rai, Jones, Wihan and Fieldson (2010) include all emissions from the before use stage in their embodied CO₂ calculation. In a somewhat different manner, Ding (2007) defines an initial EE of the before use stage, but also defines a recurring EE of

the use stage, for goods and services used for routine maintenance, repair and refurbishment. Ding (2004) include energy use both of the before use stage, and the end of life stage as embodied energy, as does Manish K. Dixit, Fernández-Solís, Lavy and Culp (2012). In contrast, Foraboschi, Mercanzin and Trabucco (2014) include only the product stage in their EE estimations.

As discussed in the Method section, the calculations in this article are limited to cradle-to-(factory)gate, and includes only product stage emissions. To avoid conflict with other author's definitions of embodied carbon, the term building material GHG emissions is adopted to describe this article's calculations and results.

Another terminological selection is that the term CO₂, for example a "CO₂-premium for height", refers to CO₂-equivalents (CO₂-eq) of the GHG emissions as described by IPCC (2013). The term building structure refers to all structural load-bearing components of a building.

Literature

Articles addressing the environmental impacts of buildings are legion. Examples of this are Khasreen, Banfill and Menzies (2009), Takano, Hughes and Winter (2014), Fay, Treloar and Iyer-Raniga (2000), Sigrid Nordby (2011), Thomas (2010), and Itard and Klunder (2007). This subsection discusses some of the important background literature concerning the research questions of this article, while refraining from offering a comprehensive literature review. The literature relates to buildings' environmental impacts, the effect of structural and material choices, the effect of material emission factors, and the premium for building height.

Kaethner and BurrIDGE (2012) assessed the embodied CO₂ of structural frames of offices, schools and hospitals. A range of structural systems and material embodied CO₂ factors were examined. They found that various concrete structural systems generally had lower EC values than steel-based structural systems, but that careful specification of structural systems had a greater potential for reducing EC values than material choices. Furthermore, material CO₂ emission factors were found paramount. The study demonstrates that variations in material CO₂ emission factors have significant impacts on embodied CO₂ values of structural frames. Variations in material emission factors influenced the environmental comparison of technologies. In addition, material CO₂ emission factors were found to be the main source of variation in other comparative studies evaluating structural frame alternatives. The findings of Kaethner and BurrIDGE (2012) should therefore be kept in mind when considering the following case-based comparative studies.

John, Nebel, Perez and Buchanan (2009) compared multi-story buildings; wood, concrete and steel. The steel framed building was compared in disfavour to the concrete framed building concerning material GHG emissions. A steel framed building was also compared in disfavour to a concrete framed building by Aye, Ngo, Crawford, Gammampila and Mendis (2012) who estimated embodied energy-related GHG emissions. In contrast, Guggemos and Horvath (2005) found comparable CO₂ emissions for a steel-framed and a concrete framed building including both the product and the construction phase, and Xing, Xu and Jun (2008) found a

steel alternative to be more preferable than a concrete alternative with regards to material GHG emissions of the product stage.

Several authors have discussed environmental impacts of buildings as related to building heights, or have presented information important to such a discussion (Ali & Moon, 2007; Bawden, 2013; Foraboschi et al., 2014; Khan, 1968; Ordóñez & Modi, 2011; Paya-Zaforteza, Yepes, Hospitaler & González-Vidosa, 2009; Treloar, Fay, Ilozor & Love, 2001; Viola, 2012). Some have proposed or described a premium for height; additional material quantity, embodied energy, and/or embodied carbon, as heights increase (Bawden, 2013; Khan, 1968; Treloar et al., 2001).

A material premium for height was proposed by Khan (1968). Khan demonstrated that increased building heights leads to larger lateral loads, requiring greater material quantities than what gravitational loads alone require. Ali and Moon (2007) specifies that the material quantities necessary to account for gravitational loads alone “*is almost the same*” (p. 207) regardless of building height, and that the drastic increment of material use as heights increases are mainly due to lateral loads.

Several researchers have performed case-based LCAs of buildings, some using the same methodological framework on several buildings with varying heights (Bawden, 2013; Treloar et al., 2001; Viola, 2012). Treloar et al. (2001) analysed the EE of five different buildings, with heights ranging from three to 52 stories. They found that the two tallest buildings had approximately 60% higher EE values per gross floor area (GFA) than the two lowest buildings. Furthermore they found that EE per GFA of structural elements increased with increasing building heights, while EE values of other building elements were not found to correlate with height. Their results thereby suggest an “EE-premium” for height for structural components, though this term is not used by the authors.

Bawden (2013) performed an Input-Output LCA of low, mid and high-rise multi-family dwellings. Both cumulative energy demand (CED) and global warming potential (GWP) of the buildings were calculated; the calculation accounting for the product, construction and use stages. The buildings ranged from three to 21 stories tall. The results exhibited a general increasing trend of both CED and GWP per square meter with increasing building heights, caused by increased emissions from the product and construction stages. The results thereby suggest a “CO₂-premium” for height, though this term is not used by the author. Furthermore, GWP impact factors for steel were calculated, depending upon steel type, primary and secondary percent of steel input in the production, and production location. The variable steel emission factors were applied to a building LCA. The results demonstrates how uncertainty in GHG emission factors of materials might affect a building LCA, and thereby the importance of material emission factors.

Case oriented LCAs, such as Treloar et al. (2001) and Bawden (2013), typically assess buildings that potentially differ by structural and architectural specifications. Such specifications can easier be controlled through more hypothetical or theoretical studies, investigating the effect of building height with other variables constant.

Ordóñez and Modi (2011) performed one such theoretical study. They estimated CO₂ emissions of a residential building of varying heights, including emissions originating from materials and operational energy use. The scope included building heights ranging from one to 60 floors, and included the building frame, envelope and foundation. The article indicates the optimal height of the building being four or five floors, as both material and operational CO₂ emissions increase on a per square meter basis for higher and lower building heights. A polynomial relation is described, with increasingly higher material CO₂ emissions with height increments of the taller buildings. The article is unusual concerning its large scope; assessing material emissions from many building components, as well as operational emissions, and a large range of building heights. However, the article does not depict emissions from structural and non-structural components separately. A reduction in scope is therefore relevant. Such as specific analyses of building components and their relation to height, to investigate specifically which building components must, can, and do not vary with building heights.

Foraboschi et al. (2014) analysed the EE of tall buildings, with heights varying from 20 to 70 floors. The scope of the article is limited to building structural frames and floors, and evaluates several possible framing and flooring technologies. The article found that EE values exhibited an exponential relation to building heights, and a per square meter comparisons revealed that there exists an “EE premium” for height for all building alternatives, and a broadly increasing one as heights increases. It states that *“the EE premium for height may penalize tall buildings much less than the structural premium for height. Thus, construction of tall buildings may guarantee acceptable consumptions of EE”* (p. 268). In addition, they found that the reinforced concrete (RC) frames and flooring solution consumed less EE than the steel-based alternative. They demonstrate that there exists an environmental premium for height specifically for the building structure. This premium is though expressed as EE, and the article is limited to buildings over 20 stories.

Ibn-Mohammed et al. (2013) points out that there is no direct relationship between embodied carbon and embodied energy in buildings. This is due to material processes that emit and sequester carbon. Ibn-Mohammed exemplifies this by pointing out that cement production emits approximately half of its carbon emission by material processes unrelated to energy use. For a tall building with large concrete amounts, it is not inconceivable that building heights exhibit a different relation to EE and material GHG emissions.

In sum, the above discussion of literature reveals that there exists a gap of knowledge concerning material GHG emissions related to building height.

Method

System boundaries and scope

This article is restricted to material GHG emissions. This entails a cradle-to-(factory)gate perspective, including the processes raw material supply, transport, and manufacturing. The transport (of materials to construction site) and the construction processes are defined outside the system boarder.

Limiting the system boundary to cradle-to-(factory)gate is largely based on two considerations. Firstly, the transportation and construction processes are processes of which there is “*a particular shortage of data*” (Moncaster & Song, 2012, p.26). Secondly, the literature differs in its assessment of the importance of these processes (Bawden, 2013; Cole, 1998; Nässén, Holmberg, Wadeskog & Nyman, 2007; Sartori & Hestnes, 2007). A discussion on these omitted processes is included in the Discussion.

Furthermore, the scope of this article is confined to the load-bearing system of the buildings. Non-structural elements such as the facade, finishing and technical systems are not included. Moreover, all elements below the first floor slab level are excluded; all substructural components, basement components and the foundation structure. A discussion on these omitted components is included in the Discussion.

It is conceivable that omitted processes such as material transportation and building construction, along with omitted building elements such as foundations, potentially entail GHG emissions correlative to building heights. It is therefore critical to stress that all processes beyond the material product stage, and all non-structural and substructural elements, are not included in the system boundary of this article.

Calculation model

The calculation was based on two main sets of factors. Material quantity data, expressed in kg or m³ material per m², was combined with materials’ GHG emission factors, expressed in kg CO₂-eq per kg or m³ of materials. Both factors are variables in the calculations. Material quantity data vary by building height and structural alternative. Material emission factors vary by material production conditions and technology, represented by material emission scenarios. Both factors are discussed in greater detail in later subsections. The main calculatory products of this article are material GHG emissions of building structures; emissions of the product stage. The calculation procedure is principally depicted in Equation 3.

$$EM = \sum_i MQ_{c,h,a} \times MEF_t \quad (3)$$

Where: EM= material GHG emissions of building structures, MQ=material quantity, MEF=material emission factor, i=building material, c=structural component (for three, seven and 12 stories), h=building height, a=structural alternative, t=material production technological factors/emission scenarios)

The results of these calculations were elaborated to construct relationships between material GHG emissions per square meter gross floor area (GFA), and building height. GFA was used in preference of net rentable area (NRA) as values for NRA were not available for all building heights. A discussion on this selection is included in the Discussion.

Material quantity data

All building information applied in this article was based upon literature data; that is all general building specifications, structural detailing, and material quantity estimations. Building information is only partly presented in this article, and readers are referred to the cited literature for details.

Two principal sources for building information and specification were used, one for building heights of three, seven and 12 stories, and another source for building heights ranging from 20 to 70 stories.

Three, seven and 12 stories

For building heights of three, seven and 12 stories, building specifications and material quantity data was based upon the works of Ayensu and Jensen (2006). They designed a building with variable building height, while keeping the principal geometrical figures of the building constant. The authors detailed building structural systems based upon the design, assessing several different structural load combinations and two different structural systems. Moreover, the authors estimated the material quantities of the building structural systems, and performed a cost comparison.

In this article only the shearwall framing system detailed by Ayensu and Jensen (2006) is included, dimensioned for the worst-case windspeed of 150 miles per hour ($\approx 67 \text{ ms}^{-1}$). The structural system is a flat-slab, shearwall framing system, and all structural components are cast-in-place RC. The structural system does not necessitate any structural beams or cores. The authors included the following structural components: columns, flat-slab flooring, shearwalls, and the roof structure. Some key specifications are presented in Table 1.

	Specification
Building type	Apartment building
Floor area per storey	$\sim 871 \text{ m}^2$
Bay size	$\sim 7.62 \times 7.62 \text{ m}$
Flooring system	Flat-plate
Live load	2.4 kPa
Concrete strength	$\sim 28 \text{ MPa}$ (assumed = 30MPa)

Table 1: Constant specifications of the three, seven and 12 story building structure. Adapted from Ayensu and Jensen (2006).

Ayensu and Jensen (2006) detail material quantity data for each building height alternative, per structural building component. The material quantity data is expressed in ft^3 concrete and lbs rebar steel, necessitating a conversion to m^3 concrete and kg steel before calculation. As a ground floor slab is not included in their estimations, a basic one is assumed: A 80 mm concrete ground floor slab with 2.05 kg/m^2 rebar reinforcement (personal communication, Professor T. Kanstad, NTNU, Desember 12, 2014). The correlative material quantities were added to those estimated by Ayensu and Jensen (2006). Total material quantities of the calculations are presented in Table 2.

Number of stories:	3	7	12
Concrete, B30 [m^3]	820	1839	3157
Rebar steel [kg]	28975	70616	139536
Gross floor area, GFA [m^2]	2613	6097	10452

Table 2: Material quantity data of the three, seven and 12 story buildings. Adapted from Ayensu and Jensen (2006).

20 to 70 stories

For building heights ranging from 20 to 70 stories, building specifications are as described by Foraboschi et al. (2014). Foraboschi et al. (2014) assessed building structures of 20 to 70 stories with increments of 10, with a load-bearing system based upon a central core, and a rigid frame. A RC central core is a constant, while several flooring and frame alternatives are evaluated. The building does not have constant geometrical figures with varying heights; story floor-area and the central core are tapered. Furthermore, all columns are placed at building perimeter.

Structural specifications	
Alternative A	Steel frames and steel-concrete floors
Alternative B	RC frames and RC slabs
Alternative C	RC frames and a RC lightweight flooring system

Table 3: Structural alternatives, 20 to 70 stories. Adapted from Foraboschi et al. (2014).

The authors define three principal structural alternatives, included also in this article, and presented in Table 3. Other key specifications include concrete compressive strength of 40 MPa, and a live load of three kPa. The material quantity data used in this article for buildings of 20 to 70 stories were fully extracted from Foraboschi et al. (2014), with no additions. The article provides material quantity data for each building height and structural alternative, but on an aggregated basis, not distinguishing between different structural components. The material data is expressed in kN, necessitating conversion for the calculations. The adapted data is presented in an in Table 4. A density of 2350 kg/m^3 for concrete was assumed, in accordance with Hammond and Jones (2011).

Number of stories	Alternative	Structural steel [kg]	Rebar steel [kg]	Concrete, B40 [m ³]	HDPE [kg]	Gross floor area, GFA [m ²]
20	A	355015	264220	1761	0	8000
	B	0	341335	2230	0	8000
	C	0	395392	2597	31019	8000
30	A	741040	593272	3955	0	17280
	B	0	763649	4984	0	17280
	C	0	859358	5637	66483	17280
40	A	1859286	1360245	9068	0	36000
	B	0	1763425	11453	0	36000
	C	0	1928196	12595	140347	36000
50	A	3977115	2600826	17339	0	57800
	B	0	3273710	21201	0	57800
	C	0	3428593	22290	221600	57800
60	A	7218104	4422314	29482	0	105840
	B	0	5768981	37122	0	105840
	C	0	6870683	44746	316758	105840
70	A	19769307	8047706	53651	0	189280
	B	0	10508756	67714	0	189280
	C	0	12636667	81852	580979	189280

Table 4: Material quantity data of the 20-70 story buildings. Adapted from Foraboschi et al. (2014).

Material emission factors

The material emission factors utilized in this article are reflections of the chosen system boarder; a cradle-to-(factory)gate perspective, that is product stage emission factors.

Several researchers have studied or demonstrated the importance of material emission factors influence upon environmental evaluations of buildings. The works of Bawden (2013) and Kaethner and BurrIDGE (2012) was presented in the Literature subsection, and are examples in this regard. Because of the proven importance of material emission factors by the literature, particular attention is given towards these factors. For the main construction materials; concrete, structural steel, and rebar steel; three different factors are employed. The three factors form scenarios; a reference scenario, a best-case scenario, and a worst-case scenario. The scenarios represent technological aspects and production conditions, and European conditions. The reference scenario represents an approximation of average conditions in Europe today. The best-case scenario represents low emission conditions; current state-of-the

art industry conditions, minimizing material GHG emissions. The worst-case scenario represents high emission conditions; current industry production conditions and locations resulting in relatively high material emissions.

The material emission factors are not all taken from the same source. Rather factors from different sources are combined in order to obtain a range of values functioning both as representations of technological production factors, general uncertainty in all material emission factor calculations, and differences between sources by method and input values. The chosen material emission factors are depicted in Table 5. In the following subsections the selection of these factors are discussed in detail, in relation to the literature, and the industry conditions.

Material emission factor	Worst-case scenario	Reference scenario	Best-case scenario
Structural steel [kg CO ₂ -eq/kg-structural steel]	2.4	1.6	0.36
Rebar steel [kg CO ₂ -eq/kg-rebar steel]	1.6	0.78	0.36
Concrete B30 (\approx 27-30 MPa) [kg CO ₂ -eq/m ³ -concrete]	348	282	205
Concrete B40 (\sim 27-30 MPa) [kg CO ₂ -eq/m ³ -concrete]	442	355	220
HDPE Plastics [kg CO ₂ -eq/kg-HDPE]	1.96	1.96	1.96

Table 5: Material GHG emission factors, per scenario.

Steel material emission factors

Multiple authors have discussed the material GHG emission factors of steel production and performed analyses such as LCAs, among those Burchart-Korol (2013), Chen, Yin and Ma (2014), and Bawden (2013). Burchart-Korol (2013) points out that the range of variation of structural steel emission factors is significant among the literature. Chen et al. (2014) demonstrate that production method related to the percentage of recycled steel content of the production route, is among the chief variables influencing steel emission factors. Production location is another significant variable, influencing for instance the electricity mix used in the production (Burchart-Korol, 2013; Chen et al., 2014).

Bawden (2013) calculated typical GWP impact factors of structural steel production in China, USA, and Europe. The author calculated factors for steel with secondary (scrap) content varying from 0% to 100%. Two of these factors are used in this article; the factor for USA steel production with 0% secondary scrap content is selected as the worst-case scenario, and the factor for 50% secondary content is selected as the reference scenario. Readers are referred to Bawden (2013) for a comparison of the calculated factors to literature and database factors. The factors for USA steel production are chosen as they compare well with multiple EPDs developed for European steel production (bauforumstahl e.V., 2010, 2013; Celsa

Barcelona, 2011; Celsa Group, 2014; Fet, 2014a, 2014b, 2014c). The reference scenario of 50% scrap metal, with a material emission factor of 1.6 kg CO₂-eq/kg-steel, compares for example with one EPD that can be construed as representing a European average. The EPD attest for production in several European countries, with an emission factor equivalent to 1.735 CO₂-eq/kg-steel for cradle-to-factory-gate processes (bauforumstahl e.V., 2013).

For the best-case scenario, a factor of 0.36 CO₂-eq/kg-structural steel is chosen. This value is equivalent with the value of a EPD for rebar steel from a Norwegian producer (Almemark, 2012). Though that EPD accounts for rebar production, the same factor is assumed for the hypothetical best-case scenario of structural steel production, where 100% of steel input material is secondary content, and most of the electricity used in the production is calculated as renewable hydro power.

Rebar emission factors

The material GHG emission factors of rebar steel used in this article are presented in Table 5. As was the case for structural steel, the best-case scenario assumes a factor of 0.36 CO₂-eq/kg-rebar steel. A factor of 0.785 CO₂-eq/kg-rebar steel is assumed for the reference scenario, in line with a EPD representing industry average secondary rebar steel production in Europe (UK Cares, 2014). The factor implies an assumption that rebar steel in Europe is typically produced from recycled steel.

The worst-case scenario is based upon an assumption that rebar steel in some cases is produced from some share of virgin steel, but that rebar production without any secondary content is unlikely. The factor was set to 1.6 kg CO₂-eq/kg-steel, complying with the calculations of Bawden (2013), for low-alloyed steel with 50% secondary content and European production.

Concrete emission factors

Multiple authors have discussed the material GHG emission factors of concrete production and performed analyses such as LCAs (Habert & Roussel, 2009; Hasanbeigi, Price & Lin, 2012; Mahasenan, Smith & Humphreys, 2003; Nordqvist, Boyd & Klee, 2002; Petek Gursel, Masanet, Horvath & Stadel, 2014; Zhang, Cheng & Lo, 2014).

Petek Gursel et al. (2014) points out that the literature estimating environmental impacts of concrete production employ differing methods and system boundaries, affecting the estimates of environmental impacts. Nordqvist et al. (2002) states that high transportation costs of cement is one reason of the cement industry, and in extension concrete production, being a regionally diverse industry, with local production conditions influencing the environmental impacts of concrete production in different countries, regions, and individual production locations. Hasanbeigi et al. (2012) reviewed technical measures that decreases the CO₂ emissions of cement and concrete production; identifying use of fly ash in the production process of cement and concrete as a well-developed measure. Several EPDs for ready-mixed concrete have been developed both for generic conditions, and specific producers (Gustad & Gulbrandsøy, 2014; InformationsZentrum Beton GmbH, 2013b; Moldal, 2014; Santero, Lahd & Marceau, 2014). These EPDs reveal that factors such as the strength of the concrete, the

percentage of fly ash in the concrete mixture, and regional differences, affect the GHG emission factor of concrete.

The Inventory of Carbon & Energy (ICE) database includes estimations of GHG emission factors of concrete (Hammond & Jones, 2011). The database includes estimations for UK weighted average of concrete, selected as the reference scenario. The database includes as well estimations for CEM 1 concrete, that is 100% Portland cement with no fly ash in mixture. This is selected as the worst-case scenario. These selections imply an assumption of UK concrete production being somewhat characteristic of general European production.

The factors chosen for the best-case scenario is in line with a general classification by Norbetong, a major concrete producer in Norway - LavKarbon klasse A [*LowCarbon class A*] (NorBetong, 2012). The concrete GHG emission factor of this classification is comparable with some Norwegian EPDs (Gustad & Gulbrandsøy, 2014; Moldal, 2014). The best-case scenario represents obtainable, but leading concrete production conditions.

HDPE Plastics emission factors

The lightweight RC flooring system, Alternative C, consists in part of plastic spheres (Foraboschi et al., 2014; Ollendorff, 2012). Multiple plastic types can in principle be used (Ollendorff, 2012). In this article high density polyethylene HDPE plastics is assumed, in accordance with Ollendorff (2012) and Foraboschi et al. (2014). Plastics Europe has developed a general EPD for HDPE plastics (PlasticsEurope). The EPD is not specifically developed for the plastic spheres of the lightweight RC flooring system, and does not take into account potential use of recycled plastics in the production process of the spheres (Ollendorff, 2012). Despite of this, the material emission factor of this EPD is directly used for all scenarios, as Table 5 depict.

Results

In this section, the results of the calculations are presented through eight figures, largely self-supported.

Figure 2A, 2B and 2C depict building structure material GHG emissions per GFA, for each building height and structural system. As pointed out in the Method section, the geometrical outlines of the 20 to 70 story buildings are not constant. A consequence of which is discontinuous curves, and vacillating datapoints. This tendency is more explicit for the less favourable emission scenarios.

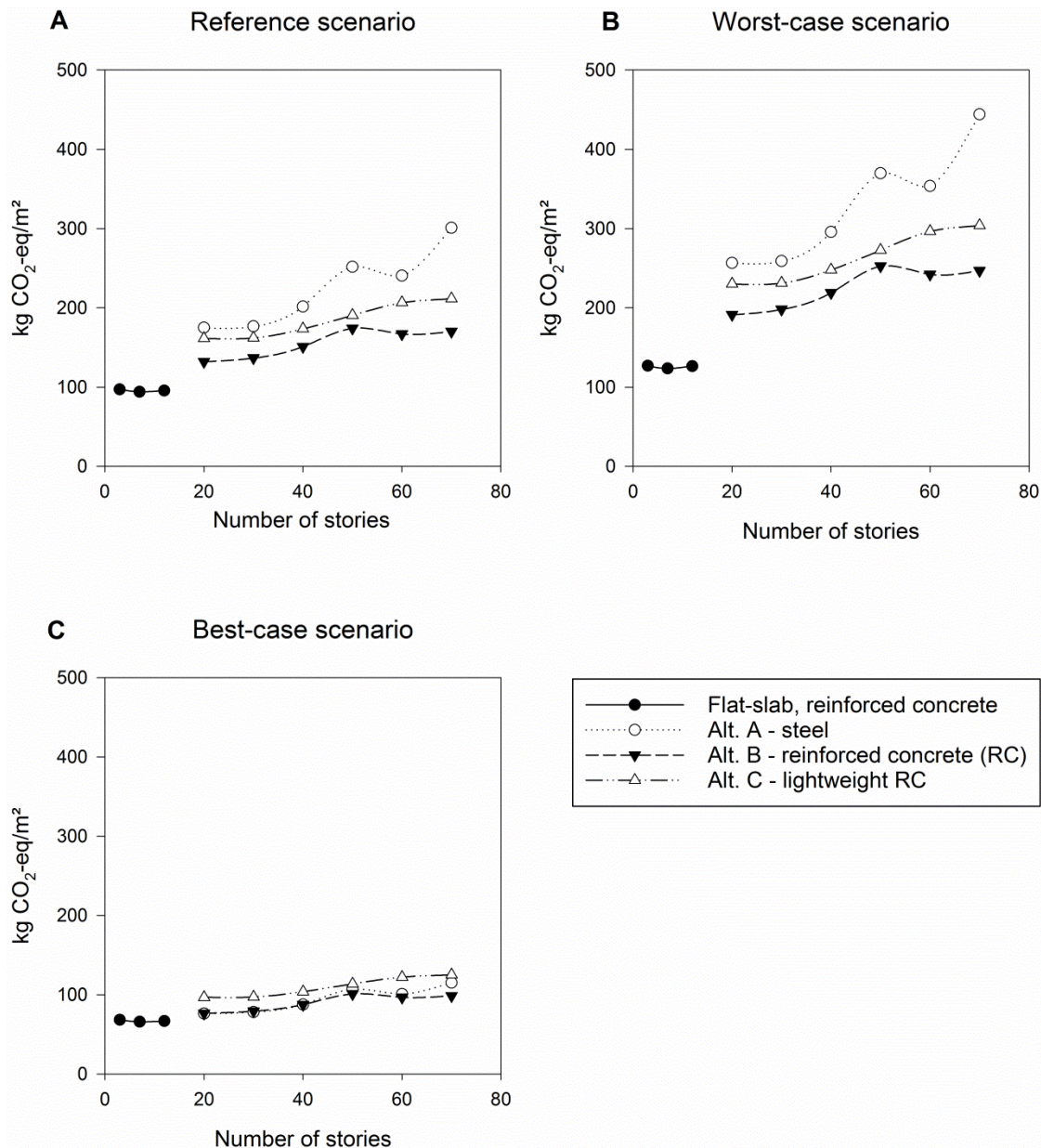


Figure 2: Building structure material GHG emissions relative to building height.

Figure 3 illustrate the material GHG emissions per GFA, for each structural component. Figure 3 applies for building heights 3, 7 and 12 stories. The contribution of slabs, columns, and shearwalls increases with building heights, while the contribution from the roof and ground floor slab decreases. The sum of contribution for all structural components cause material GHG emissions per GFA to remain relatively constant as building height vary from three to seven to 12 stories, varying only by approximately three percent.

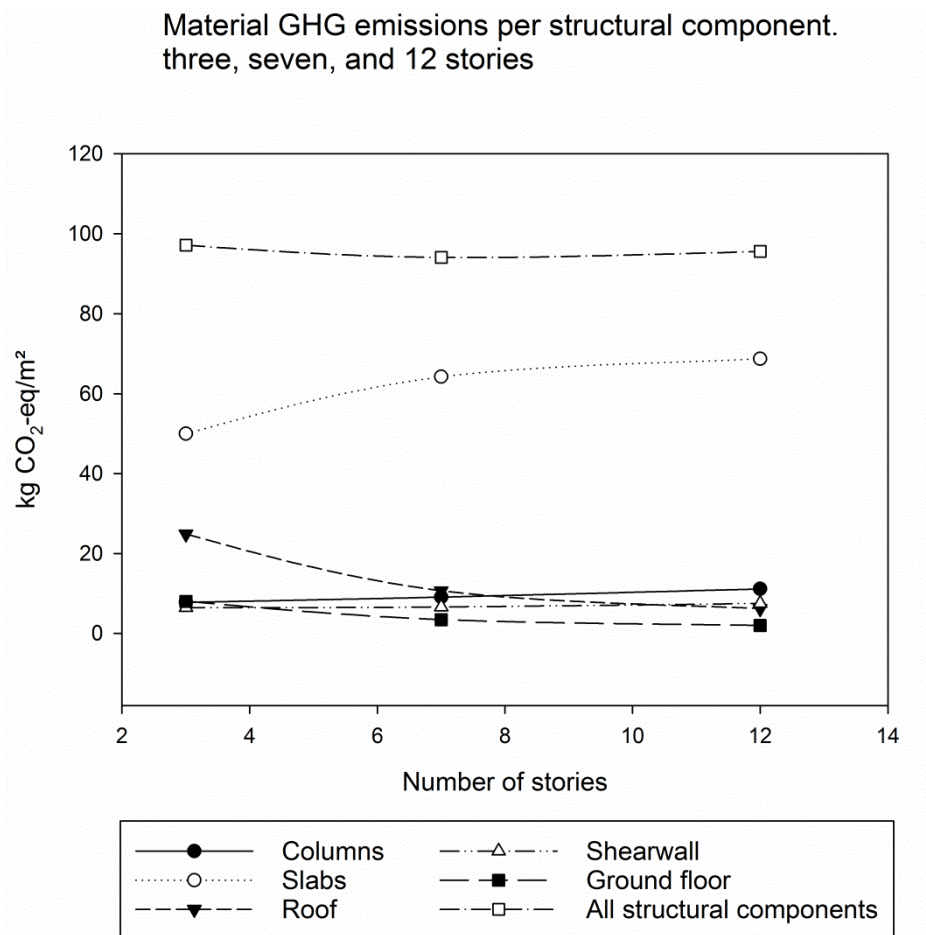


Figure 3: Material GHG emissions per structural component. Three, seven and 12 story buildings. GHG emissions per GFA; reference scenario.

The CO₂-premium for building taller is depicted in Figure 4. Figure 4 applies to building heights of 20 to 50 stories; the discontinuous curves of Figure 2 encumber inclusion of additional building heights. Figure 4 depict the additional impact of building one extra story, as averaged over the ten story intervals of the data. The results are detailed in kg CO₂-eq per square meter GFA, for all three material emission scenarios and structural alternatives.

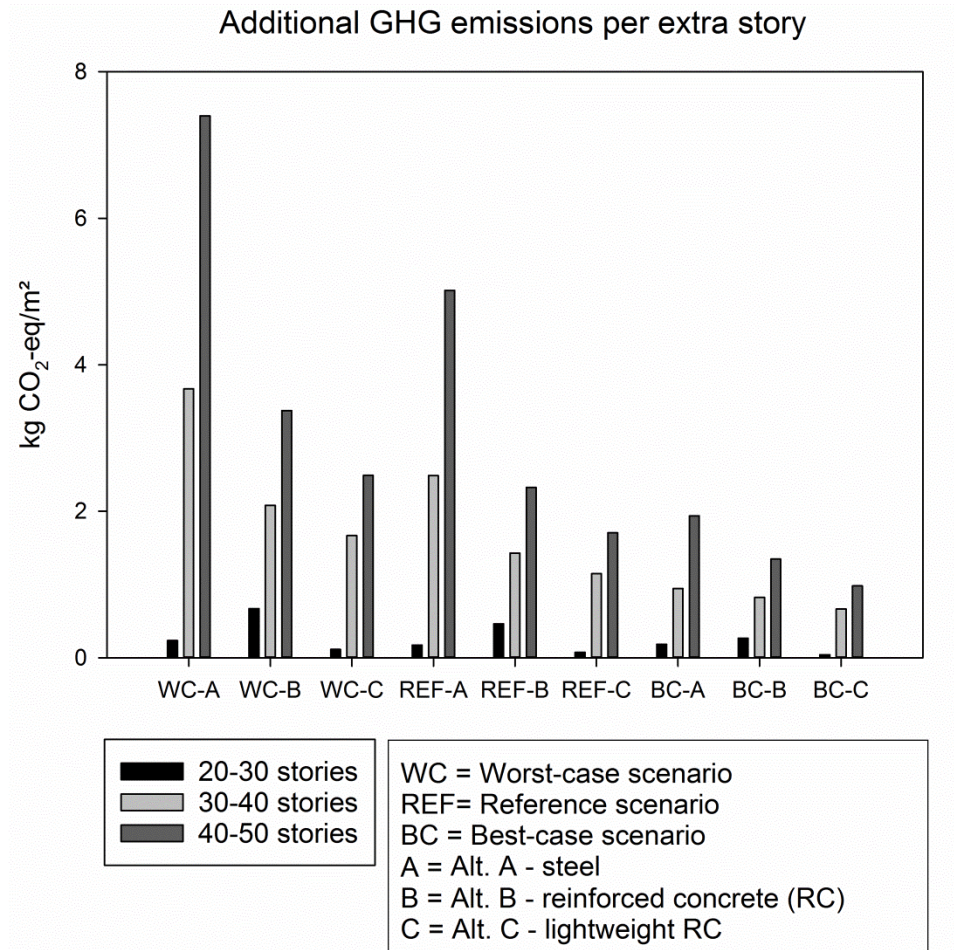


Figure 4: Additional GHG emission per extra story, as averaged over the ten story intervals of the data. GHG emissions per GFA. Variations of building heights, material emission scenarios, and structural systems.

Discussion

Material GHG emissions of the building structures

Figures 2 A-C illustrate how material GHG emissions of building structures per building heights vary greatly by structural alternative and material emission scenario.

Concerning the variation in material emission scenarios two general effects occur across all building structural systems, and all heights. Firstly, lower emission scenarios lower the material GHG impacts of the building structures. Secondly, lower emission scenarios reduce the variations between structural systems, and between heights. The combined effect of which is that the CO₂-premium for building taller decreases with decreasing material emission factors, as Figure 4 illustrates.

Concerning the variations between structural systems Figures 2 A-C illustrates that material emission factors will influence a comparison of structural systems. The RC structure – Alternative B – have consistently the lowest emissions for all building heights, concerning both the reference and the worst-case emission scenarios, while having on a par the lowest emissions for the best-case scenario. In contrast, the steel-frame structural system – Alternative A – consistently has the highest emissions for both the reference and the worst-case emission scenarios, while performing on a par with the RC structural system for the best-case scenario. The lightweight RC structure – Alternative C – performs worse than the RC structure – Alternative B – for all emission scenarios and heights. An examination of the material data reveal that the lightweight structural concrete system in fact requires greater concrete material quantities than the reinforced concrete system for all heights, contributing to this trend.

The relative environmental performance of the structural systems is in line with some of the literature. The material input data of this article were in part obtained from Foraboschi et al. (2014), and the trends of their EE calculations are generally comparable to the trends depicted here in this article, pertaining to the reference scenario. For example, the steel and the lightweight RC structural systems result in higher EE values than the ordinary RC system. This is in accordance with Ollendorff (2012), who found that a Bubbledeck-flooring (lightweight RC) had generally larger material GHG emissions and EE values per square meter than a flat-slab system, for bay sizes 7.2 meters or smaller. The results are also in accordance with Kaethner and Burridge (2012), John et al. (2009) and Aye et al. (2012), who's results support the suggestion of steel structural systems having larger environmental impacts than concrete structural systems. In contrast, Guggemos and Horvath (2005) and Xing et al. (2008) find somewhat different relations between steel and concrete structural systems, as discussed in the Literature section.

Ordóñez and Modi (2011) found a polynomial relation between material GHG emissions of a building and building height. The building structural frame material is not specified, though it appears to be a steel-framed building. The polynomial relation described by the authors is similar to the results of this article as concerns the steel-based structural system – Alternative A – for the reference and worst-case scenarios.

The “CO₂-premium” for building height

A “CO₂-premium” for building height implies increasing material GHG emissions per increasing building heights. Consequently the slopes of the curves in Figures 2 signify such a premium.

The building heights between three, seven and 12 stories carry no premium for none of the emission scenarios of this study. In fact, material GHG emissions per GFA decrease with additional heights between three and seven stories. The mechanism behind this is illustrated by Figure 3. The material GHG emission contributions of some building components increase with increasing building heights: columns, shearwalls, and slabs. However, the increasing contributions of these components are more than rectified by decreasing contributions of the ground floor slab and the roof. The explanation is the geometrical consideration; as the comparison is performed on a per square meter floor area basis, the emissions of the roof and the ground floor slab is divided upon larger floor areas as the number of stories increase.

For buildings taller than 20 stories, a premium arises. The magnitude of this premium varies depending upon structural system, material emission scenarios, and the building height, as illustrated by Figures 2 and 4. Figure 4 indicate that this premium is small or negligible for building heights between 20 and 30 stories, as regards all structural systems, and all material emission scenarios. Building heights of 30-40 stories, or 40-50 stories, imply substantially increased premiums for all structural alternatives and material emission scenarios.

The method

Figures 2 compare the structural systems` material GHG emissions related to building height. This is despite of differing structural systems and building concepts across building heights. One could argue that such comparisons should preferably be made between similar buildings concepts and structural systems. However, as pointed out by Ali and Moon (2007), different structural systems prove preferable for different building heights, naturalizing a comparison between different structural systems for different building heights.

Another discussion topic regards whether a comparison on basis of net rentable area (NRA) would be more appropriate than the comparison on basis of GFA of this article. Trabucco (2008) illustrate that taller buildings use larger proportions of GFA for non-rentable purposes. Different calculations using NRA would on this basis influence the relations of the results. Following Trabucco (2008) the CO₂-premium for building taller would plausibly increase with calculations performed on a NRA basis; generally resulting in steeper curves in Figure 2.

A different discussion topic concerns whether the results depicted in this article would be substantially altered by changes in system boundaries and scope. It is outside the reach of this article to discuss the results with regards to later life cycle stages such as the use stage and the end of life stage of buildings, and with regards to non-structural elements of buildings such as facades and finishing. In contrast, the exclusion of the transportation and construction processes, and the exclusion of the substructural components, is discussed in the following two paragraphs.

Firstly, the transport (of materials to construction site) and the construction processes are excluded in this article. However, these processes are included by other researchers in embodied carbon calculations (Ibn-Mohammed et al., 2013; Moncaster & Symons, 2013). Sartori and Hestnes (2007) found these processes to be small or negligible in their literature review of multiple case studies, while Bawden (2013) found GHG emissions of the construction process to be on the scale of, or larger than, material GHG emissions of the product stage. Nässén et al. (2007) found that traditional process based LCAs underestimate the emissions of the transport and construction processes. Cole (1998) studied GHG emissions from the construction process of alternative structural systems, and found that concrete structural systems typically involved an order of magnitude larger GHG emissions than steel structural systems, and represents 15-25% of initial embodied GHG emissions. Guggemos and Horvath (2005), found a concrete frame building alternative to have larger GHG emissions of the transportation and construction processes, than a steel frame building. Based on these sources, one may deem it credulous that inclusion of the transportation and construction processes would influence the material GHG emissions in relation to building heights, and the comparison between the structural systems.

Secondly, substructural components were omitted in this article, components which potentially entail varying GHG emissions with building heights and structural alternatives. John et al. (2009) compared multi-story buildings, and performed an LCA on different structural material alternatives; wood, concrete and steel. The authors found the material requirements of the foundation to be comparably the same between the different structural alternatives, though the wood alternative resulted in a significantly lighter building. Treloar et al. (2001) found no correlation between building substructure EE and building height. Viola (2012) found that building foundations generally contributed little to a comparison of LCA results between different buildings, and found that foundation elements can be omitted without losing unacceptable amounts of detail. Ordóñez and Modi (2011) describe decreasing material quantities in foundations per m² floor area for buildings over 10 stories, and an increasing trend up to 10 stories. The authors points out that foundation types has a large influence, with a change from isolated footing to slab foundation impacting the results. It is difficult to derive, based on these sources, whether or not inclusion of substructural components would substantially influence the results of this article.

The importance of the trends

Another topic is that the specific emission values presented in the results can be interpreted as less interesting than the general trends. Multiple authors, among these Kaethner and Burrige (2012), Ollendorff (2012), and Paya-Zaforteza et al. (2009), have demonstrated that the environmental impacts of structural systems will vary substantially with structural detailing, for example column spacing. Kaethner and Burrige (2012) found that detailed specification has a significant potential for reducing material emissions for all structural systems. The material GHG emission values presented in this article apply for the specific building structural specifications assumed in this article; other specifications may entail significantly different values. More than the specific values found in this article, the general trends outlined by the results are therefore the most significant outcome of this article.

Conclusions

By analysing material GHG emissions of building structural systems per building heights, this article has revealed:

- The structural “CO₂-premium” for building height, that is increasing material GHG emissions per increasing heights, is non-existent for heights up to 12 stories. 20 story buildings may be heightened up to 30 stories with a negligible premium per extra story. For taller buildings, the premium is highly dependent upon structural solutions, material choices, and material emission factors.
- Less favourable material emission scenarios lead to increased premiums. The premium is small for all structural material alternatives, in a renewable, low-emission scenario.
- Excepting the best-case emission scenario, the steel structural alternative performs worse than the reinforced concrete structural alternatives for all building heights. The lightweight reinforced concrete structural alternative performs worse than the ordinary reinforced concrete structural alternative.
- The results are similar to those of Foraboschi et al. (2014) who analysed the EE of 20-70 story building frames. This is unsurprising as the material quantity data of this article is extracted from Foraboschi et al. (2014), but reveal that EE and material GHG emissions correlate reasonably well. The results of the steel structural alternative is somewhat comparable to the results of Ordóñez and Modi (2011) who included a building envelope in their calculation of material CO₂ emissions of a building with varying heights. These articles employ a somewhat similar methodology as this article, accounting for the similarities of the results.
- These results are restricted to the building structural system and do not include non-structural components and foundations.

Thus, we argue that the structural CO₂-premium for height is small or negligible if the best practice structural solutions and best practice material choice solutions are followed. As a consequence, allowing the adoption of “Compact urban form” and taller buildings as a mitigation measure without inducing a rebound effect through increased material GHG emissions of building structural systems.

References

- Ali, M. M., & Moon, K. S. (2007). Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects. *Architectural Science Review*, 50(3), 205-223. doi: 10.3763/asre.2007.5027
- Almemark, M. (2012). Celsa Steel service AB: Steel reinforcement products for concrete. In L.-G. Lindfors (Ed.), *Environmental Product Declaration: IVL Swedish Environmental Research Institute*.
- Aye, L., Ngo, T., Crawford, R. H., Gammampila, R., & Mendis, P. (2012). Life cycle greenhouse gas emissions and energy analysis of prefabricated reusable building modules. *Energy and Buildings*, 47(0), 159-168. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.049>
- Ayensu, K. G., & Jensen, E. (2006). Model Development for the Evaluation of Cost-effectiveness of Concrete Framing Systems for Low-, Mid- and High-rise Buildings: Portland Cement Association.
- bauforumstahl e.V. (2010). Structural Steel: Sections and Plates *Environmental Product Declaration*. Rheinufer 108, 53637 Königswinter, Germany: Institut Bauen und Umwelt e.V. [Institute Construction and Environment].
- bauforumstahl e.V. (2013). Structural Steel: Sections and Plates *Environmental Product Declaration*. Panoramastr. 1, 10178 Berlin, Germany: Institut Bauen und Umwelt e.V. [Institute Construction and Environment].
- Bawden, K. R. (2013). *Hybrid life cycle assessment of low, mid and high-rise multi-family dwellings with development of knowledge-based uncertainty bounds*. Rochester Institute of Technology. Retrieved from <https://ritdml.rit.edu/handle/1850/16706>
- Blengini, G. A., & Di Carlo, T. (2010). The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. *Energy and Buildings*, 42(6), 869-880. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.009>
- Burchart-Korol, D. (2013). Life cycle assessment of steel production in Poland: a case study. *Journal of Cleaner Production*, 54(0), 235-243. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.031>
- Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29(0), 394-416. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>
- Celsa Barcelona. (2011). Structural Section Steel *Environmental Product Declaration*. Rheinufer 108, 53637 Königswinter, Germany: Institut Bauen und Umwelt e.V., [Institute Construction and Environment].
- Celsa Group. (2014). Structural section steel *Environmental Product Declaration*. Panoramastr. 1, 10178 Berlin, Germany: Institut Bauen und Umwelt e.V. [Institute Construction and Environment].
- Chen, W., Yin, X., & Ma, D. (2014). A bottom-up analysis of China's iron and steel industrial energy consumption and CO2 emissions. *Applied Energy*, 136(0), 1174-1183. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.002>
- Cole, R. J. (1998). Energy and greenhouse gas emissions associated with the construction of alternative structural systems. *Building and Environment*, 34(3), 335-348. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323\(98\)00020-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(98)00020-1)
- Ding, G. K. C. (2004). *The development of a multi-criteria approach for the measurement of sustainable performance for built projects and facilities*. (PhD Thesis), University of Technology, Sydney. Retrieved from <https://opus.lib.uts.edu.au/research/handle/2100/281>

- Ding, G. K. C. (2007). Life cycle energy assessment of Australian secondary schools. *Building Research & Information*, 35(5), 487-500. doi: 10.1080/09613210601116408
- Dixit, M. K., Fernández-Solís, J. L., Lavy, S., & Culp, C. H. (2010). Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. *Energy and Buildings*, 42(8), 1238-1247. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.02.016>
- Dixit, M. K., Fernández-Solís, J. L., Lavy, S., & Culp, C. H. (2012). Need for an embodied energy measurement protocol for buildings: A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3730-3743. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.021>
- EeBGuide Project. (2011). 1.3.2 European standardization works on LCA of buildings *EeBGuide Guidance Document Part B: BUILDINGS*.
- Fay, R., Treloar, G., & Iyer-Raniga, U. (2000). Life-cycle energy analysis of buildings: a case study. *Building Research & Information*, 28(1), 31-41. doi: 10.1080/096132100369073
- Fet, A. M. (2014a). Norwegian Steel Association: Generic EPD Cold formed welded structural hollow sections. In C. Skaar (Ed.), *Environmental Product Declaration*. The Norwegian EPD Foundation.
- Fet, A. M. (2014b). Norwegian Steel Association: Generic EPD Hot finished structural hollow sections. In C. Skaar (Ed.), *Environmental Product Declaration*. The Norwegian EPD Foundation.
- Fet, A. M. (2014c). Norwegian Steel Association: Generic EPD I, H, U, L, T and wide flats hot-rolled sections (Type 2.1). In C. Skaar (Ed.), *Environmental Product Declaration*. The Norwegian EPD Foundation.
- Foraboschi, P., Mercanzin, M., & Trabucco, D. (2014). Sustainable structural design of tall buildings based on embodied energy. *Energy and Buildings*, 68, Part A(0), 254-269. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.003>
- Ghattas, R., Gregory, J., Olivetti, E., & Greene, S. (2013). Life Cycle Assessment for Residential Buildings: A Literature Review and Gap Analysis. *Concrete Sustainability Hub Massachusetts Institute of Technology*.
- Guggemos, A., & Horvath, A. (2005). Comparison of Environmental Effects of Steel- and Concrete-Framed Buildings. *Journal of Infrastructure Systems*, 11(2), 93-101. doi: 10.1061/(ASCE)1076-0342(2005)11:2(93)
- Gustad, O. J., & Gulbrandsøy, K. (2014). Voss Cementvarefabrikk A/S: Betong B30 M60, konsistens <200m/m. In S. Fossdal (Ed.), *Environmental Product Declaration*. The Norwegian EPD Foundation.
- Habert, G., & Roussel, N. (2009). Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives. *Cement and Concrete Composites*, 31(6), 397-402. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.001>
- Hammond, G., & Jones, C. (2011). ICE Inventory of Carbon and Energy V 2.0. *Sustainable Energy Research Team (SERT), Department of Mechanical Engineering, University of Bath, UK*.
- Hasanbeigi, A., Price, L., & Lin, E. (2012). Emerging energy-efficiency and CO2 emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 6220-6238. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.019>
- Himpe, E., Trappers, L., Debacker, W., Delghust, M., Laverge, J., Janssens, A., . . . Van Holm, M. (2013). Life cycle energy analysis of a zero-energy house. *Building Research & Information*, 41(4), 435-449. doi: 10.1080/09613218.2013.777329

- Ibn-Mohammed, T., Greenough, R., Taylor, S., Ozawa-Meida, L., & Acquaye, A. (2013). Operational vs. embodied emissions in buildings—A review of current trends. *Energy and Buildings*, 66(0), 232-245. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.026>
- InformationsZentrum Beton GmbH. (2013). Beton der Druckfestigkeitsklasse C 30/37 (Concrete strength class C 30/37) *UMWELT-Produktdeklaration (Environmental product declaration)*. Panoramastr. 1, 10178 Berlin, Germany: Institut Bauen und Umwelt e.V. [Institute Construction and Environment].
- IPCC. (2013). Annex III: Glossary *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*.
- IPCC. (2014a). Buildings *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- IPCC. (2014b). Summary for Policymakers *Climate Change 2014: Synthesis Report*.
- IPCC. (2014c). Summary for Policymakers + Longer Report *Climate Change 2014: Synthesis Report*.
- Itard, L., & Klunder, G. (2007). Comparing environmental impacts of renovated housing stock with new construction. *Building Research & Information*, 35(3), 252-267. doi: 10.1080/09613210601068161
- John, S., Nebel, B., Perez, N., & Buchanan, A. (2009). Environmental impacts of multi-storey buildings using different construction materials: Ministry of Agriculture and Forestry, New Zealand.
- Kaethner, S., & Burrige, J. (2012). Embodied CO2 of structural frames. *The Structural Engineer*, May, 33-40.
- Khan, F. (1968). Column-Free Box-Type Framing with and Without Core. *8th Cong. of the Int. Assoc. for Bridge and Structural Engineering.*, New York.
- Khasreen, M., Banfill, P. F., & Menzies, G. (2009). Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review. *Sustainability*, 1(3), 674-701.
- Lützkendorf, T., Foliente, G., Balouktsi, M., & Wiberg, A. H. (2014). Net-zero buildings: incorporating embodied impacts. *Building Research & Information*, 43(1), 62-81. doi: 10.1080/09613218.2014.935575
- Mahasenani, N., Smith, S., & Humphreys, K. (2003). The Cement Industry and Global Climate Change: Current and Potential Future Cement Industry CO2 Emissions. In J. G. Kaya (Ed.), *Greenhouse Gas Control Technologies - 6th International Conference* (pp. 995-1000). Oxford: Pergamon.
- Moldal, B. (2014). Skedsmo Betong: Ferdigbetong B30 M60 180. In S. Fossdal & A. Rønning (Eds.), *Environmental Product Declaration*. The Norwegian EPD Foundation.
- Moncaster, A. M., & Song, J. Y. (2012). A comparative review of existing data and methodologies for calculating embodied energy and carbon of buildings. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 3(1), 26-36. doi: 10.1080/2093761X.2012.673915
- Moncaster, A. M., & Symons, K. E. (2013). A method and tool for 'cradle to grave' embodied carbon and energy impacts of UK buildings in compliance with the new TC350 standards. *Energy and Buildings*, 66(0), 514-523. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.046>
- NorBetong. (2012). Lavkarbonbetong - et bevisst valg for lavere utslipp (Lowcarbonconcrete - a conscious choice for lower emissions). Postboks 203 Lilleaker, 0216 Oslo, Norway: NorBetong AS.
- Nordqvist, J., Boyd, C., & Klee, H. (2002). Three Big Cs: Climate, Cement and China. *Greener Management International*, 2002(39), 68-82.

- Norman, J., MacLean, H., & Kennedy, C. (2006). Comparing High and Low Residential Density: Life-Cycle Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions. *Journal of Urban Planning and Development*, 132(1), 10-21. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9488(2006)132:1(10)
- Nässén, J., Holmberg, J., Wadeskog, A., & Nyman, M. (2007). Direct and indirect energy use and carbon emissions in the production phase of buildings: An input–output analysis. *Energy*, 32(9), 1593-1602. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2007.01.002>
- Ollendorff, M. (2012). Powerhouse - Innebygget energi og klimagassregnskap for bæresystemene (pp. 276): Institutt for konstruksjonsteknikk.
- Ordóñez, J., & Modi, V. (2011). Optimizing CO2 emissions from heating and cooling and from the materials used in residential buildings, depending on their geometric characteristics. *Building and Environment*, 46(11), 2161-2169. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.030>
- Paya-Zaforteza, I., Yepes, V., Hospitaler, A., & González-Vidoso, F. (2009). CO2-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing. *Engineering Structures*, 31(7), 1501-1508. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.034>
- Petek Gursel, A., Masanet, E., Horvath, A., & Stadel, A. (2014). Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. *Cement and Concrete Composites*, 51(0), 38-48. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.005>
- PlasticsEurope. High density polyethylene (HDPE) *Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers*: PlasticsEurope Association of Plastics Manufacturers,.
- Ramesh, T., Prakash, R., & Shukla, K. K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, 42(10), 1592-1600. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.007>
- Ruuska, A. P., & Häkkinen, T. M. (2014). The significance of various factors for GHG emissions of buildings. *International Journal of Sustainable Engineering*, 1-14. doi: 10.1080/19397038.2014.934931
- Santero, N., Lahd, H., & Marceau, M. (2014). NRMCA National Ready Mixed Concrete Association: NRMCA Member industry-wide EPD for ready mixed concrete. In J. R. M. Tom Bruursema (Ed.), *Environmental Product Declaration*. 789 N. Dixboro, Ann Arbor, MI 48105, USA: NSF International.
- Sartori, I., & Hestnes, A. G. (2007). Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy and Buildings*, 39(3), 249-257. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.001>
- Sharma, A., Saxena, A., Sethi, M., Shree, V., & Varun. (2011). Life cycle assessment of buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 871-875. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.008>
- Shipworth, D. (2002). A stochastic framework for embodied greenhouse gas emissions modelling of construction materials. *Building Research & Information*, 30(1), 16-24. doi: 10.1080/09613210110090412
- Sigrid Nordby, A. (2011). Carbon reductions and building regulations: the case of Norwegian mountain cabins. *Building Research & Information*, 39(6), 553-565. doi: 10.1080/09613218.2011.604280
- Sodagar, B., Rai, D., Jones, B., Wihan, J., & Fieldson, R. (2010). The carbon-reduction potential of straw-bale housing. *Building Research & Information*, 39(1), 51-65. doi: 10.1080/09613218.2010.528187
- Standards Norway. (2011a). NS-EN 15643-2:2011, Sustainability of construction works - Assessment of buildings - Part 2: Framework for the assessment of environmental performance.

- Standards Norway. (2011b). NS-EN 15978:2011, Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings, Calculation method.
- Standards Norway. (2012). NS-EN 15804:2012, Sustainability of construction works - Environmental product declarations, Core rules for the product category of construction products.
- Steadman, P. (2014). *Building Types and Built Forms* (Kindle Edition ed.). Leicestershire: Matador.
- Säynäjoki, A., Heinonen, J., & Junnila, S. (2011). *An empirical evaluation of the significance of the carbon spike in the construction*. Paper presented at the SB11 Helsinki World Sustainable Building Conference, Helsinki, Finland.
- Takano, A., Hughes, M., & Winter, S. (2014). A multidisciplinary approach to sustainable building material selection: A case study in a Finnish context. *Building and Environment*, 82(0), 526-535. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.026>
- Thomas, L. E. (2010). Evaluating design strategies, performance and occupant satisfaction: a low carbon office refurbishment. *Building Research & Information*, 38(6), 610-624. doi: 10.1080/09613218.2010.501654
- Trabucco, D. (2008). An analysis of the relationship between service cores and the embodied/running energy of tall buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 17(5), 941-952. doi: 10.1002/tal.477
- Treloar, G. J., Fay, R., Ilozor, B., & Love, P. E. D. (2001). An analysis of the embodied energy of office buildings by height. *Facilities*, 19(5/6), 204-214. doi: 10.1108/02632770110387797
- UK Cares. (2014). Carbon Steel Reinforcing Bar (secondary production route – scrap), Sector Average. In E. Gbembajé-Das & K. Allbury (Eds.), *Environmental Product Declaration*. Garston, Watford WD25 9XX, UK: BRE Global LTD.
- Viola, J. (2012). *Derivation of reliable simplification strategies for the comparative LCA of individual and "typical" newly built Swiss apartment buildings*. Diss., Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 20608, 2012.
- Xing, S., Xu, Z., & Jun, G. (2008). Inventory analysis of LCA on steel- and concrete-construction office buildings. *Energy and Buildings*, 40(7), 1188-1193. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.10.016>
- Zhang, J., Cheng, J. P., & Lo, I. C. (2014). Life cycle carbon footprint measurement of Portland cement and ready mix concrete for a city with local scarcity of resources like Hong Kong. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(4), 745-757. doi: 10.1007/s11367-013-0689-7

Del II: Prosessrapport

1. Innledning

Denne prosessrapporten vedrører artikkelen «Investigating the "CO₂-premium" for building height» som konstituerer første del av masteroppgaven. Denne artikkelen omtales som nettopp «artikkelen» videre i prosessrapporten. Prosessrapporten fungerer som et utdypende tillegg til artikkelen, men også som en beskrivelse av arbeidet og studien som er utført i en grad som ikke er passende for en vitenskapelig artikkel. Prosessrapporten presenterer i hovedsak momenter som ikke diskuteres i artikkelen. I noen grad gir prosessrapporten allikevel gjentagelser av innhold fra artikkelen, dette er nødvendig for å opprettholde lesbarheten til prosessrapporten. Dette er for eksempel tilfelle når momenter omtalt i artikkelen presiseres eller utdypes.

Prosessrapporten er strukturert som følger. I dette første hovedavsnittet presenteres tema og problemstillingen. I det andre hovedavsnittet drøftes rammene for studien. Dette inkluderer en diskusjon rundt metodiske forhold og gjennomføringsprosessen. Det tredje hovedavsnittet omhandler beslutningsprosessen underveis i studien. Det fjerde presenterer noe av litteraturen som ble avdekket i litteraturstudien, men som ikke ble benyttet i artikkelen. Det femte gir en utdypet diskusjon av resultatene. Det sjette gir anbefalinger om videre arbeid. I det sjuende hovedavsnittet diskuteres arbeidsfordelingen ved utarbeidelsen av artikkelen.

1.1 Temabakgrunn

FNs klimapanel (*The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*) bekreftet og stadfestet alvorligheten av konsekvensene av de menneskeskapte klimaendringene i sin femte rapport. Rapporten fastslår at menneskeskapte klimagassutslipp er en av hovedårsakene til slike klimaendringer (IPCC, 2014b). Byggesektoren forårsaker signifikante utslipp av klimagasser. Eksempelvis forårsaket bygningssektoren 19 % av de globale energi-relaterte utslippene av klimagasser i år 2010 (IPCC, 2014a).

Byggesektorens utslipp av klimagasser kan også settes inn i en norsk kontekst. Stortinget har vedtatt en målsetning om reduksjon av klimagassutslipp tilsvarende 30 % av Norges utslipp (i 1990) innen 2020, og at Norge skal være karbonnøytralt innen 2050 (Miljøverndepartementet, 2012). Bygningssektoren i Norge forårsaker store utslipp:

«Oppføring og drift av bygninger tilsvarer rundt 13,5 pst. av de totale norske utslippene av klimagasser. Av disse er 9,2 pst. relatert til produksjon og transport av byggevarer og til bygg- og anleggsvirksomhet.» (Landbruks- og matdepartementet, 2011)

Det er vanlig å sette bygningers klimagassutslipp i sammenheng med livsløpsfasene til bygg. I artikkelen diskuteres forholdet mellom klimagassutslipp fra bygningers operasjonelle energiforbruk (OE) under bruksfasen, og klimagassutslipp fra produksjonen av materialer til oppføring av bygg under materialfasen (også kalt produktfasen). Det påpekes at bruksfasen er den viktigste livsløpsfasen i konvensjonelle bygningers livsløp med tanke på bygningers klimagassutslipp. Det påpekes videre at IPCC fokuserer på utslipp fra OE som klimatiltak i byggesektoren, men argumenteres for at klimagassutslipp fra materialfasen kan bli viktigere med framveksten av mer energieffektive bygg.

I artikkelen framheves IPCCs forslag om kompakt bystruktur (*Compact urban form*) som klimatiltak; en mer kompakt bystruktur kan gi reduserte utslipp fra samferdselssektoren ved redusert og mer miljøvennlig transport. Redusert og mer miljøvennlig transport kan videre gjøre materialfasen til bygg relativt viktigere.

Kompakt bystruktur som miljøtiltak eksisterer ikke bare som forslag fra IPCC. Den norske regjeringen har lagt en målsetting nettopp om at det skal utvikles mer konsentrerte byer (Miljøverndepartementet, 2013). Programmet Framtidens Byer er et eksempel på at en i stadig større grad ser klimagassutslipp fra bygg i sammenheng med klimagassutslipp fra transportsektoren (Kommunal- og moderniseringsdepartementet, 2015); hvor og hvordan vi bor og jobber har sammenheng med hvordan vi lever og reiser. Skal en oppnå en kompakt bystruktur, må en endre hva og hvordan en bygger. Som framhevet i rapporten fra Miljøverndepartementet «Den moderne bærekraftige byen», kan fortetning oppnås med ulike bygningsstrukturer, der høyere bygg er ett potensielt tiltak (Miljøverndepartementet, 2013).

I en mer miljøvennlig framtid må byggesektoren bli mer miljøvennlig. Skal byggesektoren bli mer miljøvennlig, er kunnskap om klimagassregnskapene til bygg essensielt.

Klimagassregnskapene til bygg avhenger av hvilke bygg som bygges. Hvilke bygg som bygges kan påvirkes av tiltak med utgangspunkt i andre sektorer; for eksempel mer kompakte bystrukturer med mål om å redusere transportutslipp. Samtidig kan hvilke bygg som bygges påvirke utslipp fra andre sektorer. Byggesektoren er derfor ikke bare interessant i et miljøperspektiv fordi sektoren bidrar signifikant til utslipp av klimagasser i seg selv, men også fordi hvilke bygg som bygges kan påvirke utslipp fra andre sektorer.

1.2 Problemstilling

I artikkelen beskrives en potensiell «CO₂-premie» for bygningshøyde; økte klimagassutslipp per m² etasjeareal som følge av flere etasjer i et bygg. Dette forklares med behov for økt bæring. Flere etasjer medfører økte vertikale laster, samt økte horisontale vindlaster. Økte laster krever økt bæring. Økt bæring medfører økt materialbruk, som kan resultere i økte klimagassutslipp grunnet materialbruken. Det kan derfor eksistere en sammenheng mellom antall etasjer i et bygg og klimagassutslipp per m² etasjeplate.

Artikkelen gir en diskusjon rundt litteratur som omhandler sammenhengen mellom antall etasjer og klimagassutslipp til bygg. I artikkelen kommer det frem hvordan denne sammenhengen ikke er fullstendig kartlagt. Det er ikke gjort nok forskning på temaet til å vite hvilke bygningskomponenter for hvis klimagassutslipp må korrelere, ikke korrelerer, eller kan korrelere med antall etasjer i et bygg. Som omtalt i artikkelen kan en for eksempel tenke seg at klimagassutslipp knyttet til lastbærende bygningskomponenter vil øke med antall etasjer i et bygg, mens klimagassutslipp fra ikke-lastbærende komponenter ikke nødvendigvis korrelerer med antall etasjer.

Litteratursøket utført i forbindelse med denne studien har ikke avdekket litteratur som kvantifiserer en sammenheng mellom antall etasjer i et bygg, og klimagassutslippene til materialbruken for bæresystemet i et bygg. Det eksisterer dermed et kunnskapshull – et

informasjons vakuum – vedrørende klimagassutslipp fra bæresystemers materialbruk i forhold til antall etasjer i bygg.

På dette grunnlag kan en argumentere for at kompakt bystruktur er identifisert som miljøtiltak uten at alle miljøkonsekvenser av et slikt tiltak er kartlagt og estimert. En CO₂-premie for å bygge høyt kan potensielt ha negativ innvirkning på kompakt bystruktur som miljøtiltak. Det er derfor av samfunnsmessig og vitenskapelig interesse å undersøke og estimere en slik premie, og slik fylle en del av det kunnskapshullet som eksisterer i litteraturen i dag.

Det overliggende målet til denne oppgaven – inkludert artikkelen – er å fylle en del av dette kunnskapshullet som omtales i overstående avsnitt. Oppgaven søker å trekke linjer i ett komplekst landskap av forskjellige bæresystemer, materialvalg, og teknologiske forhold for materialproduksjon, i forhold til antall etasjer og klimagassregnskap for bygg. I artikkelen konkretiseres de tilknyttede forskningsspørsmålene for studien.

2. Rammer for studien

Dette avsnittet omhandler rammene for studien, studien som danner basisen for artikkelen. Avsnittet er delt i seks underavsnitt: Teori, Litteraturstudien, Omfangsbegrensning, Datainnsamling, Beregningsprosessen, og Resultatenes troverdighet. Disse avsnittene beskriver på sett og vis progresjonen i arbeidet som er utført; fra teorien som danner bakgrunnen for oppgaven og litteraturstudien som danner fundamentet for studien, til vurdering av resultatene.

2.1 Teori

I dette avsnittet presenteres bakgrunns-teori, som et tillegg til teorien som presenteres i artikkelen. Avsnittet presenterer sentrale begreper. Noen av disse begrepene er definert også i artikkelen, men det er viktig å definere også de norske oversettelsene som benyttes i denne prosessrapporten.

I artikkelen beskrives hvordan bygningers miljøpåvirkning kategoriseres etter hvilken av byggets livsløpsfase miljøpåvirkningen kan sies å tilhøre. Det eksisterer ulike inndelinger av livsløpsfasene til bygg, og ulike begreper benyttes. I artikkelen presenteres de engelske begrepene som benyttes. I denne prosessrapporten benyttes tilsvarende norske begreper. For å motvirke eventuelle misforståelser presenteres inndelingen av livsløpsfasene til bygg med de norske begrepene som benyttes i denne prosessrapporten i Figur A.

Før bruk-stadium		Brukstadium - bruksfasen	Livsløpets slutt-stadium - Avhendingsfasen
Produktfase- Materialfase <ul style="list-style-type: none"> • Forsyning av råmaterialer • Transport • Produksjon 	Byggefase - Gjennomføringsprosess <ul style="list-style-type: none"> • Transport • Bygge-/monteringsprosess 		

Figur A: Bygningers livsløpsfaser. Basert på Figur 3, side 18, NS-EN 15643-1:2010, Standard Norge (2010), og Figur 3 side 19, NS-EN 15643-2:2011, Standard Norge (2011a).

NS-EN 15643-1:2010, Standard Norge (2010), definerer livsløp som «*fortløpende og sammenkjedete faser i det aktuelle objektets levetid*» (s. 9). De analyser som gjøres i denne oppgaven kan derfor ikke anses å være livsløpsvurderinger da vurderingene ikke gjøres på bakgrunn av hele livsløp, men er begrenset til én livsløpsfase.

Denne oppgavens beregninger er begrenset til materialfasen, og dens miljøpåvirkning. NS-EN 15643-1:2010, Standard Norge (2010), definerer miljøpåvirkning som «*endring i miljøet, uansett om den er ugunstig eller gunstig, som helt eller delvis er et resultat av miljøaspekter*» (s. 8), der miljøaspekter ved byggverk er «*del av byggverk (3.1) prosesser, prosesser eller tjenester knyttet til deres livsløp som kan forårsake endring i miljøet*» (s. 8).

Videre omhandler denne oppgaven ikke alle typer miljøpåvirkning. Oppgaven er begrenset til å omhandle klimagassutslipp. Klimagassutslipp relateres til indikatoren globalt oppvarmingspotensial (*global warming potential, GWP*). NS-EN 15978:2011, Standard Norge (2011b), definerer indikator som en «*kvantifisert verdi i forbindelse med*

miljøpåvirkning/miljøaspekter» (s. 9). Kg CO₂-ekvivalenter benyttes som enhet i denne oppgaven for klimagassutslipp og GWP i samsvar med NS-EN 15978:2011.

Enheten CO₂-ekvivalenter benyttes for å relatere alle typer klimagasser til én enkelt enhet (IPCC, 2013). Enheten tar utgangspunkt i det såkalte oppvarmingspotensialet til de ulike typene klimagasser. En kan på bakgrunn av oppvarmingspotensialet beregne mengden CO₂ utslipp andre klimagassutslipp tilsvarer. Slik er CO₂-ekvivalenter en enhet som alle klimagasser kan relateres til, og ikke bare CO₂. Beregning av CO₂-ekvivalenter utføres med en bestemt tidshorison. Eksempelvis er Kyoto Protokollen basert på kalkulasjoner av globalt oppvarmingspotensial av klimagasser i et 100-års perspektiv (IPCC, 2013).

2.2 Litteraturstudien

All data og informasjon benyttet i denne studien er basert på litterære kilder. Dette er for eksempel tilfelle for de to hovedfaktorene i kalkulasjonsmodellen: materialmengder og utslippsfaktorer. Videre har selve fundamentet for artikkelen bakgrunn i litteraturen; målet bak studien var å fylle et kunnskapshull i litteraturen. Det ble gjennomført litteratursøk med flere motiver, og i flere faser av arbeidet; en kan si at det ble gjennomført flere litteraturstudier som ledd i utarbeidelsen av artikkelen, eller at én litteraturstudie ble utført gjennom hele studien.

En kan definere tre overliggende formål for litteraturstudien:

- Kartlegge prinsippal kunnskap innenfor fagfeltet.
- Anskaffe inndata til kalkulasjonsmodellen.
- Identifisere støtte-litteratur som kilder til bruk i artikkelen.

Underliggende disse formålene skulle litteraturstudien kartlegge:

- Litteratur som omhandler miljø-tematikk i forhold til materialbruk i bygg.
- Litteratur for hvis det er utført livssyklusanalyser (LCA) av bygg.
- Litteratur som omhandler materialbruk i bæresystem i bygg, i forhold til antall etasjer.
- Litteratur som omhandler miljø-tematikk i forhold til bygg og antall etasjer i bygg
- Litteratur som omhandler utslippsfaktorer for byggematerialer; deriblant LCAer av byggematerialer, norske og internasjonale EPDer, utslippsfaktorer i databaser, og utslippsfaktorer benyttet i annen litteratur. Dette ble gjennomført i hovedsak for konstruksjonsstål, armeringsstål, og betong.

Videre ble oversiktsartikler (*review articles*) søkt etter og gjennomgått spesielt.

Litteratursøkene ble gjort ved bruk av søkemotorer som *Google*, *Google Scholar*, *DiVA*, *BIBSYS Ask*, *ScienceDirect*, *Taylor & Francis Online*, *Wiley Online Library*, *MDPI*, *Compendex* og *ResearchGate*. Et mangfold av søkeord ble benyttet. For eksempel kombinasjoner av: *CO₂*, *carbon*, *GHG*, *embodied carbon*, *embodied energy*, *life cycle analysis/assessment*, *LCA*, *environmental impact*, *product stage*, *structural system*, *loadbearing system*, *building frame*, *steel*, *concrete*, *material use*, og *material quantity estimations*.

Samtidig ble det lagt vekt på å undersøke indentifiserte kilders kildehenvisninger for å finne relevant litteratur som kanskje ikke ble funnet direkte gjennom litteratursøk. En slik «iterativ» undersøkelse av indentifiserte kilders referanser var også sentral for å indentifisere spesielt etablerte kilder innenfor fagfeltet.

Det ble lagt vekt på å indentifisere kilder fra et bredt spenn av vitenskapelige tidsskrift for å unngå en skjev kildebruk, for eksempel farget av ett spesielt vitenskapelig miljø, eller av fokuset til ett bestemt vitenskapelige tidsskrift. Imidlertid ble det gjennomført søk etter relevant litteratur særlig hos *Journal of Building Research and Information* som et ledd i vinklingen av artikkelen mot dette tidsskriftet. Litteraturstudien var videre ikke begrenset til vitenskapelige artikler; det ble også søkt etter relevante masteroppgaver, doktoravhandlinger, rapporter og miljødeklarasjoner (EPDer). Det ble for eksempel søkt etter både nasjonale og internasjonale EPDer som et ledd i kartleggingen av utslippsfaktorer.

Litteraturstudien avdekket langt flere kilder enn de som refereres til i artikkelen. Det ble gjort en vurdering av kildene, og en utvelgelse, basert på følgende aspekter:

- Forfatterne: Hvilke institusjoner forfatterne er affiliert til. Fagfeltet til hovedforfatterne, samt hvilke andre artikler hovedforfatterne har publisert.
- Publiseringsdato: Nyere artikler ble til en hvis grad prioritert.
- Type kilde og publikasjonssted: Fortrinnsvis ble litteratur publisert i vitenskapelige tidsskrift benyttet, eller andre kilder kontrollert av tredjepart (for eksempel kontrollerte EPDer)
- Tematikken til kildene, og det detaljerte innhold

I tilfeller hvor litteraturen er noe motstridende, ble det også lagt vekt på å inkludere kilder som støtter ulike perspektiver. Et konkret eksempel er referert litteratur som gjør miljømessige vurderinger av bygningers bæresystemer; både litteratur som indikerer stål, og litteratur som vurderer betong, som mest miljøvennlig, ble inkludert.

2.3 Omfangsbegrensning

Overliggende omfangsbegrensning for denne oppgaven – og artikkelen – er at studien er basert på data fra litteraturen. Det ble ikke gjort empirisk forskning som ledd i studien. Som konsekvens er omfanget av studien alltid begrenset av de data og informasjon litteratursøket for denne studien avdekket blant litteraturen. Eksempelvis vurderes bæresystemer av armert betong eller stål i artikkelen, men ikke trebaserte bæresystemer slik som bjelke/søyle-systemer av limtre, eller bæresystemer av massivtreelementer – det ble ikke avdekket data for materialmengder i litteraturen for slike bæresystemer.

Studien innebærer altså ikke empirisk forskning, men benytter data fra litteraturen. Studien er basert på datasett for materialmengder hentet fra to forskjellige kilder. Hvert av disse datasettene beskriver en bygning med varierende etasjehøyde. Datasettene utfyller hverandre med hensyn til etasjehøyde uten overlapp. Som en følge kan en si at studien er teoretisk case-basert; studien bruker data fra teoretisk bygg (med variable antall etasjer og bæresystem) til å si noe om generelle trender. Dette innebærer en vesentlig omfangsbegrensning da studien således ikke innbefatter et større utvalg av bygg.

De mer konkrete metodiske omfangsbegrensningene oppgis og diskuteres i artikkelen.

Oppsummert innbefatter de viktigste omfangsbegrensningene:

- Studien er avgrenset til materialbruken i bæresystemer, med andre ord lastbærende bygningskomponenter.
- Fundamenter er definert utenfor systemgrensen.
- Studien er begrenset til klimagassutslipp fra produksjon av materialer, altså materialfasen. Byggefase, det vil si transport av materialer til byggeplass og byggeprosessen, er ikke inkludert. Bruksfasen og livsløpets slutt-stadium er ekskludert.
- Studien inkluderer bygningshøyder fra 3 til 70 etasjer
- For bygningshøyder fra 3 til 12 etasjer innebærer vurderte bæresystem et bjelke/søyle-system av plass-støpt armert betong, med flatdekke og skjærvegger.
- For bygningshøyder 20 til 70 etasjer vurderes et bæresystem med en sentral kjerne av armert betong og en momentstiv ramme. Oppgaven omfatter tre ulike alternativer for dette bæresystemet; et stål-basert søyle/bjelke-system med kombinert stål-betong dekke; et bæresystem med søyler og flatdekke av armert betong; og et bæresystem med søyler og bjelker av armert betong med lettvekt betongdekke (lignende *Bubbledeck*).
- Utslippsfaktorene definert i artikkelen innebærer også en omfangsbegrensning. Andre utslippsalternativer enn de oppgitte er ikke vurdert. Bedre eller verre produksjonsforhold, eller produksjon av materialer utenfor Europa, inngår ikke.

Disse begrensningene danner rammeverket for beregningsmodellen for klimagassutslipp. Omfangsbegrensningene er beskrevet og begrunnet i detalj i artikkelen. Artikkelen diskuterer også mange av disse forutsetningene i forhold til litteraturen, og hvilken effekt begrensningene har på resultatene.

2.4 Datainnsamling

Som beskrevet i avsnitt 2.2 var en del av formålet for litteraturstudien å anskaffe inndata til kalkulasjonsmodellen. Kildene for denne dataen er beskrevet i detalj i artikkelen, og denne informasjonen vil ikke bli gjengitt her. Noen aspekter rundt utvelgelsen av disse kildene er derimot ikke beskrevet i artikkelen, og diskuteres derfor i dette avsnittet.

Som beskrevet i artikkelen ble det benyttet to ulike kilder for inputdata for materialmengder til modellen. Det ble derimot ikke gitt en videre begrunnelse for bruk av disse kildene, eller en kvalitetsmessig vurdering.

Data fra akkurat disse kildene ble benyttet fordi de tilveiebringer materialmengder for variable bygningshøyder. Kildene gir materialmengder per etasjehøyder innenfor fastlagte bygningskonsepter, bygningsdesign, og bæresystem. De to kildene som er benyttet er de eneste kildene litteraturstudien avdekket som tilveiebringer materialmengder for bæresystem på en slik måte. Det må videre framheves at identifiseringen av disse to kildene var et resultat av den store mengden med litteratur som ble gjennomgått gjennom litteraturstudien til denne oppgaven. Bak identifikasjonen av disse to kildene ligger en gjennomgang av et meget stort

antall kilder. Det synes ikke påfallende at litteraturstudien ikke avdekket flere lignende kilder for slike materialmengder; materialmengder for bæresystemer med variable antall etasjer synes hovedsakelig å virke interessant fra et forskningsmessig og teoretisk standpunkt. Mye litteratur er sentrert rundt reelle case-baserte senarioer som ikke naturliggjør beregning av materialmengder for variable antall etasjer. De to identifiserte kildene har problemstillinger lignende denne studiens problemstilling; kostnadsestimering av bygningers bæresystem i forhold til antall etasjer, og estimering av innebygd energi (*embodied energy*) i bygningers bæresystem i forhold til antall etasjer.

Ayensu and Jensen (2006) ble benyttet som kilde for materialdata for bygg 3 til 12 etasjer høye. Dette er en rapport sponset av *Portland Cement Association*, og rapporten kan på dette grunnlaget kritiseres for å ikke ha en industri-nøytral basis. Imidlertid er rapporten understøttet av *Civil Engineering Department at Lawrence Technological University*, og er en del av masteroppgaven til førsteforfatteren. Andreforfatteren var videre professor ved *Lawrence Technological University* ved utarbeidelsen, noe som kan sies å videre underbygge rapporten (Lawrence Technological University, 2015). Et annet aspekt ved bruk av materialdata fra denne kilden, er at kildens data er basert på amerikanske krav og metoder for dimensjonering av bæresystem. Dette står i kontrast til artikkelens antagelse om europeiske forhold ved materialproduksjon og utslippsfaktorer. Det ble allikevel antatt at materialmengder i bæresystem dimensjonert etter amerikanske krav er sammenlignbare med europeiske forhold. I artikkelen presiseres det også at bygningene basert på de to kildene er dimensjonert etter ulike bygningskonsepter og ulik dimensjoneringsmetodikk.

Foraboschi et al. (2014) ble benyttet som kilde for materialdata for bygg 20 til 70 etasjer høye. Denne artikkelen er publisert i det anerkjente vitenskapelige tidsskriftet *Energy and Buildings* og er således kvalitetssikret gjennom fagfelleevaluering. Det må videre påpekes at artikkelen benytter materialdataene på lignende måte som denne oppgaves artikkel; den vurderer miljøregnskap av bygningers bæresystem opp mot bygningshøyde. Det kan dermed tolkes som noe «frekt» å benytte de samme materialdataene til å gjøre lignende analyser ved bruk av en annen miljøparameter; CO₂ utslipp istedenfor innebygd energi. Når det er sagt gjøres dette ettertrykkelig klart i artikkelen, og fokuset i artikkelen er annerledes med bruk av utslippsenarioer og utvidelse til flere bygningshøyder, i tillegg til bruk av en annen miljøparameter.

Utslippsfaktorene som ble benyttet som inputdata i modellen er definert og begrunnet i artikkelen. I tillegg sammenlignes utslippsfaktorene i mange tilfeller med utslippsfaktorer fra annen litteratur. En av kildene for utslippsfaktorer gis allikevel en ytterligere kommentar her.

Flere av utslippsfaktorene benyttet i artikkelen refererer til Bawden (2013). Dette er en masteroppgave skrevet for *Rochester Institute of Technology*. En masteroppgave kan i utgangspunktet ikke sies å garantere den samme kvaliteten som de andre kildene på utslippsfaktorer referert i artikkelen gjør; database for utslippsfaktorer, EPDer, og fagfellevurderte artikler. Artikkelen inkluderer derfor sammenligninger opp mot annen litteratur, og det vises at faktorene understøttes av annen litteratur. Verdien fra Bawden (2013) ble derfor benyttet da oppgaven dekker et stort spenn av senarioer, og illustrerer på en

god måte artikkelens omtalte sammenheng med andel resirkulert stål samt produksjonslokasjon.

2.5 Beregningsprosessen

Dette avsnittet vedrører beregningsprosessen. Den overliggende metoden for beregningene er presentert i artikkelen og vil ikke gjentas her. Imidlertid gis det her en mer detaljert beskrivelse av gjennomføringsprosessen, ledd for ledd.

Som beskrevet i artikkelen ble dataene for materialmengder kombinert med utslippsfaktorer for materialene for kalkulasjon av klimagassutslipp fra materialproduksjonen. Dette er prinsipielt beskrivende for kalkulasjonsmodellen.

For scenarioene med 3, 7 og 12 etasjer ga innsamlet data materialmengder per bygningskomponent, per etasje. Dataene var gitt i ft^3 betong og lbs armeringsstål. Første ledd i beregningen var derfor omgjørelse til m^3 betong og kg armeringsstål. Deretter ble materialmengder tilhørende dekke på grunn lagt til, som omtalt i artikkelen. Andre ledd i beregningsprosessen var å addere materialmengder per bygningskomponent over samtlige etasjer – for eksempel addere mengde betong tilhørende alle etasjeskillere. Tredje ledd i kalkulasjonen var å multiplisere disse materialmengdene med utslippsfaktorer. Resulterende utslippsmengder per bygningskomponent var så basis for videre analyse. Utslippsmengdene ble dividert på areal og summert over alle bygningskomponenter.

For scenarioene med bygg fra 20 til 70 etasjer var kalkulasjonsprosessen noe annerledes. Materialmengdene var ikke tilgjengelig per bygningskomponent, men var oppgitt som adderte mengder for hele byggene per bygningsmateriale. Dataene var gitt i kN . Første ledd i beregningen var derfor omgjørelse til m^3 betong og kg armeringsstål. Deretter ble disse materialmengdene multiplisert med utslippsfaktorer, resulterende i utslipp per bygningsmateriale per scenario. Til sist ble utslippsmengdene dividert på areal og summert over alle bygningsmaterialer.

Videre ble resultatene sortert og tilpasset grafisk analyse. Det er verdt å påpeke i den sammenheng at selve kalkulasjonsmetodikken var prinsipielt enkel, men at den relativt store mengden med data og scenarioer nødvendiggjorde en nøyaktig sorteringsprosess. Alle beregninger ble utført i *Excel*. *SigmaPlot* ble benyttet til produksjon av figurer, basert på data importert fra *Excel*.

2.6 Resultatenes troverdighet

I dette avsnittet diskuteres resultatenes troverdighet. En slik diskusjon plasserer seg naturlig innenfor Rammer for studien, da resultatenes gyldighet må vurderes i sammenheng med nettopp studiens rammer. I avsnittet drøftes resultatene i forhold til begreper som validitet og reliabilitet, og avsnittet inkluderer en diskusjon rundt potensielle feilkilder og svakheter tilknyttet studien.

Yin (2003), definerer tre ulike typer validitet; konstrukt validitet, indre validitet, og ytre validitet. Den videre diskusjonen vedrørende disse begrepene gjøres på bakgrunn av denne kilden. Konstrukt validitet og indre validitet er i liten grad relevant å diskutere i denne

studiens sammenheng. Studien er av eksplorativ og deskriptiv art, og har således ikke utfordringene forklarende eller utforskende studier innehar.

Avgjørende for artikkelens diskusjon og konklusjon er hvorvidt resultatene har ytre validitet. Artikkelens konklusjon innebærer nettopp en antagelse om at resultatene har ytre validitet; analysen av de utvalgte byggene benyttes til å beskrive en generell sammenheng for alle bygg. Dette er en såkalt analytisk generalisering. Studiens metodikk er teoretisk case-basert; kun ett bygg for hvert antall etasjer ble studert. Basert på resultatene fra studien generaliseres en sammenheng. Analytisk generalisering innebærer således ikke fordelene såkalt statistisk generalisering innehar, hvor et større utvalg vurderes. En kan kritisere oppgavens generalisering da studien ikke inkluderer et større utvalg. Det kan prinsipielt tenkes at byggene og bæresystemene som vurderes i denne studien ikke er representative, og at andre bygg innehar andre sammenhenger for klimagassutslipp fra bæresystemers materialbruk i forhold til antall etasjer i bygg. Dette er allikevel en type kritikk som kan rettes mot all analytisk generalisering basert på case-studier. Det bør derfor gjøres flere lignende studier på andre bygg for å komplementere resultatene fra denne studien. I påvente av flere lignende studier fungerer generaliseringen utført på bakgrunn av denne studien som en teori, som kan forsterkes eller svekkes av resultatene fra andre studier. I artikkelen sammenlignes da også resultatene med andre lignende studier som kan sies å i noen grad underbygge denne studien. En kan også se studiens smale systemgrenser i sammenheng med studiens ytre validitet. Som diskutert i avsnitt 3.2, Metodiske beslutninger, ble systemgrensene definert relativt smalt for å unngå å måtte gjøre ytterligere antagelser i modellen. På dette grunnlag kan en argumentere for at resultatenes validitet ble styrket av de smale systemgrensene; det er relativt få antagelser og variabler i modellen som kan bestrides og argumenteres for å ikke være representative.

Resultatenes relabilitet er sterkt knyttet til dokumentasjon av metoden som er benyttet (Yin, 2003). De smale systemgrensene og den enkle beregningsmetodikken kan sees i sammenheng med resultatenes relabilitet. En kan argumentere for at studien har høy pålitelighet og etterprøvnbarhet som et resultat av den enkle beregningsmetodikken. Da metoden og inndataene (/kildene for inndata) til kalkulasjonen er gitt i artikkelen vil resultatene av studien kunne reproduseres av andre. Dette er da indikatorer på at studien har høy relabilitet.

En kan identifisere en rekke potensielle feilkilder som kan ha påvirket beregningsprosessen og resultatene, både systematiske og ikke-systematiske feilkilder. Feil eller unøyaktigheter i inputdataene til modellen kan for eksempel være opphav til systematiske feil. Materialdataene ble antatt å være korrekt; feil i disse dataene kan ikke avdekkes uten å reprodusere kildenes dimensjoneringsprosess. Utslippsfaktorene ble derimot valgt ut fra et spenn av estimerte utslippsfaktorer i litteraturen. Utslippsfaktorene som benyttes i studien er trolig unøyaktige. Utslippsfaktorer er alltid estimerer, og i dette tilfellet er de estimerer for noe så generelt som europeiske forhold. Utslippsfaktorene er sannsynligvis ikke 100 % korrekt, og dermed vil heller ikke resultatene være 100 % korrekt. Som diskutert i artikkelen er det allikevel resultatenes trender som er mest interessant, ikke de spesifikke verdiene. I tillegg kan en si at bruken av utslippssenarioer øker toleransenivået for unøyaktigheter ytterligere, da det vurderes et spenn av forskjellige utslippsfaktorer.

3. Valg- og beslutningsprosessen underveis

Grunnlaget for mange av de valg og beslutningsprosesser som ble gjort underveis i studien er diskutert i artikkelen, samt i hovedavsnitt 2., Rammer for studien. Imidlertid er utarbeidelsen av problemstilling et tema for hvis valg og beslutningsprosessen i mindre grad har blitt diskutert. I dette avsnittet gis derfor først en framstilling av valg og beslutningsprosessen forbundet med utarbeidelsen av problemstillingen og valg av metode. Deretter gis noen ytterligere presiseringer av enkelte metodiske beslutninger for hvis grunnlag ikke er gitt i artikkelen eller overstående avsnitt.

3.1 Utarbeidelse av problemstilling og mål

I innledningen av denne studien ble det arbeidet med en skisse til problemstilling som skiller seg fra problemstillingen beskrevet i avsnitt 1.2. Denne skissen var i likhet med problemstillingen beskrevet i avsnitt 1.2. fokusert på klimagassutslipp fra materialbruk knyttet til bæresystemer, men sentrert rundt trebaserte bæresystemer. Skissen var basert på prosjektoppgaven utarbeidet i foregående semester med tittel «Materialbruk i trebaserte etasjeskillere i fleretasjes bygg», og siktet på å utvide denne til materialbruk i hele bæresystemer, samt estimere klimagassutslipp basert på disse materialmengdene. I den sammenheng ble det forsøkt to strategier for å estimere materialmengder for trebaserte bæresystemer. Den første strategien innebar en litteraturstudie. Litteraturstudien ble utført med lignende metodikk som beskrevet i avsnitt 2.2, hvor formålet var å identifisere kilder for materialdata for bæresystemer av tre med antall etasjer som variabel. Denne første strategien måtte skrinlegges da litteraturstudien ikke avdekket noen kilder for materialdata for trebaserte bærekonstruksjoner i forhold til antall etasjer. Det ble på dette grunnlag undersøkt en annen strategi; å gjennomføre enkel estimering av materialmengder basert på dimensjoneringsregler. Denne strategien ble ikke gjennomført. En slik enkel estimering ville trolig måtte begrenses til vertikale laster; det ville vært teknisk krevende og utenfor rekkevidden av en masteroppgave å gjennomføre gode estimeringer av nødvendig materialbruk grunnet vindlaster, seismiske laster og brannkrav. Som omtalt i artikkelen er vindlaster avgjørende for materialbruk for høyere bygninger, og denne strategien ble på dette grunnlaget frafalt. Det ble derfor valgt å skifte problemstillingen i oppgaven i en mindre konstruksjonsteknisk retning.

En ny skisse til problemstilling gikk bort ifra det ensidige fokuset på trebaserte konstruksjoner. Rammene for litteraturstudien ble endret til hva som er beskrevet i avsnitt 2.2, Problemstilling. Det må her påpekes at kildene for materialdata ikke ble avdekket før senere i prosessen. Grunnet mangelen på kilder for materialdata for variable antall etasjer, var fokuset derfor på enkeltstående case-baserte LCAer. Det ble søkt etter litteratur som oppgir beregninger av miljøregnskap for bygninger fordelt på bygningskomponenter. Tanken var at om man har klimagassutslipp per bygningsdel for mange bygg med varierende antall etasjer, kan man kontrollere for andre faktorer og etablere en sammenheng. Denne strategien ble fraviket da det ble avdekket få kilder med resultater per bygningskomponent. Det framstod som trolig at datagrunnlaget ikke kunne bli tilstrekkelig for å gjøre slutninger på tvers av bygninger som varierer med tanke på arkitektoniske og tekniske spesifikasjoner. Samtidig som denne metodiske strategien viste seg vanskelig å gjennomføre, ble kildene for

materialdata avdekket. Dette naturliggjorde et skifte av ramme for studien og metodikk til hva som er beskrevet i denne oppgaven, og i artikkelen.

3.2 Metodiske beslutninger

Det metodiske valget å ekskludere prosessen transport av materialer til byggeplass samt konstruksjonsprosessen fra systemet, diskuteres i forhold til litteraturen i artikkelen. I mindre grad diskuteres derimot årsakene bak disse beslutningene. For det første var det et behov for å begrense omfanget av studien. Utvidelse av systemgrensen ville resultert i en større modell, behov for mer data og kalkulasjon, og dermed et større arbeidsomfang. For det andre ville en utvidelse av modellen medført behov for flere antagelser. I litteraturen er for eksempel beregninger av transportutslipp utført med svært forskjellige antagelser. Asdrubali, Baldassarri and Fthenakis (2013) antar 50 km transportdistanse for alle bygningsmaterialer, Tae, Baek and Shin (2011) benytter 30 km for alle bygningsmaterialer, mens Doodoo, Gustavsson and Sathre (2014) benytter 300 km transportdistanse i sitt referanse scenario. Inkludering av transport innenfor systemgrensen ville således påkrevd antagelser. Antagelser som potensielt kan bestrides, som kunne ha påvirket resultatene, og således trukket fokus bort fra mål og problemstillingen til artikkelen.

Beslutningen om å ekskludere fundament fra systemgrensen diskuteres også i artikkelen opp mot litteraturen, men det gis i liten grad noen begrunnelse for dette valget. Data for materialmengder for fundament er ikke inkludert i kildene for materialmengder. Å inkludere fundament ville derfor påkrevd separate estimater. For det første ville dette medført et betydelig arbeidsomfang. For det andre ville slike estimater påkrevd antagelser som i likhet med transportberegninger kunne forstyret fokuset og målet til artikkelen. For det tredje ville det vært vanskelig å utføre slike estimater på likt grunnlag, og med samme nøyaktighetsnivå, som estimatene av materialmengder fra kildene. Dataene fra disse kildene er basert på dimensjonerte verdier, og en kan vanskelig dimensjonere verdier for fundament uten detaljert informasjon om for eksempel grunnforhold (personlig kommunikasjon, Professor T. Kanstad, NTNU, 12. desember, 2014).

3.3 Fastsettelse av utslippsfaktorer

Som beskrevet i avsnitt 2.2 var et av formålene med litteraturstudien å kartlegge utslippsfaktorer i litteraturen. Utslippsfaktorene som ble benyttet som inputdata i modellen er presentert og begrunnet i artikkelen. Enkelte av utslippsfaktorene som benyttes er også sammenlignet med utslippsfaktorer fra annen litteratur i artikkelen. Arbeidet med å identifisere disse utslippsfaktorene var likevel mer omfattende enn hva som framkommer av artikkelen. Dette avsnittet gir derfor en sammenstilling av den litteraturen som ble vurdert.

Tabell A sammenstiller utslippsfaktorene som ble vurdert for konstruksjonsstål. Faktorene i tabellen er sortert etter % resirkulert stål i produksjonen. Tabellen illustrerer hvordan utslippsfaktorene i stor grad korrelerer med andel resirkulert stål. Utslippsfaktorene som er benyttet i kalkulasjonen er uthevet i tabellen, og illustrerer således hvordan faktorene representerer scenarioer. Merk at de ulike verdiene gitt i tabellen kan gjelde råstål eller ulike typer produkter basert på konstruksjonsstål, uten at det gjøres noen videre analyser på dette nivået. Merk videre at ulike kilder oppgir varierende nøyaktighetsnivå på faktorene.

Tabell A: Utslippsfaktorer for konstruksjonsstål fra litteraturen.

Kilde	Type kilde	% resirkulert stål	Produksjonssted	Utslippsfaktor kg CO₂-eq/kg stål
Burchart-Korol (2013)	LCA	0	Polen	2.495
Bawden (2013)	LCA	0	USA	2.4
Bawden (2013)	LCA	0	EU	2.3
Fet (2014a)	EPD	13	EU. Importert til Norge	2.29
Fet (2014b)	EPD	13	EU. Importert til Norge	2.1
Bawden (2013)	LCA	25	USA	2
Bawden (2013)	LCA	25	EU	1.9
bauforumstahl e.V. (2013)	EPD	Ukjent	EU	1.735
bauforumstahl e.V. (2010)	EPD	50	EU	1.68
Bawden (2013)	LCA	50	USA	1.6
Bawden (2013)	LCA	50	EU	1.5
Bawden (2013)	LCA	75	USA	1.2
Bawden (2013)	LCA	75	EU	1
Zygomalas, Efthymiou and Baniotopoulos (2011)	LCA	100	Hellas	1.495
Fet (2014c)	EPD	Ukjent	EU. Importert til Norge	1.16
Burchart-Korol (2013)	LCA	100	Polen	0.913
Celsa Barcelona (2011)	EPD	100	Spania	0.67
Celsa Group (2014)	EPD	100	Spania + Polen	0.632
Almemark (2012)	EPD	100	Norge	0.36

Tabell B: Utslippsfaktorer for betong fra litteraturen. Utslippsfaktorenes enhet er i enkelte tilfeller omgjort og/eller avrundet.

Kilde	Type kilde	Merknad	Utslippsfaktor kg CO ₂ -eq/m ³ -betong			
			B25	B30	B35	B40
Santero et al. (2014)	EPD	USA. Gjennomsnitt		416		536
Hammond and Jones (2011)	Database	Britisk gjennomsnitt Ingen flygeaske		348		442
Flower and Sanjayan (2007)	LCA	Australia. Ordinær produksjon	290	322		
Hammond and Jones (2011)	Database	Britisk gjennomsnitt 30 % flygeaske		291		364
Hammond and Jones (2011)	Database	Britisk vektet gjennomsnitt		282		355
Flower and Sanjayan (2007)	LCA	Australia. Lavutslippssenario	225	251		
Santero et al. (2014)	EPD	USA. Gjennomsnitt		250		318
Skjæveland and Brekke (2013)	EPD	Norge		244		
NorBetong (2012)	Kriterie	LavKarbon B	220	235	250	260 ekstrapolert
InformationsZentrum Beton GmbH (2013a)	EPD	Tysk gjennomsnitt	211	232	265	
Aarstad (2012)	EPD	Norge		214		
NorBetong (2012)	Kriterie	LavKarbon A	200	205	210	220 ekstrapolert
Gustad and Gulbrandsøy (2014)	EPD	Norge		204		
Moldal (2014)	EPD	Norge		195		
Skjæret (2013)	EPD	Norge		190		

Tabell B sammenstiller utslippsfaktorer for betong. Utslippsfaktorene gjelder for ferdigbetong og fabrikkbetong av ulike typer og styrkegrad. Noen av kildene oppgir en andel av sement i betongen som erstattes av additiver slik som flygeaske. Slike additiver benyttes i flere av disse kildenes vurderte betongblandinger, uten at en andel er oppgitt. Slike additiver kan således være opphav for en del av variasjonen som fremkommer av tabellen. Utslippsfaktorene som er benyttet i kalkulasjonen er uthevet i tabellen. Merk at referansesenarioet for betongproduksjon (uthevet, Britisk vektet gjennomsnitt) er lagt noe høyt i forhold til mange av kildene. Eksaminasjonen av kildene indikerte en tendens for at litteraturen – og spesielt EPDer – er gjeldende for betongtyper med relativt lave utslippsfaktorer. En kan si at litteraturen fokuserer på relativt miljøvennlige scenarioer. Referansenivået ble av denne årsaken lagt relativt høyt.

4. Litteratur som ikke ble benyttet i den vitenskapelige artikkelen.

Som beskrevet i avsnitt 2.2, var litteraturstudien for denne oppgaven langt bredere enn hva som framkommer av artikkelen. I dette avsnittet gis en presentasjon av noe av litteraturen som ikke ble benyttet i artikkelen. Litteraturen som presenteres utpekte seg som spesielt interessant, og er derfor verdt å omtale, men hensikten med avsnittet er å få frem det brede spekter av kilder som ble gjennomgått i arbeidet med denne artikkelen i søken etter den relativt spesifikke tematikken som tas opp i artikkelen.

Robertson, Lam and Cole (2012) utførte en komparativ LCA av en fem-etasjes kontorbygning. Et bygg basert på bæresystem av tre ble sammenlignet med et bygg med et betong-basert bæresystem. Begge strukturelle alternativene var basert på søyle/bjelke-systemer. Kilden oppgir materialmengder per bygningsdel. For de fleste miljøkategorier ble det tre-baserte alternativet beregnet å være mer gunstig enn det betong-baserte. Dette gjelder blant annet utslipp av klimagasser. Denne artikkelen er spesielt interessant fordi den vurderer bruk av tre som bæresystem i et stort bygg med flere etasjer.

Thormark (2007) sammenlignet tre lavenergibygg bygd i Sverige på grunnlag av energibehov i et livsløpsperspektiv. To to-etasjers rekkehus ble vurdert, i tillegg til ett 12-etasjers leilighetsbygg. Kilden oppgir ikke materialmengder eller klimagassutslipp per bygningsdel. Over et 50-års perspektiv står produksjon og transport av materialer for 60-75 % av det totale energibehovet. Kilden fokuserer ikke på sammenligning av resultatene for de tre byggene. Denne artikkelen er spesielt interessant fordi den viser hvor viktig materialbruken kan være i et livsløpsperspektiv for lavenergibygg.

Wallhagen, Glaumann and Malmqvist (2011) utførte en case-basert LCA av en 4 etasjes kontorbygning i Sverige. Kilden er spesielt interessant da den vurderer ulike bygningstekniske tiltak i et livsløpsperspektiv. Eksempelvis vurderes ekstra isolasjon i bygningsdeler, bedre vinduer, solpanel, bruk av tredekker istedenfor betongdekker, og skifte av energikilder. Tredekker som tiltak sparer eksempelvis 3555 kg CO₂-eq over livsløpet til bygningen.

Paleari, Lavagna and Campioli (2013) utførte en case-basert LCA av et italiensk leilighetskompleks med såkalt *nZEB*-energistandard. Det vil si at bygget har «nesten» ingen energibruk i bruksfasen. Artikkelen vurderer utslipp av klimagasser per bygningskomponent, og finner at bærestruktur står for 61 % av utslippene fra materialproduksjonen. Videre står før bruk-stadiet for 61 % av utslippene, det vil si produksjon av materialer, transport av materialer, og konstruksjonsprosessen. Artikkelen argumenterer på dette grunnlag at et ensidig fokus på energibruk i bruksfasen – slik som *nZEB*-standard – gir et feil fokus i forhold til miljøresultatene til et bygg sett i et livsløpsperspektiv. Artikkelen er således enda et argument for å sette fokus på materialbruk i et klimaperspektiv.

Waldron, Jones, Lannon, Bassett and Iorwerth (2013) sammenlignet bydeler basert på bygg med 15-16 etasjer, bygg med fem etasjer, og bygg med to etasjer. Kilden inkluderer simulering av energibruk pga. materialbruk og energibruk i bruksfasen. Resultatene indikerer at høyere bygg medfører totalt lavere energibruk ved materialbruk enn lave bygg per m²

bygningsareal. Materialbrukens energibruk inkluderer både bærende og ikke-bærende komponenter. Kilden oppgir ingen data for materialmengder; den er basert på en mer overordnet metodikk.

Nemry et al. (2008) er en omfattende rapport av EU-kommisjonens *Joint Research Centre*. Rapporten inneholder analyser av svært mange bygg, og har som mål å identifisere forbedringspotensialer for bygningers miljøregnskap. Rapporten vurderer nye og eksisterende bygg, fra mindre boligbygg til større leilighetskomplekser. Rapporten er spesielt interessant da den vurderer svært mange bygg med samme LCA-metodikk. Tabell C gir en sammenstilling av resultatene for noen av bygningene, begrenset til utslippene fra det rapporten omtaler som «Construction phase», bestående av produksjon av materialer og transport til byggeplass (ikke byggefasen). Tabellen inkluderer bygg bygd etter 2005, med 4 etasjer eller flere. Dataene presentert i Tabell C er sortert etter klimagassutslipp fra «Construction phase» fordelt over levetiden til bygget. Ingen klare sammenhenger kan leses ut ifra disse case-resultatene. De tre 10-etasjes byggene har ikke generelt høyere utslipp enn byggene med fire etasjer, og hverken lokasjon eller materialbruk gir klare sammenhenger med utslippsresultatene. Tabell C kan derfor sies å støtte opp om resultatene fra artikkelen. Den eventuelle CO₂-premie pga. klimagassutslipp fra bæresystemers materialbruk ved økte bygningshøyder er ikke betydelig nok til å medføre en generell sammenheng med antall etasjer. Rapporten indikerer derfor ingen betydelig CO₂-premie for bygningshøyde.

Tabell C: Utslippsberegninger fra case-studier. Utslipp fordelt over levetiden til byggene. Data fra Nemry et al. (2008).

Case	Location	Type	Exterior wall material	Floor material	Stories	Size [m²]	Construction phase emissions [kg CO₂-eq/m²*a]
Z3-MF_006	North-European	Multi-family	Wooden wall	Wooden flooring	4	384	3.3
Z1-HR_001	South-European	High-rise	Brick wall	Reinforced concrete	10	450	4
Z1-MF_008	South-European	Multi-family	Brick wall	Reinforced concrete	7	384	4.6
Z2-HR_002	Central-European	High-rise	Brick masonry	Reinforced concrete	10	450	4.7
Z2-MF_006	Central-European	Multi-family	Sandlime masonry	Reinforced concrete	4	384	5.8
Z1-MF_004	South-European	Multi-family	Breece concrete	Reinforced concrete	4	384	5.8
Z2-MF_005	Central-European	Multi-family	Brick wall	Reinforced concrete	4	384	6
Z3-HR_002	North-European	High-rise	Brick masonry	Reinforced concrete	10	450	6.3
Z1-MF_006	South-European	Multi-family	Brick wall	Reinforced concrete	4	384	6.5
Z3-MF_007	North-European	Multi-family	Brick masonry	Reinforced concrete	4	384	6.9
Z2-MF_007	Central-European	Multi-family	Concrete wall	Reinforced concrete	4	384	9.1

5. Utdypet diskusjon

I dette avsnittet utdypes diskusjonen presentert i artikkelen. Det er viktig å påpeke at de viktigste funnene og de viktigste diskusjonspunktene er gitt i artikkelen, og disse vil ikke gjentas her.

Et diskusjonstema som ikke ble drøftet i artikkelen vedrører utslippssenarioene. De tre scenarioene som vurderes, høye, middels, og lave utslippsfaktorer, inkluderer ikke potensielle sammensatte scenarioer. For eksempel sammenligner det mest gunstige utslippssenarioet lave utslipp ved stålproduksjon med lave utslipp ved betongproduksjon. En kan tenke seg sammensatte scenarioer; en framtidig utvikling hvor for eksempel betongindustrien realiserer større produksjonsforbedringer enn stålindustrien, og vice versa. Dette kan for eksempel resultere i at det lave utslippssenarioet er gjeldende for betong, men ikke for stål.

En kan tenke seg flere årsaker bak slike sammensatte scenarioer. For eksempel kan tilgangen på materialer vise seg å være en hindring. Globalt kan ikke etterspørselen etter stål dekkes av produksjon basert på resirkulert stål; tilgangen på stål til gjenvinning er for lav (Oda, Akimoto & Tomoda, 2013). Tilgangen på stål med lav utslippsfaktor kan på dette grunnlaget vise seg å være begrensende faktor for hvis det mest gunstige utslippssenarioet ikke kan realiseres for stål på et makronivå. En kan på dette grunnlag argumentere for at bruk av resirkulert stål i et bygg ikke vil resultere i reduserte klimagassutslipp globalt da «jomfruelig» stål må benyttes et annet sted. Dette er en diskusjon som har sammenheng med de systemgrenser en benytter ved kalkulasjon av utslippsfaktorer, og det er utenfor denne oppgavens rekkevidde å drøfte dette ytterligere (Plevin, Delucchi & Creutzig, 2014). Også for betong kan hindringer motvirke realisering av det mest gunstige utslippssenarioet. Likt som for stål kan tilgjengelighet tenkes å være en begrensende faktor; for eksempel tilgjengelighet av additiver slik som flygeaske som benyttes i produksjon av såkalt «miljøbetong». En annen hindring kan være forlengede tørkingstider for miljøbetong (Bentz, Hansen & Guynn, 2011). Forlengede tørkingstider påvirker ikke utslippsfaktoren til slik betong direkte, men kan redusere attraktiviteten til betongen og slik være en hindring for utnyttelse av slik betong i stor skala for hele bygg.

Et annet diskusjonstema vedrører «CO₂-premien» for bygningshøyde og artikkelens konklusjoner. I artikkelens konklusjon påpekes det at CO₂-premien er liten eller neglisjerbar om en benytter beste-praksis (*best-practice*) strukturelle systemer og materialvalg. Dette er en klar konklusjon for bygninger under 30 etasjer for alle utslippssenarioer; CO₂-premien er da svært liten. For høyere bygninger er denne konklusjonen noe mer diskutabel. Ugunstige utslippssenarioer medfører en CO₂-premie for bygningshøyde, men denne premien blir tolket som liten eller neglisjerbar. Dette er en relativt «fri» tolkning; det gjøres ingen sammenligninger eller analyser av denne premien for eksempel på makronivå.

Artikkelens resultater kan tolkes i retning av at CO₂-premien for bygningshøyde er hovedsakelig lav. Om premien tolkes som lav, og høyere bygg medfører betydelig lavere utslipp fra persontransport, kan en videre tolke resultatene som et argument for å bygge høyere. En slik tolkning bør dog modereres noe. Resultatene er kun gjeldende for den systemgrensen som analyseres. En kan tenke seg at livsløpsfaser som ikke analyseres i denne studien, og bygningskomponenter som ekskluderes, kan medføre betydelige CO₂-premier for

å bygge høyt. Fundamentering og tekniske systemer kan for eksempel potensielt forårsake klimagassutslipp avhengig av bygningers høyde. Samtidig kan også transportprosessen, konstruksjonsprosessen, og bygningers driftfase forårsake klimagassutslipp avhengig av bygningshøyder. En tolkning av resultatene i retning av at CO₂-premien for bygningshøyde er lav, må derfor begrenses i henhold til studiens systemgrense; utslipp fra produksjon av materialer for bygningers bæresystem. Med studiens systemgrense i mente, peker studiens resultater allikevel i retning av at høye bygninger kan gjennomføres som et miljøtiltak uten å utløse store ytterligere CO₂-utslipp fra materialproduksjon.

6. Anbefaling om videre arbeid

Konklusjonen gitt i artikkelen er dekkende, og nødvendiggjør således ikke ytterligere utdypelser. Artikkelen innbefatter derimot ingen anbefalinger eller tanker om videre arbeid basert på artikkelens resultater og konklusjoner.

Beregningsmodellen og rammeverket utviklet i denne studien kan potensielt benyttes til analyser av andre bæresystemer enn de vurderte. Trebaserte bæresystemer er designet for meget høye bygg (Green & Karsh, 2012; Skidmore Owings & Merrill LLP, 2013). Om materialdata for trebaserte bæresystem kunne anskaffes eller estimeres, hadde det vært interessant og gjennomføre lignende analyser som de som er utført i denne studien. Spesielt hadde en sammenligning med systemene av betong og stål vært av interesse.

Det hadde også vært av interesse å utvide denne studien med beregninger basert på netto areal til utleie (*nett rentable area*, NRA). Bygg sin utnyttelsesgrad av etasjeareal avhenger av høyden på bygg, som diskutert i artikkelen. Beregninger som tar høyde for denne effekten i forhold til klimagassutslipp fra materialproduksjon hadde derfor vært av interesse.

En kan også se for seg utvidelser av systemgrensene og modellen som defineres i artikkelen. For eksempel en utvidet modell som også estimerer klimagassutslipp fra transport av materialer til byggeplass og konstruksjonsprosessen. Videre kan modellen potensielt utvides til å gjelde flere bygningskomponenter, for eksempel fundament og tekniske systemer som heis og ventilasjonssystem. Det hadde også vært interessant å utvide studien også til å gjelde bruksfasen og avhendingsfasen. Spesielt interessant er bruksfasen. I artikkelen påpekes det at framveksten av mer energieffektive bygg kan øke betydningen av utslipp fra produksjon av materialer. En utvidet systemgrense som inkluderer bruksfasen kan potensielt illustrere denne effekten i forhold til antall etasjer i bygg.

En kan også tenke seg en utvidelse av modellen utover byggets klimagassregnskap. I avsnitt 1.1. Temabakgrunn, påpekes det at mer miljøvennlig persontransport kan gjøre materialfasen til bygg relativt viktigere. En utvidet modell som fokuserer på brukerne av et bygg kan benytte for eksempel en klimagass-fotavtrykk-metodikk. En slik modell basert på en slik metodikk kan inkludere både utslipp fra materialproduksjon til et bygg og utslipp fra persontransport fra brukerne av bygget. En modell som relaterer begge disse faktorene til antall etasjer i ett bygg synes å være meget interessant.

7. Arbeidsfordeling

Følgende personer er forfattere av artikkelen «Investigating the "CO₂-premium" for building height»: Egil Karoliussen Ytrehus (undertegnede), Rolf André Bohne og Jardar Lohne.

Undertegnede er hovedforfatter.

Undertegnede har stått for brøkdelen av arbeidet under utførelsen av studien og utarbeidelsen av artikkelen. Dette inkluderer litteraturstudien, datainnsamling, oppsett av beregningsmodell, beregninger, utarbeidelse av tabeller og figurer, skrivearbeidet, redaksjonell utforming av artikkelen og layout.

Rolf André Bohne har vært veileder for denne oppgaven. Bohne veiledet arbeidet gjennom hele utførte studie, og utarbeidelsen av artikkelen. Veiledning ble gitt på flere plan; overordnet veiledning i forhold til problemstilling, fokus og strategi, og detaljert veiledning for eksempel ved fastsettelse av utslippsfaktorer.

Gjennom utarbeidelsen av artikkelen har arbeidsmetodikken i hovedsak vært som følger. Undertegnede utarbeidet utkast til artikkelen. Medforfatterne leste utkastet og ga forslag til endringen av innhold, språk og oppbygning. Undertegnede utarbeidet nye utkast blant annet basert på forslagene fra medforfatterne.

Gjennom utarbeidelsen av artikkelen fokuserte Bohne på å gi innspill angående det faglige innholdet i artikkelen; eksempelvis faglige betraktninger om resultatene og diskusjonen. Jardar Lohne fokuserte på presentasjonen av det faglige innholdet i artikkelen; altså på språk og oppbygning. Lohne bidro blant annet med forslag til fremstillingsmåter og formuleringer.

Referanser

(listen inkluderer også referansene benyttet i artikkelen)

- Aarstad, K. (2012). *Unicon: Fabrikkbetong B30 M60* (Environmental Product Declaration NEPD 158N). The Norwegian EPD Foundation. Hentet fra <http://www.epd-norge.no/getfile.php/PDF/EPD/Byggevarer/NEPD158N%20Betong%20B30%20Unicon%281%29.pdf>
- Ali, M. M. & Moon, K. S. (2007). Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects. *Architectural Science Review*, 50(3), 205-223. doi:10.3763/asre.2007.5027
- Almemark, M. (2012). *Celsa Steel service AB: Steel reinforcement products for concrete* (Environmental Product Declaration S-EP-00305): IVL Swedish Environmental Research Institute. Hentet fra http://celsa-steelservice.se/wp-content/uploads/2012/05/CelsaSteelService_EDP_SWE.pdf
- Asdrubali, F., Baldassarri, C. & Fthenakis, V. (2013). Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings. *Energy and Buildings*, 64(0), 73-89. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.018>
- Aye, L., Ngo, T., Crawford, R. H., Gammampila, R. & Mendis, P. (2012). Life cycle greenhouse gas emissions and energy analysis of prefabricated reusable building modules. *Energy and Buildings*, 47(0), 159-168. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.049>
- Ayensu, K. G. & Jensen, E. (2006). *Model Development for the Evaluation of Cost-effectiveness of Concrete Framing Systems for Low-, Mid- and High-rise Buildings*: Portland Cement Association. Hentet fra <http://web.mit.edu/cron/project/concrete-sustainability-hub/Literature%20Review/Building%20Energy/Concerte%20Industry%20Reports/PCA%20CD%20Cement%20Research%20Library%202008/reports/SN3032.pdf>
- bauforumstahl e.V. (2010). *Structural Steel: Sections and Plates* (Environmental Product Declaration EPD-BFS-2010111-E). Rheinufer 108, 53637 Königswinter, Germany: Institut Bauen und Umwelt e.V. [Institute Construction and Environment]. Hentet fra http://construction-environment.com/download/Cf2ffda9X13c23fd4f51XY2d70/EPD_BFS_2010111_E.pdf
- bauforumstahl e.V. (2013). *Structural Steel: Sections and Plates* (Environmental Product Declaration EPD-BFS-20130094-IBG1-EN). Panoramastr. 1, 10178 Berlin, Germany: Institut Bauen und Umwelt e.V. [Institute Construction and Environment]. Hentet fra http://construction-environment.com/download/C652e116X143a0d49e48XY5694/EPD_BFS_20130094_IBG1_EN.pdf
- Bawden, K. R. (2013). *Hybrid life cycle assessment of low, mid and high-rise multi-family dwellings with development of knowledge-based uncertainty bounds*, Rochester Institute of Technology). Hentet fra <https://ritdml.rit.edu/handle/1850/16706>
- Bentz, D. P., Hansen, A. S. & Guynn, J. M. (2011). Optimization of cement and fly ash particle sizes to produce sustainable concretes. *Cement and Concrete Composites*, 33(8), 824-831. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.008>
- Blengini, G. A. & Di Carlo, T. (2010). The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. *Energy and Buildings*, 42(6), 869-880. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.009>

- Burchart-Korol, D. (2013). Life cycle assessment of steel production in Poland: a case study. *Journal of Cleaner Production*, 54(0), 235-243.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.031>
- Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G. & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29(0), 394-416.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>
- Celsa Barcelona. (2011). *Structural Section Steel* (Environmental Product Declaration EPD-CEL-2011112-1-E). Rheinufer 108, 53637 Königswinter, Germany: Institut Bauen und Umwelt e.V., [Institute Construction and Environment]. Hentet fra http://construction-environment.com/download/CY3f8790e9X1326d39b69bX7c02/EPD_CEL_201112_1_E.pdf
- Celsa Group. (2014). *Structural section steel* (Environmental Product Declaration EPD-CEL-20130219-IBD1-EN). Panoramastr. 1, 10178 Berlin, Germany: Institut Bauen und Umwelt e.V. [Institute Construction and Environment]. Hentet fra http://bau-umwelt.de/download/CY3c4936c1X144f9129e42X47ae/EPD_CEL_20130219_IBD1_EN.pdf
- Chen, W., Yin, X. & Ma, D. (2014). A bottom-up analysis of China's iron and steel industrial energy consumption and CO₂ emissions. *Applied Energy*, 136(0), 1174-1183.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.002>
- Cole, R. J. (1998). Energy and greenhouse gas emissions associated with the construction of alternative structural systems. *Building and Environment*, 34(3), 335-348.
doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323\(98\)00020-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(98)00020-1)
- Ding, G. K. C. (2004). *The development of a multi-criteria approach for the measurement of sustainable performance for built projects and facilities*, University of Technology, Sydney). Hentet fra <https://opus.lib.uts.edu.au/research/handle/2100/281>
- Ding, G. K. C. (2007). Life cycle energy assessment of Australian secondary schools. *Building Research & Information*, 35(5), 487-500. doi:10.1080/09613210601116408
- Dixit, M. K., Fernández-Solís, J. L., Lavy, S. & Culp, C. H. (2010). Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. *Energy and Buildings*, 42(8), 1238-1247. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.02.016>
- Dixit, M. K., Fernández-Solís, J. L., Lavy, S. & Culp, C. H. (2012). Need for an embodied energy measurement protocol for buildings: A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3730-3743.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.021>
- Dodoo, A., Gustavsson, L. & Sathre, R. (2014). Lifecycle carbon implications of conventional and low-energy multi-storey timber building systems. *Energy and Buildings*, 82(0), 194-210. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.034>
- EeBGuide Project. (2011). 1.3.2 European standardization works on LCA of buildings *IEeBGuide Guidance Document Part B: BUILDINGS*.
- Fay, R., Treloar, G. & Iyer-Raniga, U. (2000). Life-cycle energy analysis of buildings: a case study. *Building Research & Information*, 28(1), 31-41. doi:10.1080/096132100369073
- Fet, A. M. (2014a). *Norwegian Steel Association: Generic EPD Cold formed welded structural hollow sections* (Environmental Product Declaration NEPD 00253E). The Norwegian EPD Foundation. Hentet fra <http://www.epd-norge.no/getfile.php/PDF/EPD/Byggevarer/NEPD%2000253%20Cold-formed-welded-structural-hollow-sections-Type-31-GODKJENT.pdf>
- Fet, A. M. (2014b). *Norwegian Steel Association: Generic EPD Hot finished structural hollow sections* (Environmental Product Declaration NEPD 00254E). The Norwegian

- EPD Foundation. Hentet fra <http://www.epd-norge.no/getfile.php/PDF/EPD/Byggevarer/NEPD%2000254%20Hot-finished-structural-hollow-sections-Type-41-GODKJENT.pdf>
- Fet, A. M. (2014c). *Norwegian Steel Association: Generic EPD I, H, U, L, T and wide flats hot-rolled sections (Type 2.1)* (Environmental Product Declaration NEPD 00252E). The Norwegian EPD Foundation. Hentet fra <http://www.epd-norge.no/getfile.php/PDF/EPD/Byggevarer/NEPD%2000252%20I-H-U-L-T-and-wide-flats-hot-rolled-sections-Type-21-GODKJENT.pdf>
- Flower, D. M. & Sanjayan, J. (2007). Green house gas emissions due to concrete manufacture. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(5), 282-288. doi:10.1065/lca2007.05.327
- Foraboschi, P., Mercanzin, M. & Trabucco, D. (2014). Sustainable structural design of tall buildings based on embodied energy. *Energy and Buildings*, 68, Part A(0), 254-269. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.003>
- Ghattas, R., Gregory, J., Olivetti, E. & Greene, S. (2013). Life Cycle Assessment for Residential Buildings: A Literature Review and Gap Analysis. *Concrete Sustainability Hub Massachusetts Institute of Technology*.
- Green, M. & Karsh, J. (2012). *TALLWOOD: The case for tall wood buildings*. Vancouver, Canada: MGB Architecture+ Design.
- Guggemos, A. & Horvath, A. (2005). Comparison of Environmental Effects of Steel- and Concrete-Framed Buildings. *Journal of Infrastructure Systems*, 11(2), 93-101. doi:10.1061/(ASCE)1076-0342(2005)11:2(93)
- Gustad, O. J. & Gulbrandsøy, K. (2014). *Voss Cementvarefabrikk A/S: Betong B30 M60, konsistens <200m/m* (Environmental Product Declaration NEPD00272N). The Norwegian EPD Foundation. Hentet fra <http://www.epd-norge.no/getfile.php/PDF/EPD/Byggevarer/NEPD00272N%20Betong%20B30%20M60%20C%20konsistens%20GODKJENT.pdf>
- Habert, G. & Roussel, N. (2009). Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives. *Cement and Concrete Composites*, 31(6), 397-402. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.001>
- Hammond, G. & Jones, C. (2011). ICE Inventory of Carbon and Energy V 2.0. *Sustainable Energy Research Team (SERT), Department of Mechanical Engineering, University of Bath, UK*.
- Hasanbeigi, A., Price, L. & Lin, E. (2012). Emerging energy-efficiency and CO2 emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 6220-6238. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.019>
- Himpe, E., Trappers, L., Debacker, W., Delghust, M., Laverge, J., Janssens, A., . . . Van Holm, M. (2013). Life cycle energy analysis of a zero-energy house. *Building Research & Information*, 41(4), 435-449. doi:10.1080/09613218.2013.777329
- Ibn-Mohammed, T., Greenough, R., Taylor, S., Ozawa-Meida, L. & Acquaye, A. (2013). Operational vs. embodied emissions in buildings—A review of current trends. *Energy and Buildings*, 66(0), 232-245. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.026>
- InformationsZentrum Beton GmbH. (2013a). *Beton der Druckfestigkeitsklasse* (UMWELT-Produktdeklaration (Environmental product declaration)). Panoramastr. 1, 10178 Berlin, Germany: Institut Bauen und Umwelt e.V. [Institute Construction and Environment]. Hentet fra <http://www.fdb-fertigteilbau.de/wissen/nachhaltigkeit/epds-fuer-beton/>
- InformationsZentrum Beton GmbH. (2013b). *Beton der Druckfestigkeitsklasse C 30/37* (Concrete strength class C 30/37) (UMWELT-Produktdeklaration (Environmental

- product declaration) EPD-IZB-2013431-D). Panoramastr. 1, 10178 Berlin, Germany: Institut Bauen und Umwelt e.V. [Institute Construction and Environment]. Hentet fra <http://www.fdb-fertigteilbau.de/wissen/nachhaltigkeit/epds-fuer-beton/>
- IPCC. (2013). Annex III: Glossary. I *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*.
- IPCC. (2014a). Buildings. I *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- IPCC. (2014b). Summary for Policymakers. I *Climate Change 2014: Synthesis Report*.
- IPCC. (2014c). Summary for Policymakers + Longer Report. I *Climate Change 2014: Synthesis Report*.
- Itard, L. & Klunder, G. (2007). Comparing environmental impacts of renovated housing stock with new construction. *Building Research & Information*, 35(3), 252-267. doi:10.1080/09613210601068161
- John, S., Nebel, B., Perez, N. & Buchanan, A. (2009). *Environmental impacts of multi-storey buildings using different construction materials*: Ministry of Agriculture and Forestry, New Zealand.
- Kaethner, S. & Burrige, J. (2012). Embodied CO₂ of structural frames. *The Structural Engineer*, May, 33-40.
- Khan, F. (1968). Column-Free Box-Type Framing with and Without Core. *8th Cong. of the Int. Assoc. for Bridge and Structural Engineering.*, New York.
- Khasreen, M., Banfill, P. F. & Menzies, G. (2009). Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review. *Sustainability*, 1(3), 674-701. Hentet fra <http://www.mdpi.com/2071-1050/1/3/674>
- Kommunal- og moderniseringsdepartementet. (2015). *Framtidens byer*. Hentet 16.01.2015 fra <https://www.regjeringen.no/nb/tema/kommuner-og-regioner/by--og-stedsutvikling/framtidensbyer/id547992/>
- Landbruks- og matdepartementet. (2011). *Meld. St. 9: Landbruks- og matpolitikken: Velkommen til bords*. Hentet fra <https://www.regjeringen.no/nb/dokumenter/meld-st-9-20112012/id664980/?docId=STM201120120009000DDDEPIS&ch=1&q=>
- Lawrence Technological University. (2015). *Elin Jensen*. Hentet 16.01.2015 fra <http://www.ltu.edu/facultyandstaff/jensen.asp>
- Lützkendorf, T., Foliente, G., Balouktsi, M. & Wiberg, A. H. (2014). Net-zero buildings: incorporating embodied impacts. *Building Research & Information*, 43(1), 62-81. doi:10.1080/09613218.2014.935575
- Mahasanan, N., Smith, S. & Humphreys, K. (2003). The Cement Industry and Global Climate Change: Current and Potential Future Cement Industry CO₂ Emissions. I J. G. Kaya (Red.), *Greenhouse Gas Control Technologies - 6th International Conference* (s. 995-1000). Oxford: Pergamon.
- Miljøverndepartementet. (2012). *Meld. St. 21: Norsk klimapolitikk*. Hentet fra <https://www.regjeringen.no/contentassets/aa70cfe177d2433192570893d72b117a/no/pdfs/stm201120120021000dddpdfs.pdf>
- Miljøverndepartementet. (2013). *Den moderne bærekraftige byen*. Hentet fra <https://www.regjeringen.no/contentassets/4f00c9c75afe4be5a2fb257cf118684e/t-1537.pdf>
- Moldal, B. (2014). *Skedsmo Betong: Ferdigbetong B30 M60 180* (Environmental Product Declaration NEPD 172N). The Norwegian EPD Foundation. Hentet fra <http://www.epd-norge.no/getfile.php/PDF/EPD/Byggevarer/NEPD%20172N%20Ferdigbetong%20Skedsmo%20Betong.pdf>

- Moncaster, A. M. & Song, J. Y. (2012). A comparative review of existing data and methodologies for calculating embodied energy and carbon of buildings. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 3(1), 26-36. doi:10.1080/2093761X.2012.673915
- Moncaster, A. M. & Symons, K. E. (2013). A method and tool for 'cradle to grave' embodied carbon and energy impacts of UK buildings in compliance with the new TC350 standards. *Energy and Buildings*, 66(0), 514-523. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.046>
- Nemry, F., Uihlein, A., Colodel, C. M., Wittstock, B., Braune, A., Wetzel, C., . . . Kreißig, J. (2008). *Environmental improvement potentials of residential buildings (IMPRO-building)*. Luxembourg: European Commission. Joint Research Centre. Institute for Prospective Technological Studies Hentet fra <http://ftp.jrc.es/EURdoc/JRC46667.pdf>
- NorBetong. (2012). *Lavkarbonbetong - et bevisst valg for lavere utslipp (Lowcarbonconcrete - a conscious choice for lower emissions)*. Postboks 203 Lilleaker, 0216 Oslo, Norway: NorBetong AS. Hentet fra <http://www.norbetong.no/system/files/force/assets/document/b7/52/norbetonglavkarbonbetong.pdf?download=1>
- Nordqvist, J., Boyd, C. & Klee, H. (2002). Three Big Cs: Climate, Cement and China. *Greener Management International*, 2002(39), 68-82.
- Norman, J., MacLean, H. & Kennedy, C. (2006). Comparing High and Low Residential Density: Life-Cycle Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions. *Journal of Urban Planning and Development*, 132(1), 10-21. doi:10.1061/(ASCE)0733-9488(2006)132:1(10)
- Nässén, J., Holmberg, J., Wadeskog, A. & Nyman, M. (2007). Direct and indirect energy use and carbon emissions in the production phase of buildings: An input-output analysis. *Energy*, 32(9), 1593-1602. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2007.01.002>
- Oda, J., Akimoto, K. & Tomoda, T. (2013). Long-term global availability of steel scrap. *Resources, Conservation and Recycling*, 81(0), 81-91. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.002>
- Ollendorff, M. (2012). *Powerhouse - Innebygget energi og klimagassregnskap for bæresystemene*, Department of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology). Hentet fra <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:no:ntnu:diva-19321>
- Ordóñez, J. & Modi, V. (2011). Optimizing CO2 emissions from heating and cooling and from the materials used in residential buildings, depending on their geometric characteristics. *Building and Environment*, 46(11), 2161-2169. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.030>
- Paleari, M., Lavagna, M. & Campioli, A. (2013). *Life Cycle Assessment and Zero Energy Residential Buildings*. Paper presentert på: PLEA2013: Sustainable Architecture for a Renewable Future. Munich, Germany. Hentet fra <http://mediatum.ub.tum.de/doc/1169326/1169326.pdf>
- Paya-Zaforteza, I., Yepes, V., Hospitaler, A. & González-Vidosa, F. (2009). CO2-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing. *Engineering Structures*, 31(7), 1501-1508. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.034>
- Petek Gursel, A., Masanet, E., Horvath, A. & Stadel, A. (2014). Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. *Cement and Concrete Composites*, 51(0), 38-48. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.005>
- PlasticsEurope. *High density polyethylene (HDPE) (Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers)*: PlasticsEurope Association of Plastics

- Manufacturers,. Hentet fra http://www.plasticseurope.org/Documents/Document/20100312112214-FINAL_HDPE_280409-20081215-017-EN-v1.pdf
- Plevin, R. J., Delucchi, M. A. & Creutzig, F. (2014). Using Attributional Life Cycle Assessment to Estimate Climate-Change Mitigation Benefits Misleads Policy Makers. *Journal of Industrial Ecology*, 18(1), 73-83. doi:10.1111/jiec.12074
- Ramesh, T., Prakash, R. & Shukla, K. K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, 42(10), 1592-1600. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.007>
- Robertson, A. B., Lam, F. C. F. & Cole, R. J. (2012). A Comparative Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Mid-Rise Office Building Construction Alternatives: Laminated Timber or Reinforced Concrete. *Buildings*, 2(3), 245-270. Hentet fra <http://www.mdpi.com/2075-5309/2/3/245>
- Ruuska, A. P. & Häkkinen, T. M. (2014). The significance of various factors for GHG emissions of buildings. *International Journal of Sustainable Engineering*, 1-14. doi:10.1080/19397038.2014.934931
- Santero, N., Lahd, H. & Marceau, M. (2014). *NRMCA National Ready Mixed Concrete Association: NRMCA Member industry-wide EPD for ready mixed concrete* (Environmental Product Declaration EPD10046). 789 N. Dixboro, Ann Arbor, MI 48105, USA: NSF International. Hentet fra <http://www.nrmca.org/sustainability/EPDProgram/Downloads/NRMCA%20EPD%2010.08.2014.pdf>
- Sartori, I. & Hestnes, A. G. (2007). Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy and Buildings*, 39(3), 249-257. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.001>
- Sharma, A., Saxena, A., Sethi, M., Shree, V. & Varun. (2011). Life cycle assessment of buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 871-875. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.008>
- Shipworth, D. (2002). A stochastic framework for embodied greenhouse gas emissions modelling of construction materials. *Building Research & Information*, 30(1), 16-24. doi:10.1080/09613210110090412
- Sigrid Nordby, A. (2011). Carbon reductions and building regulations: the case of Norwegian mountain cabins. *Building Research & Information*, 39(6), 553-565. doi:10.1080/09613218.2011.604280
- Skidmore Owings & Merrill LLP. (2013). *Timber Tower Research Project*. Chicago. Hentet fra <http://www.som.com/FILE/20378/timber-tower-final-report-and-sketches.pdf>
- Skjæret, S. (2013). *Betong Øst: Ferdigbetong B25 M60* (Environmental Product Declaration NEPD 123N). The Norwegian EPD Foundation. Hentet fra <http://www.epd-norge.no/getfile.php/PDF/EPD/Byggevarer/NEPD%20123N%20Ferdigbetong%20B25%20M60%20Betong%20C3%98st.pdf>
- Skjæveland, T. & Brekke, T. (2013). *Sola Betong: Ferdigbetong B25 M60* (Environmental Product Declaration NEPD 169N). The Norwegian EPD Foundation. Hentet fra <http://www.epd-norge.no/getfile.php/PDF/EPD/Byggevarer/NEPD169NFerdigbetong-B30-M60SolaBetong.pdf>
- Sodagar, B., Rai, D., Jones, B., Wihan, J. & Fieldson, R. (2010). The carbon-reduction potential of straw-bale housing. *Building Research & Information*, 39(1), 51-65. doi:10.1080/09613218.2010.528187
- Standard Norge. (2010). NS-EN 15643-1:2010, Bærekraftige byggverk - Vurdering av bygninger i et bærekraftsperspektiv - Del 1: Generelt rammeverk.

- Standard Norge. (2011a). NS-EN 15643-2:2011, Bærekraftige byggverk - Vurdering av bygninger i et bærekraftsperspektiv - Del 2: Rammeverk for vurdering av miljøprestasjon.
- Standard Norge. (2011b). NS-EN 15978:2011, Bærekraftige byggverk - Vurdering av bygningers miljøprestasjon, Beregningsmetode.
- Standards Norway. (2011a). NS-EN 15643-2:2011, Sustainability of construction works - Assessment of buildings - Part 2: Framework for the assessment of environmental performance.
- Standards Norway. (2011b). NS-EN 15978:2011, Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings, Calculation method.
- Standards Norway. (2012). NS-EN 15804:2012, Sustainability of construction works - Environmental product declarations, Core rules for the product category of construction products.
- Steadman, P. (2014). *Building Types and Built Forms* (Kindle Edition. utg.). Leicestershire: Matador.
- Säynäjoki, A., Heinonen, J. & Junnila, S. (2011). *An empirical evaluation of the significance of the carbon spike in the construction*. Paper presentert på SB11 Helsinki World Sustainable Building Conference, Helsinki, Finland. Hentet fra http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB_DC23189.pdf
- Tae, S., Baek, C. & Shin, S. (2011). Life cycle CO2 evaluation on reinforced concrete structures with high-strength concrete. *Environmental Impact Assessment Review*, 31(3), 253-260. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.eiar.2010.07.002>
- Takano, A., Hughes, M. & Winter, S. (2014). A multidisciplinary approach to sustainable building material selection: A case study in a Finnish context. *Building and Environment*, 82(0), 526-535. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.026>
- Thomas, L. E. (2010). Evaluating design strategies, performance and occupant satisfaction: a low carbon office refurbishment. *Building Research & Information*, 38(6), 610-624. doi:10.1080/09613218.2010.501654
- Thormark, C. (2007). *Energy and resources, material choice and recycling potential in low energy buildings*. Paper presentert på CIB Conference, SB. Hentet fra http://www.buildingreen.net/assets/cms/File/070530_SB2007_Thormark.pdf
- Trabucco, D. (2008). An analysis of the relationship between service cores and the embodied/running energy of tall buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 17(5), 941-952. doi:10.1002/tal.477
- Treloar, G. J., Fay, R., Ilozor, B. & Love, P. E. D. (2001). An analysis of the embodied energy of office buildings by height. *Facilities*, 19(5/6), 204-214. doi:10.1108/02632770110387797
- UK Cares. (2014). *Carbon Steel Reinforcing Bar (secondary production route – scrap), Sector Average* (Environmental Product Declaration BREG EN EPD 000011). Garston, Watford WD25 9XX, UK: BRE Global LTD. Hentet fra http://www.greenbooklive.com/filelibrary/EN_15804/EPD/UKCARES-EN-EPD-0011.3.pdf
- Viola, J. (2012). *Derivation of reliable simplification strategies for the comparative LCA of individual and " typical" newly built Swiss apartment buildings*, Diss., Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 20608, 2012).
- Waldron, D., Jones, P. J., Lannon, S. C., Bassett, T. & Iorwerth, H. M. (2013). *Embodied energy and operational energy: Case studies comparing different urban layouts*. Paper presentert på Building Simulation 2013 (BS2013): 13th International Conference of the International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France. Hentet fra http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p_1199.pdf

- Wallhagen, M., Glaumann, M. & Malmqvist, T. (2011). Basic building life cycle calculations to decrease contribution to climate change – Case study on an office building in Sweden. *Building and Environment*, 46(10), 1863-1871.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.02.003>
- Xing, S., Xu, Z. & Jun, G. (2008). Inventory analysis of LCA on steel- and concrete-construction office buildings. *Energy and Buildings*, 40(7), 1188-1193.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.10.016>
- Yin, R. K. (2003). *Case study research: Design and methods* (Tredje. utg.): SAGE Publications.
- Zhang, J., Cheng, J. P. & Lo, I. C. (2014). Life cycle carbon footprint measurement of Portland cement and ready mix concrete for a city with local scarcity of resources like Hong Kong. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(4), 745-757.
doi:10.1007/s11367-013-0689-7
- Zygomalas, I., Efthymiou, E. & Baniotopoulos, C. (2011). *Life cycle inventory (LCI) of cold-formed hollow structural steel sections for the sustainability assessment of metal structures* (p. 317). Paper presentert på Proceedings of the International Conference - Sustainability of Constructions - Towards a Better Built Environment Innsbruck.
Hentet fra
http://www.civil.uminho.pt/lftc/C25_Proceedings_Final_Conference_2011.pdf