

# ANNUAL REPORT 2015



The Research Centre on  
Zero Emission Buildings





# The Research Centre on Zero Emission Buildings

---

ANNUAL REPORT 2015



## ZEB IS A KEY CONTRIBUTOR TO THE NATIONAL GREEN SHIFT

### *Fredrik Shetelig*

Chairman ZEB | Dean NTNU

When ZEB started its work, we were building upon a strong history of research and experimentation in the field of sustainable buildings, but we were actually a little uncertain if the ambitious goals we had formulated were achievable within the lifespan of the ZEB-program. As the Centre enters its last full year as an FME, we have demonstrated, using research-based innovation, that it is technically and economically feasible to build zero emission buildings. The size and number of the demonstration projects has exceeded our expectations, and this could never have happened without the ambition, spirit, and flexibility of our industry partners. Our society is at this very moment in the middle of a paradigm shift, formulated by the Norwegian government as “the Green Shift – climate- and environmentally friendly restructuring”. ZEB is a key contributor to the Green Shift in the building industry, and we will spend the FME-centre’s last year fulfilling our research goals and continuing our contribution to society by persisting in disseminating a large number of research results. The next step is to raise the level of complexity and develop research-based zero emission solutions on a neighborhood- and urban scale.

Stay tuned!

---

#### **Host institution**

Faculty of architecture and fine art  
NTNU - Trondheim

#### **Visiting address**

ZEB  
Alfred Getz vei 3, Sentrabygg 1, 8<sup>th</sup> floor,  
7034 Trondheim

#### **Centre Director**

Anild Gustavsen, NTNU  
[anild.gustavsen@ntnu.no](mailto:anild.gustavsen@ntnu.no)

#### **Centre Manager**

Ruth Woods, SINTEF  
[ruth.woods@sintef.no](mailto:ruth.woods@sintef.no)

#### **Administration contact**

Katrine Peck Sze Lim, NTNU  
[peck.lim@ntnu.no](mailto:peck.lim@ntnu.no)

#### **The Board members**

Carl Fredrik Lutken Shetelig, NTNU (Chair)  
Arild Gustavsen, NTNU  
Jonas Holme, SINTEF Byggforsk  
Rune Stene (From September onwards), Skanska  
Phillipp Müller, SAPA Group  
Zdena Cervenka, Statsbygg  
Tine Hegli, Snøhetta  
Jens Petter Burud, Caverion  
Oddvar Hyrve (Jan-Aug), Weber AS  
Rune Eliassen (from Sept onwards), Weber AS

#### **Leaders of the Work Packages**

WP1 Bjørn Petter Jelle, NTNU/SINTEF  
[bjorn.petter.jelle@sintef.no](mailto:bjorn.petter.jelle@sintef.no)  
WP2 Birgit Risholt, SINTEF  
[birgit.risholt@sintef.no](mailto:birgit.risholt@sintef.no)  
WP3 Hans Martin Mathisen, NTNU  
[hans.m.mathisen@ntnu.no](mailto:hans.m.mathisen@ntnu.no)  
WP4 Thomas Berker, NTNU  
[thomas.berker@hf.ntnu.no](mailto:thomas.berker@hf.ntnu.no)  
WP5 Inger Andresen, NTNU/SINTEF  
[inger.andresen@ntnu.no](mailto:inger.andresen@ntnu.no)

---

# CONTENTS

---

- 8 Summary
- 11 Organization
- 13 Main activities
- 15 Results
- 16 How should we build a low carbon society? [Hvordan bygge et lavutslippssamfunn?](#)
- 20 New construction on Campus Evenstad - The aim is to build the most climate friendly building in Norway  
[Nybygg på Campus Evenstad skal bli landets beste klimabygg](#)
- 24 Powerhouse Kjørbo
- 27 Zero Village Bergen
- 30 Øvre Rotvoll: A net zero energy neighbourhood in Trondheim [Øvre Rotvoll: et null-energi boligområde i Trondheim](#)
- 34 Visiting Researcher at the Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE)  
[Forskeropphold ved Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems \(ISE\)](#)
- 37 Thermal insulation performance of reflective material layers in wall and floor constructions  
[Varmeisolerende effekt av reflekterende belegg i vegg- og gulvkonstruksjoner](#)
- 40 Aerogel and argon insulation in windows [Aerogel og argonisolasjon i vinduer](#)
- 44 Necessary tools for sustainable building development [Sentrale redskaper for utvikling av bærekraftige bygninger](#)
- 49 Living Lab, a liveable laboratory [Living Lab, laboratoriet ein kan bu i](#)
- 53 The flock
- 56 Key figures



---

#### **Front and Reverse Page**

ZEB Test Cell Laboratory/ZEB Living Lab.  
Photo: Ole Tolstad

#### **Layout**

Ole Tolstad

#### **Editor**

Ruth Woods

#### **ISBN**

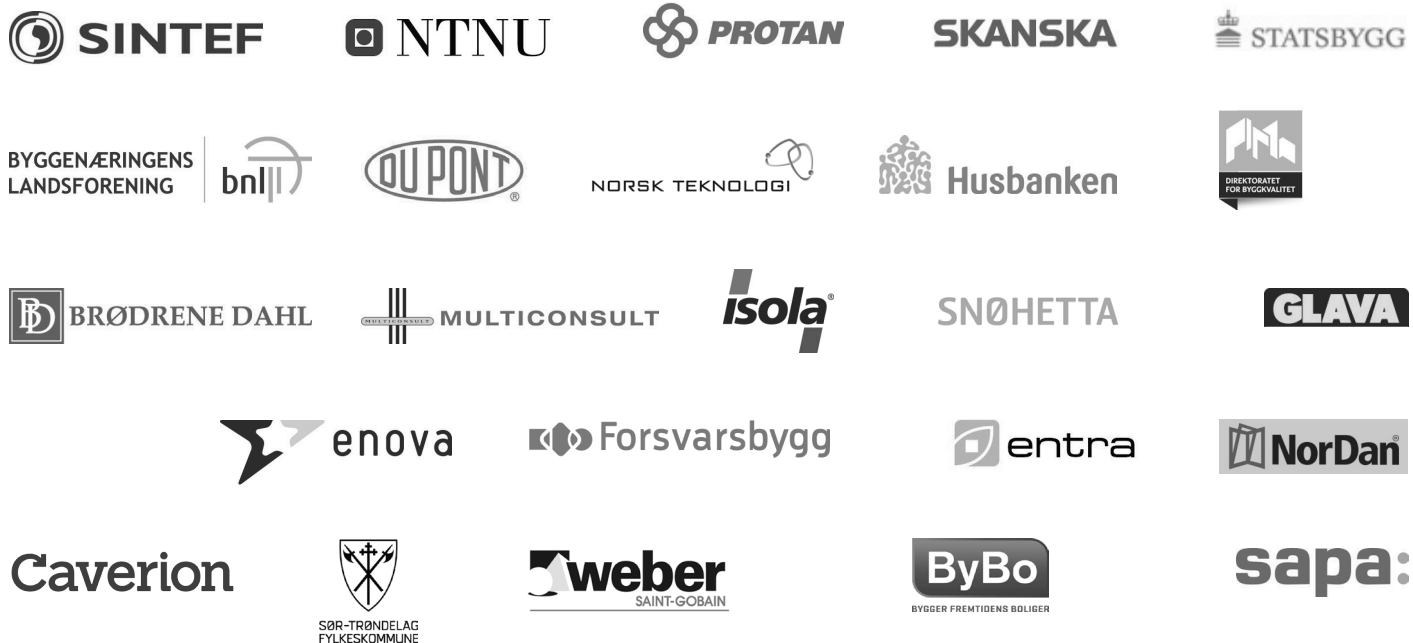
ISBN 978-82-536-1500-4 (pdf)  
ISBN 978-82-536-1501-1 (print)

#### **FME**

The scheme of the Centres for Environment-friendly Energy Research (FME) seeks to develop expertise and promote innovation through focus on long-term research in selected areas of environment - friendly energy, transport and CO<sub>2</sub> management in close cooperation between prominent research communities and users.



The Research Centre on Zero Emission Buildings (ZEB) gratefully acknowledges the support from the Research Council of Norway, BNL – Federation of construction industries, Brødrene Dahl, ByBo, Caverion Norge AS, DiBK – Norwegian Building Authority, DuPont, Enova SF, Entra, Forsvarsbygg, Glava, Husbanken, Sør-Trøndelag fylkeskommune, Isola, Multiconsult, NorDan, Norsk Teknologi, Protan, Sapa, Skanska, Snøhetta, Statsbygg and Weber.



#### Reference Group

Representatives from end user groups and relevant organizations

Forbrukerrådet (Norwegian Consumer Council)

NBBL (Norwegian Federation of Co-operative Housing Associations)

NVE (Norwegian Water Resources and Energy Directorate)

NAL (Norwegian Association of Architects)

Lavenergiprogrammet for bygg og anlegg (The Construction Industry Low-Energy Programme)

Norsk VVS Energi- og Miljøteknisk Forening (Driftsforum) (Forum for Building management, operation and maintenance of buildings at The Norwegian Society of HVAC)

Arkitektbedriftene (Association of Consulting Architects in Norway)

# SUMMARY



## DEMONSTRATION PROJECTS FOSTER DISSEMINATION OF KNOWLEDGE AND IMPLEMENTATION

*Arild Gustavsen, Ruth Woods, and Anne Grete Hestnes*

2015 was the ZEB Centre's seventh year of operation. The centre has been and continues to be a highly productive collaborative program. Researchers and partner representatives contribute to research, development, and knowledge dissemination in numerous ways. The scientific results are published in scientific journals, conferences, and PhD theses. Results are also made public in trade journals, newspaper, and other media channels such as the internet, radio, and TV. Around 850 publications/contributions have now been published, and more are on the way. In addition, the demonstration projects are proving a rich source of material for the dissemination of ZEB activities, both through their design (e.g. in architecture competitions) and construction, and after completion (e.g. by site visits and nomination/

winning of international architecture awards). In this way results from centre activities are establishing their place in Norwegian and international markets. Recent invitations to contribute to zero emission building projects in USA and China point to the international quality of what ZEB researchers and partners are doing, which is further promoted by our contributions to courses in the USA.

The dissemination of results also occurs in standardization work, both within Standard Norway and through other organizations such as Futurebuilt, where we have provided input for new definitions for (nearly) zero energy buildings and procedures for calculating greenhouse gas emissions for buildings. Dissemination is also taking place through active participation in several International

Energy Agency Tasks and Annexes.

In 2015, we have had the pleasure of announcing the completion of five demonstration projects.

- The residential building ZEB Living Laboratory was completed in September 2015.
- The office building for the Norwegian Defence Estates Agency at Haakonsværn, Bergen will be completed in February 2016.
- The ZEB Pilot House Larvik, completed in 2014.
- Powerhouse Kjørbo which was completed in 2014.



- Five dwellings on the Skarpnes housing estate, Arendal, were completed in 2014.

All five projects have provided valuable input to the ZEB Concept and Definition and will continue to do so during their first years of operation where they will continue to be monitored and analyzed. Four projects are still under development. Construction will start on Heimdal High School and the Campus Evenstad office and educational building in 2016.

Parallel to the development of the ZEB demonstration projects, research is still ongoing in the five work packages, with activities as diverse as nano insulation material development in the laboratories and user and

process studies in the demonstration projects. New material developments are concerned with experimental investigations on increasing the thermal resistance of various concrete recipes by incorporation of aerogel granules and on applying silver particles to make a low-emissivity coating with a total surface emissivity value as low as 0.015. Further, studies have been conducted on alkaline ageing experiments on vacuum insulation panels (VIP), which showed various degrees of degradation and where in general elevated temperatures proved to be the most significant strain caused by ageing when compared to pH-value. We have also performed further studies on hollow silica nanospheres (HSNS), which represent a promising stepping-stone

toward thermal superinsulation materials (SIM).

Advanced façade technologies with integrated VIP, solar collectors, and associated ventilation strategies have been investigated, and component design strategies have been developed. Reflective foils are a promising solution for improving thermal properties of the building envelope, especially in floors. Experimental studies at the ZEB Pilot House Larvik and in the laboratory have been performed in order to verify the performance of floor constructions with reflective foils. In addition, we have proven the limited effects of moisture buffering for internal surface materials on the energy performance of



Heimdal Upper Secondary School and Sports Hall, Trondheim, Norway. The building will have 26,000 m<sup>2</sup> heated floor area (including education, offices, dental clinic). The developer is South-Trøndelag County, the architect is Rambøll/KHR. The level of ambition is ZEB-OM\* (20% of M). Illustration by Skanska and Rambøll/KHR Arkitekter.

buildings. Steinar Grynning defended his PhD thesis in 2015, and the topic was “Transparent facades in low energy office buildings. Numerical simulations and experimental studies”.

To verify the indoor climate a questionnaire survey in pilot building Powerhouse Kjørbo has been done, and indoor climate measurements have been started. The results indicate satisfactory indoor air quality, although the displacement ventilation does not succeed in distributing air equally well to all parts of the office landscape. Models for heat and air distribution through doorways have been tested by full scale measurements both in laboratory and field. These models are useful for correct simulation of simplified heating and ventilation systems where the heat source is placed centrally in the flat or in the corridor if it is an office or school building. A new type of a static heat recovery exchanger for ventilation air is under development. Static exchangers eliminate the air leakages from used to fresh air. This new exchanger type uses a membrane for heat and mass transfer that reduce problems with frosting. Laboratory measurements on a prototype have proven that it works well; effectiveness is higher than expected, but the pressure drop with the chosen configuration is somewhat too high and need further development.

With the completion of the ZEB Living Laboratory, a unique tool for analysis of user-technology-interaction in residential buildings has become available. Experiments started in the autumn 2015. Six groups of

people will live in the ZEB Living Laboratory for 25 days each, and the experiments will continue until April 2016. It is still too early to conclude on the outcome. In addition, a lot of work has gone into the planning and evaluation of the completed demonstration projects both on design and construction processes and for end-users. A number of reports and articles will be published in 2016. With regard to WP4’s activities on energy efficient use and operation, one of the most important outcomes was the large number of guided tours and media interviews conducted about the Living Lab. This provided ample opportunity to involve the public in ZEB Centre research.

Continuing the development of state-of-the-art laboratories has been an important activity for the ZEB Centre. The ZEB Test Cells Laboratory and the ZEB Living Laboratory were completed in 2015 and are described in more detail later in this report. Furthermore, The Research Council of Norway decided to fund the development and construction of a ZEB Flexible Laboratory. This facility will be an 1800 m<sup>2</sup> living laboratory facility for testing of full-scale integrated systems for zero emission commercial and public buildings in a Nordic climate. This laboratory is also described elsewhere in this report.

We have now entered 2016, which is the final full year where the ZEB Centre has FME status (Forskningssentre for miljøvennlig energi – Centres for Environment-friendly Energy Research), appointed by the Research Council of Norway. An important activity in the second half of 2015 was therefore applying

### for a new FME, the **FME Centre on Zero Emission Neighbourhoods in Smart Cities.**

This is a field where we see the next logical step for the development of a sustainable built environment. Even if the ZEB Centre has proven that zero emission buildings can be built, a lot of work still remains to improve the environmental performance of the built environment as a whole. The vision of the new centre will be: Sustainable neighbourhoods with zero greenhouse gas emissions. The Centre aims to speed up decarbonisation of the building stock (existing and new), use more renewable energy sources, and create positive synergies between the building stock, energy, ICT and mobility systems, and citizens. The Centre will work with new and existing neighbourhoods in cities and communities with different building typologies, infrastructures, mobility, and users. The new centre will deliver added value for Norwegian and international society through it’s new, strategic cooperation between the building and energy sectors and will advance the state of the art in areas needed to accelerate the transition to a low carbon society. The duration of the centre, if funded, will be 2016 to 2023. In addition, the ZEB Centre Board has initiated a discussion about the future form of the ZEB Centre and how it may continue its work.

The ZEB Centre research period might soon be over (as an FME, funded by the Research Council of Norway), but the results, including research results, materials, products and real full scale buildings, will forever be available as visible functioning proof of the zero emission building concept. Research and development activities will continue.

# ORGANIZATION

## Organizational Structure

The Research Centre is organized as a joint NTNU/SINTEF unit, hosted by The Norwegian University of Science and Technology (NTNU). The Centre leadership is thus shared between the two organizations.

**Centre Director:** Professor, PhD **Arild Gustavsen**, NTNU, Faculty of Architecture and Fine Art, Dept. of Architectural Design, History and Technology.  
Sept-Dec. 2015: Professor **Anne Grete Hestnes**, NTNU, Faculty of Architecture and Fine Art, Dept. of Architectural Design, History and Technology.

**Centre Manager:** **Senior** Senior researcher, PhD **Anne Gunnarshaug Lien**, SINTEF Building and Infrastructure, Architecture and Technology  
From Jan. 2016: Senior researcher, PhD **Ruth Woods**, SINTEF Building and Infrastructure, Architecture and Technology.

**Senior Scientific Advisor:** Professor **Anne Grete Hestnes**, NTNU, Faculty of Architecture and Fine Art, Dept. of Architectural Design, History and Technology.

**Centre Industry Liaison:** Vice President, Research, **Terje Jacobsen**, SINTEF Building and Infrastructure.

**European Research Contacts:** Professor **Annemie Wyckmans**, NTNU, Faculty of Architecture and Fine Art, Dept. of Architectural Design, History and Technology.

The Centre has a General Assembly and an Executive Board. The General Assembly includes all partners. The General Assembly gives guidance to the Board in their decision-making on major project management issues and approval of the semi-annual implementation plans. *The Board* is responsible for the quality and progress of the research activities towards the Research Council of Norway and for the allocation of funds to the various activities. The Board is comprised of the Centre management and partner representatives. The user partners have majority on the Board and are selected from different groups of user partners.

The International Advisory Committee has representatives from leading international institutes and universities and will ensure international relevance and quality of the work performed. The Reference Group consists of representatives from end user groups and relevant organizations and is used both

as a forum for testing the relevance of the work and to help disseminate the results to appropriate Norwegian audiences.

The main participating NTNU departments are Dept. of Architectural Design, History and Technology (host institution), Dept. of Civil and Transport Engineering, Dept. of Interdisciplinary Studies of Culture, and Dept. of Energy and Process Engineering. The main SINTEF units participating in the Centre are SINTEF Building and Infrastructure, SINTEF Materials and Chemistry, and SINTEF Energy Research. In addition, cooperation is established with other relevant FMEs. SINTEF has status as research partner in the Centre.

The Work Package (WP) leaders coordinate the research tasks within the WPs, and report to the Centre management.



*The Centre leadership: Thomas Berker, Inger Andresen, Bjørn Petter Jelle, Ruth Woods, Arild Gustavsen, Anne Grete Hestnes, Terje Jacobsen and Hans Martin Mathisen.*

*Birgit Risholt was not present when the photograph was taken. Photo: Ole Tolstad*

## The leaders of the Work Packages are:

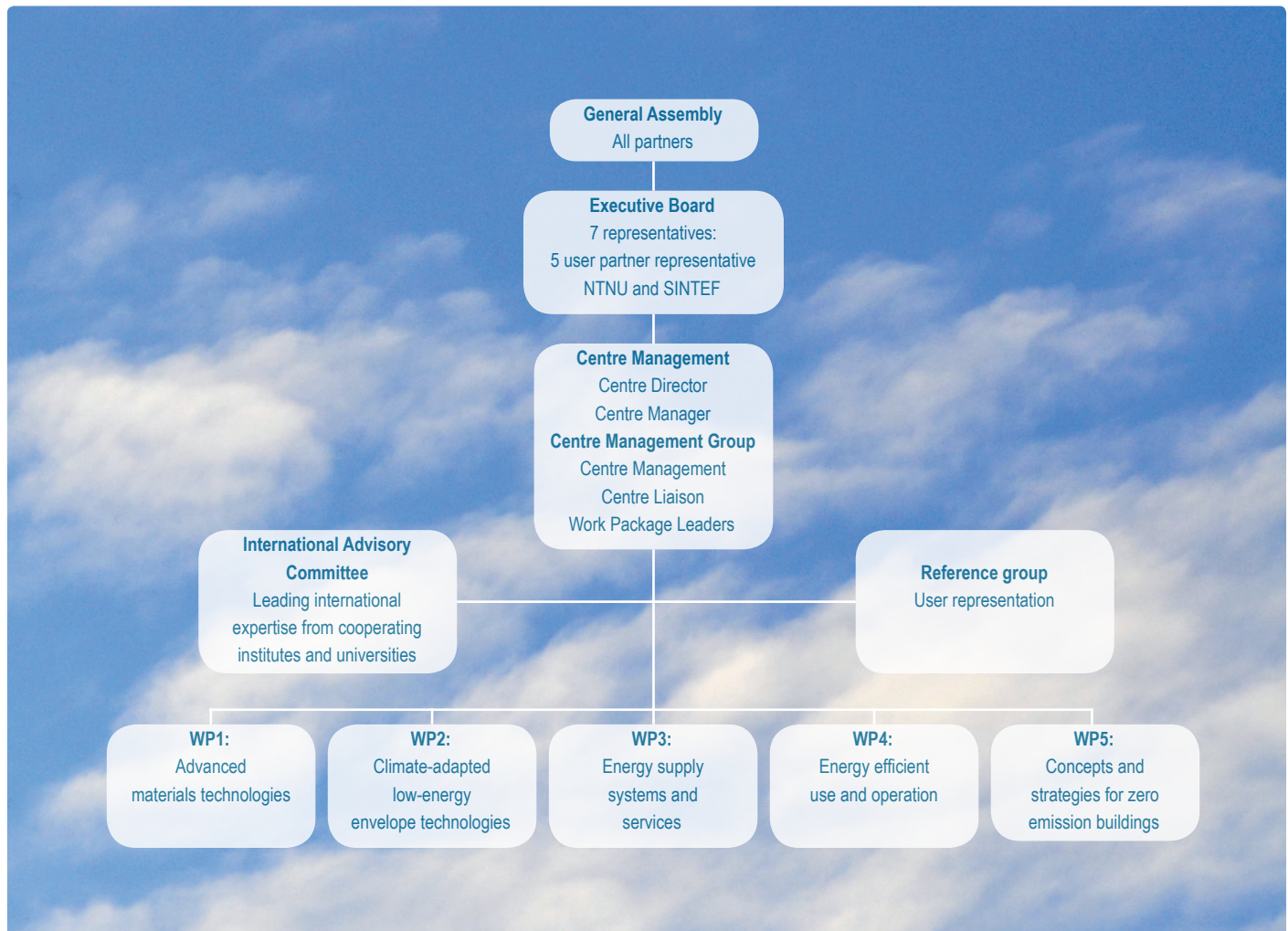
**WP1:** Professor, PhD Bjørn Petter Jelle, Department of Civil and Transport Engineering, NTNU, Chief Scientist, SINTEF Buildings and Infrastructure

**WP2:** Research Manager PhD Birgit Risholt, SINTEF Buildings and Infrastructure

**WP3:** Professor, PhD Hans Martin Mathisen, Dept. of Energy and Process Engineering, NTNU

**WP4:** Professor, PhD Thomas Berker, Dept. of Interdisciplinary Studies of Culture, NTNU

**WP5:** Professor, PhD Inger Andresen, Dept. of Architectural Design, History and Technology, NTNU



# MAIN ACTIVITIES IN 2015



## **WP1: Advanced Materials Technologies**

Goal: Development of new and innovative materials and solutions, as well as improvements of the current state-of-the-art technologies.

In 2015 the main research activities have been:

- Nano insulation materials
- Advanced glass and coating materials
- Material optimization of zero emission buildings

The use of advanced window technologies are further elaborated upon in the results chapter.

## **WP2: Climate Adapted, Low Energy Envelope Technologies**

Goal: Development of climate adapted, verified, and cost effective solutions for new and existing building envelopes (roof, walls

and floors) that will give the least possible heat loss and at the same time reduced need for cooling.

In 2015 the main research activities have been:

- Windows and facades, optimization of daylight conditions, and robust solar shading
- Energy and comfort performance of a double skin window
- Dynamic glazing systems
- Cost – and material optimized envelope solutions
- Mathematical optimization coupled to building performance simulation

Optimized envelope solutions are further elaborated upon in the results chapter.

## **WP3: Energy Supply Systems and Services**

Goal: Development of new solutions

for energy supply systems and building services systems with reasonable energy and indoor environment performance appropriate for zero emission buildings.

The main activities in 2015 in WP3 have been:

- Energy supply, grid interaction, and user related issues
- Indoor environment and building services

Studies associated with energy supply systems are elaborated upon in the results chapter.

## **WP4: Use, Operation, and Implementation**

Goal: Development of knowledge and tools which assure usability and acceptance, maintainability and efficiency, and implementation of zero emission buildings.

In 2015 the main activities in WP4 have been:

- Pilot buildings: Evaluation of the building process, initial use phase, and daily operation and use
- ZEB living Lab
- Green leases and other measures to deal with the “principal actor problem” in the built environment (in collaboration with NTNU’s Centre for Real Estate Facilities Management)
- “ZEBonomics”. Conclusion: Market potential and market creation “

The residential experiment in the ZEB Living Laboratory is described in the results chapter.

### **WP5: Concepts and Strategies for Zero Emission Buildings**

Goal: Development of concrete concepts for zero emission buildings which can be translated into realized pilot buildings within

the time frame of the centre.

The main research activities in 2015 in WP5 have been:

- ZEB definition
- Implementation of ZEBs in norms and regulations
- Evaluation of pilot buildings
- Follow-up design and construction
- Generalization of results

Activities and results connected to several ZEB pilot buildings are elaborated upon in the results chapter.

### **Laboratories and Infrastructure:**

Goal: Development and operation of building laboratories for investigation, testing and demonstration of new and innovative building technologies.

Experiments have been and are being carried out in these facilities, both within the

ZEB Centre and within other projects using ZEB Living Laboratory and ZEB Test Cell Laboratory

The construction of the following laboratories has been completed:

- ZEB Living Laboratory
- ZEB Test Cell Laboratory

The buildings are being used for studies of user-technology interaction and research on interconnected zero emission building technologies. The laboratory facilities are an arena for risk reduction in implementation of zero emission building technologies.

The ZEB laboratories are further described in the results chapter.

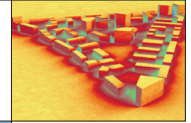
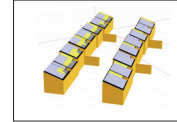


The RAWI box in Sintef Laboratorium in Trondheim. Photo: Remy Eik/SINTEF

# RESULTS RESULTATER

Results from some research activities  
are presented in a series of short articles

Et utvalg av forskningsresultatene  
er vist i form av korte artikler





## HOW SHOULD WE BUILD A LOW CARBON SOCIETY? HVORDAN BYGGE ET LAVUTSLIPPSAMFUNN?

Ann Kristin Kvellheim (NTNU)

The building sector can play a significant role in the green transformation that society is facing. EU aims to reduce greenhouse gas emissions by 80-95 %, and the power supply is to be fossil-free by 2050. To be able to reach this goal, it is important that the building sector reduces its energy use significantly, both in new and existing buildings. This is a major challenge, one that requires the development and introduction of innovative solutions at a much faster pace than is currently taking place. Unfortunately, the building sector is not known for being innovative and is struggling with a slow re-education process and numerous complaints. How can it contribute to a green transformation, and what changes are required?

Zero emission construction is an innovative concept that has been developed through research by the ZEB centre. An important part of my PhD research is a system analysis of

zero emission buildings as innovation system. Through this analysis, it is possible to identify strengths and weaknesses in the system, and results from the analysis may ease efforts to dismantle targeted barriers. An innovation system is defined in different ways, but the main point of the system understanding is to look into the context around the elements that affect innovation. Here the interaction between institutions and the learning processes are particularly important. Indicators that are analysed include human resource development and dissemination, market proliferation, innovation, legitimacy, and what is known as “guided search”. Through expert interviews with representatives from industry and government, I have surveyed which factors will enable zero emission buildings to achieve a significant market share. The following are some preliminary results from an analysis that will be completed and published in 2016.

Not everyone agrees that zero emission buildings are a good idea, and several of my informants are interested in discussing the requirements for zero emission buildings. In Norway, electricity generation is largely based on hydropower, and we are in the process of building up a surplus which, if the transfer capacity is not increased, will be “locked in”. We are therefore in a situation with a plentiful supply of clean and affordable hydropower, where leading players from industry are investing in different kinds of highly energy efficient buildings. They are even investing in zero emission buildings that produce energy. Currently, we are just talking about a few research projects, but many within the industry believe that these kinds of buildings will constitute a large part of construction activity in the not too distant future. These actors are getting involved, not necessarily just because they feel the need to be socially responsible, but because they want to gather expertise and establish a reputation as experts in the field.

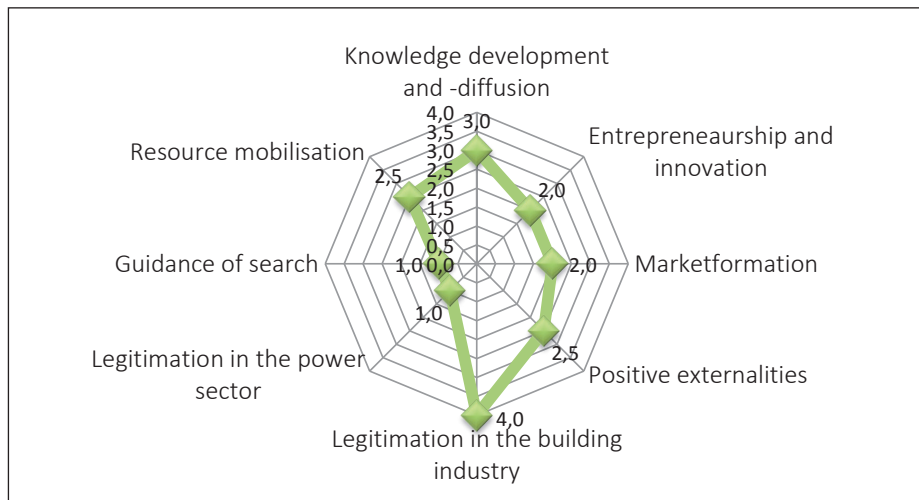


In this way, they will already be well positioned when the demand for zero emission buildings increases. Politics influence the development of zero emission buildings, and policies may significantly affect the speed and direction of the development. The development to date is marked by a lack of control and weak or inconsistent signals. A key question is therefore whether it makes sense to agree on a CO<sub>2</sub> factor for the use of electricity in Norway. If yes, what should this factor be? There are a number of different opinions about this issue, and the positions taken affect further reasoning. Reducing greenhouse gas emissions from the operation of buildings is not a significant challenge in Norwegian buildings, nor is the reduction a solution to reducing greenhouse gas emissions in general. This is because electricity based on hydropower is the dominant source of energy, and the CO<sub>2</sub> emissions from Norwegian electricity have been considered to be zero. However, because energy efficiency

is considered sensible in any case, efforts have still been made to reduce energy use in new and existing buildings. The question is whether this could have been achieved by shifting focus from kWh to greenhouse gas emissions and by expanding the perspective from the operational phase to the life cycle phase of the building? In this way, a holistic focus could be achieved, one where material optimization becomes particularly important. The ZEB centre bases its definition on a European energy mix for buildings that produce energy, and the greenhouse gas emissions calculations are based on this. Leading industrial players advocate this approach, one where inputs and processes are examined and optimized.

Due the absence of clear political signals, some representatives from the building industry have chosen their own interpretation, often based on EU developments. In this way the development of a variety of concepts are

encouraged. This may be considered a good thing during the start of an innovation system. In a similar way to many other innovation systems, some actors are slowing down the pace of development of zero emission buildings because new products threaten their established product portfolio. There is also a lack of willingness to share experiences, especially negative, with other members of the industry. This situation may be helped because internal knowledge about the topic is accumulating, and interest in participating in research in this has area increased. Being part of a competent research environment also reduces the risk inherent in making an early start with a new concept. Pilot projects have helped to develop new knowledge, and this kind of project is often very visible both during development and after completion. This provides the market with valuable learning and with publicity for the members of the industry involved, and it shows potential tenants and contractors that the concepts do work.



Reducing the negative impact on the global climate is an important reason for developing a new building concept, even though the effect is controversial. The good news is that the effect of zero emission buildings is an issue on which most of the actors appear to agree. Also, when buildings produce more energy than they use, they will in the future be able to reduce the problems with power peaks if adequate storage is in place. If, in the future, zero emission buildings are to become a larger part of the Norwegian construction market, the potential benefits of this concept need to be promoted. An obvious but vital point is therefore that it is essential to have a better understanding of how greenhouse gas emissions from buildings should be considered.

*Preliminary assessment of indicators for the development of zero emission buildings.  
Illustration: Ann Kristin Kvellheim*

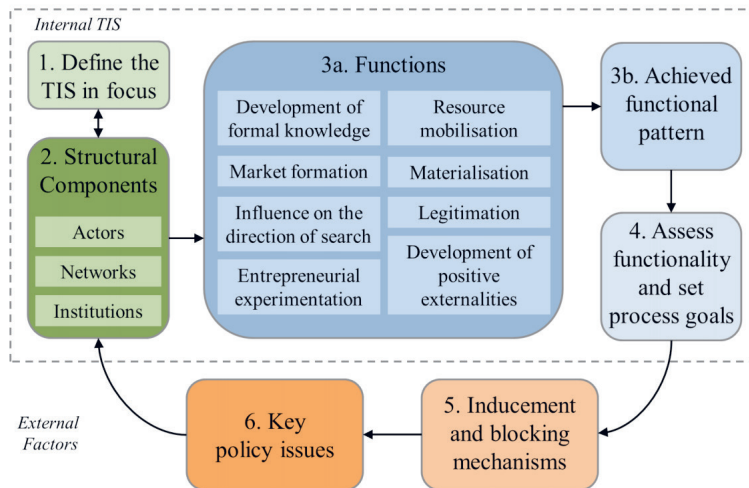
Byggsektoren kan ta en betydelig rolle i det grønne skiftet vi står overfor. EU har som målsetting å redusere klimagassutslipp med 80-95 prosent, og kraftforsyningen skal bli fossil-fri innen 2050. For å nå denne målsettingen er det en viktig forutsetning at byggsektoren reduserer sin energibruk betydelig, både i nye og eksisterende bygninger. Dette er en solid utfordring som krever at det utvikles og tas i bruk innovative løsninger i et mye raskere tempo enn til nå. Byggsektoren er ikke kjent for å være innovativ, men sliter med lange læringskurver og mange reklamasjoner. Hvordan kan den bidra til det grønne skiftet, og hvilke endringer er det som trengs?

Nullutslippsbygg er et innovativt konsept som er videreutviklet gjennom forskningscenteret ZEB. I min avhandling gjør jeg en systemanalyse av nullutslippsbygg som innovasjonssystem. Gjennom en slik analyse er det mulig å identifisere styrker og svakheter og på denne måten gjøre arbeidet med å bygge ned barrierer mer målrettet. Et innovasjonssystem kan defineres på ulike måter, men hovedpoenget med systemaspektet er å se på elementene som påvirker en innovasjon i sammenheng. Her blir interaksjon, institusjoner og læring spesielt viktig. Indikatorer som blir analysert er blant annet kompetanseutvikling og –spredning, markedsformering, nyskaping, legitimering og såkalt «veiledet søk». Gjennom ekspertintervjuer med representanter fra bransjen og myndighetene har jeg kartlagt hva som er viktig dersom nullutslippsbygg skal få en betydelig markedsandel. Dette er noen foreløpige resultater av analysen som vil bli fullført og publisert i 2016.

Det er ikke åpenbart for alle at nullutslippsbygg er en god ide, og flere av mine informanter problematiserer forutsetningene for nullutslippsbygg. I Norge består kraftproduksjonen i all vesentlighet av vannkraft, og vi er i ferd med å opparbeide et overskudd som, dersom ikke ny overføringskapasitet kommer på plass, er «innelåst». I en situasjon med rikelig tilgang på ren og rimelig vannkraft investerer likevel ledende bransjeaktører i ulike varianter av svært energieffektive bygg. Det investeres til og med i nullutslippsbygg som produserer energi på eller ved bygget. Foreløpig er det snakk om noen få forskningsprosjekter, men

mange i bransjen har tro på at slike bygg vil utgjøre en stor del av byggeaktiviteten i en ikke altfor fjern fremtid. Disse aktørene er aktivt med i utviklingen, ikke nødvendigvis bare for å ta et samfunnsansvar, men fordi de ønsker å posisjonere seg i form av kompetanse og renommé slik at de er godt rustet når etterspørselen øker. Det ligger mye politikk i utviklingen av nullutslippsbygg. Politisk styring vil kunne påvirke hastighet og retning på utviklingen i betydelig grad. Utviklingen frem til nå er imidlertid preget av mangel på styring og svake eller sprikende signaler. Et sentralt spørsmål er om det er fornuftig å legge en CO<sub>2</sub> faktor på bruk av

## Components in a technological innovation system (TIS) analysis



Based on: A. Bergek, S. Jacobsson, B. Carlsson, S. Lindmark, and A. Rickne. Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis. *Research policy*, 37(3):407–429, 2008a. A. Bergek, S. Jacobsson, and B. A. Sanden. 'legitimation' and 'development of positive externalities': two key processes in the formation phase of technological innovation systems. *Technology Analysis & Strategic Management*, 20(5):575–592, 2008b

elektrisitet i Norge? Hvis svaret er ja, hva skal så denne faktoren være? Det er høyst ulike meninger om dette spørsmålet, og hvilken posisjon du tar påvirker videre resonnement. Ved å se på klimagassutslipp fra drift av bygg fremstår ikke norske bygg som en betydelig utfordring. De fremstår heller ikke som en løsning for å få ned klimagassutslippene, siden elektrisitet basert på vannkraft er den dominerende energikilden, og CO<sub>2</sub> utslipp fra norsk kraft har vært satt til null. Siden energieffektivisering uansett anses som fornuftig, er det likevel gjort en innsats for å redusere energibruken i både nye og eksisterende bygninger. Spørsmålet er om det kunne vært oppnådd mer ved å skifte fokus fra kWh til klimagassutslipp og utvide perspektivet fra driftsfasen til livsløpsfasen til bygget? På denne måten får man et helhetlig fokus hvor særlig materialoptimalisering blir viktig. Forskningscenteret ZEB legger til grunn en europeisk energimix for bygg som produserer energi, og beregner klimagassbelastningen

ut fra denne. Ledende bransjeaktører er advokater for denne tilnærmingen, hvor innsatsfaktorer og prosesser blir gjennomgått og optimalisert.

I mangel av tydelige styringssignaler velger noen bransjeaktører å tolke selv, gjerne med utgangspunkt i utviklingen i EU. Da kan man få et mangfold av konsepter, noe som kan være bra i startfasen av et innovasjonssystem. Som mange andre innovasjonssystemer preges også utviklingen av nullutslippsbygg av at enkelte aktører forsinker tempoet fordi nye produkter truer deres etablerte produktportefølje. Det er også en manglende vilje til å dele erfaringer, særlig negative, med andre aktører i bransjen. I stadig større grad bygger aktører opp intern kunnskap om temaet, og interessen er stor for å delta i forskningen på området. Å være del av et kompetent forskningsmiljø reduserer også risikoen som ligger i å være tidlig ute med et nytt konsept. Gjennom forbildeprosjekter er

det skjedd mye kompetanseheving, og slike prosjekter blir gjerne synliggjort også etter ferdigstillelse. Dette gir verdifull læring samt markedsføring for aktørene på tilbydersiden, og viser potensielle leietakere eller byggherrer at konseptet virker.

Redusert klimabelastning er et anliggende i utviklingen av nye bygningskonsept, selv om effekten er omdiskutert. Derimot er effektproblematikk, hvor bygg som produserer mer energi enn de selv bruker i større grad kan bidra til å utjevne effekttopper dersom adekvate lagringsløsninger kommer på plass, et punkt som aktørene later til å være enige om. Dersom nullutslippsbygg i fremtiden skal bli en større del av det norske byggmarkedet, må fordelene og potensialet som ligger i dette konseptet komme bedre frem. Da er det et vesentlig poeng å oppnå en forståelse for hvordan man skal se på klimagassbelastningene fra bygg.

*My thesis analyses zero-emission buildings as a system of innovation, mapping the strengths and weaknesses of the processes involved. In connection with this work, I have conducted interviews with some ZEB partners: BNL, ByBo, DiBK, Entra, Skanska, Statsbygg and South Trøndelag County Council.*



## NEW CONSTRUCTION ON CAMPUS EVENSTAD - THE AIM IS TO BUILD THE MOST CLIMATE FRIENDLY BUILDING IN NORWAY

### NYBYGG PÅ CAMPUS EVENSTAD SKAL BLI LANDETS BESTE KLIMABYGG

Zdena Cervenka (Statsbygg)

Statsbygg intends to build what could become the country's most climate friendly building. The new building at Campus Evenstad at Hedmark University College aims to achieve zero greenhouse gas emissions through the building's lifetime. This will be achieved by taking into account materials, construction, transportation, operation, and replacement.

*- Climate change is our biggest environmental challenge and the construction industry must be part of the solution. We are showing how through our work on a building that has a low greenhouse gas footprint, says Statsbygg's CEO, Harald V. Nikolaisen.*

The administrative and teaching building at Campus Evenstad, Hedmark University College is Statsbygg's contribution to ZEB. It will be the first zero emission building built to the ZEB-COM level. The project has

developed a number of innovative solutions, including a new construction system using solid wood and a combined heat and power plant based on gasification of wood chips. The building will be completed in the autumn, 2016.

The building is built, designed, and constructed with Ø.M. Fjeld as the design-build contractor, Ola Roald Arkitektur as architect, Asplan Viak and Høyer Finseth as consultant engineers, and Massivlust as solid wood supplier. Civitas and ZEB have contributed with greenhouse gas analyses and expert advice regarding the ZEB-COM target.

ZEB-COM is defined as a building where emissions from the construction phase (C = construction), energy use in the operational phase (O = operation), and the production of building materials (M = materials) are

compensated for over the building's lifetime by local renewable energy production. The production of renewable energy covers the building's demand for electricity and thermal energy, and it is also exported to other buildings/ users as a substitute for electricity and heat that comes from sources with higher greenhouse gas emissions. The ZEB centre has defined the criteria and rules for calculation for buildings that aim to achieve ZEB-COM.

#### Materials and construction phase

The greenhouse gas emissions for the use of materials in the building and the technical installations have been estimated, and measures to reduce these emissions have been looked into. The calculations are based on [klimagassregnskap.no](http://klimagassregnskap.no) which was connected to the BIM/ IFC model, ZEB's

research work and previous pilot projects, EPDs, and the LCA database Ecoinvent. Greenhouse gas emissions have been reduced by over 50 % compared to what is found in a standard reference building.

The building will be constructed with solid wood as a primary building material. The exterior walls will be made up of prefabricated elements with solid wood and insulation from locally produced and renewable wood fibre. The solid wood elements have been developed in collaboration with the Massivlust Company.

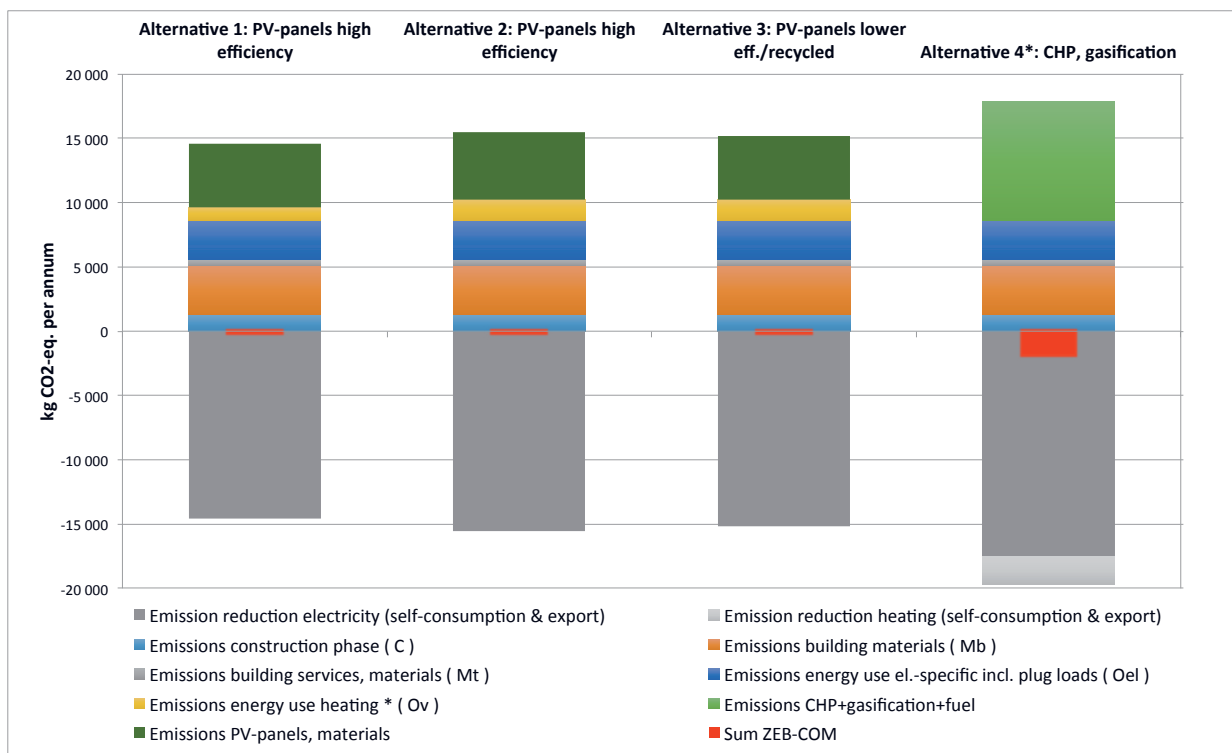
To enable evaluation of alternative design solutions for the various building components, a matrix was drawn up which provides an overview of the structure, cost, greenhouse gas emissions, and requirements for building physics, acoustics, and fire. This has allowed continuous consideration of potential solutions and options and their greenhouse gas emissions.

The greenhouse gas emissions from the transport of building materials, transport of personnel, earthworks and other construction works (construction machinery, building

electricity, building drying, barracks, etc.) have been estimated based on the contractor's existing experience and experience with ZEB pilot projects.

### Ventilation

The building will have a hybrid ventilation system consisting primarily of natural ventilation through windows in summer and mechanically balanced ventilation with heat recovery in winter. The plant will have minimal complexity due to a minimum of control devices. The aim is to optimize the building



The figure illustrates the total greenhouse gas emissions for four alternative energy solutions. All the solutions meet the objective of compensating for emissions from the construction phase, the production and transportation of materials, and the operation of the building (ZEB-COM). Source: Asplan Viak.

so that natural ventilation can be used to the greatest possible extent. The air enters the office landscape and classrooms via both openable windows and ventilation valves. The air moves into common areas via overflow valves from the offices. Above the stairs, there is a skylight with automatic openable windows for natural ventilation. Mechanical air removal takes place through a grate in a wall in the stairwell. The automatic windows included in an operating strategy also ensure optimal use of natural ventilation even when there are no people in the building.

## Energy

The figure shows the ZEB COM calculations for four alternative solutions for energy supply. The first three alternatives are designed to result in zero emissions with only the export of electricity. The estimated area of solar cells necessary to achieve this is between 580 m<sup>2</sup> (alternative 1) and 800 m<sup>2</sup> (alternative 3).

The dimensions for alternative 4, "Gasification", are intended to cover both electricity and heat requirements. This is an optimal energy solution integrated with the rest of Campus Evenstad. The CHP plant is a combined heat and power plant that will replace an existing pellets boiler and an electric boiler. The surplus will be exported to other parts of the campus. The planned CHP plant will have an overall efficiency of 72% and an electrical efficiency of 21% and will use wood chips from a local supplier. Overall, this solution will more than compensate for greenhouse gas emissions from the construction phase (C), the operational phase (O), and from the production of materials (M) – i.e. the net emissions gains.

Statsbygg skal bygge det som kan bli landets mest klimavennlige bygg. Målet for et nytt bygg på Campus Evenstad ved Høgskolen i Hedmark er: Null utslipp av klimagasser over levetiden - inkludert materialer, oppføring, transport, drift og utskifting.

- Klimaendringer er vår største miljøutfordring og byggenæringen må være en del av løsningen. Vi går foran med et bygg som har lavest mulig klimagassfotavtrykk, sier administrerende direktør i Statsbygg, Harald V. Nikolaisen.

Statsbygg bidrar i ZEB med å bygge det første nullutslippsbygget på nivået ZEB-COM - administrasjons- og undervisningsbygget på Campus Evenstad, Høgskolen i Hedmark. I prosjektet er det utviklet en rekke innovative løsninger og ny kunnskap, bl.a. knyttet til et nytt konstruksjonssystem basert på massivtre og en kombinert kraft-varme maskin basert på gassifisering av flis. Bygget vil stå ferdig høsten 2016.

Bygget prosjekteres og oppføres som en samspillsentreprise med Ø.M. Fjeld som totalentreprenør og med Ola Roald Arkitektur som arkitekt, Asplan Viak og Høyer Finseth som rådgivere og Massivlust som massivtreleverandør. Civitas og ZEB har bidratt med klimagassanalyser og spesialrådgivning mht. ZEB-COM målsetningen.

ZEB-COM er definert som et bygg der utslippene fra byggefasen (C=construction), energibruk i driftsfasen (O=operation) og produksjon av materialer til bygget (M=materials) kompenseres over livsløpet med lokal fornybar energiproduksjon. Den fornybare energiproduksjonen går med til å dekke byggets eget forbruk av el og varme og eksporteres til andre bygg/brukere til erstatning for elektrisitet og varme med høyere klimagassutslipp. ZEB-senteret har definert kriterier og regneregler for bygg som skal oppnå ZEB-COM.



Illustration: Ola Roald Arkitektur

## Materialbruk og byggefase

Det er beregnet klimagassutslipp for materialbruken i bygget og de tekniske installasjonene, og sett på tiltak for å redusere disse utslippene. Beregningene er gjort med basis i [klimagassregnskap.no](http://klimagassregnskap.no) koblet til BIM/IFC-modellen, ZEB's forskningsresultater og tidligere pilotprosjekter, EPD'er og LCA databasen Ecoinvent. Klimagassutslippene er redusert med i overkant av 50 prosent sammenlignet med standard referansebygg.

Det har vært en forutsetning at bygget skal oppføres med massivtre som primært byggemateriale. Blant annet skal ytterveggene prefabrikeres som elementer med massivtre, og isolasjonen skal baseres på kortreist og fornybar trefiber. Elementene utvikles i samarbeid med Massivlust.

For å vurdere alternative konstruksjonsløsninger for ulike bygningsdeler, er det utarbeidet en matrise med oversikt over oppbygning, kostnad, klimagassutslipp, samt krav til bygningsfysikk, akustikk og brann. På denne måten er det blitt gjort underveisvurderinger av potensielle løsninger og de ulike alternativenes klimagassutslipp.

Basert på erfaringstall hos entreprenør samt tidligere ZEB-pilotprosjekter, er det beregnet klimagassutslipp fra transport av byggevarer, transport av personell, grunnarbeider og øvrige byggearbeid (anleggsmaskiner, byggestrøm, byggørke, brakkerigg, mv.).

## Ventilasjon

Bygget får et hybrid ventilasjonsanlegg bestående av hovedsakelig naturlig ventilasjon gjennom vinduer i sommerhalvåret samt mekanisk balansert ventilasjon med varmegjenvinning i vinterhalvåret. Anlegget skal ha minimal kompleksitet med et minimum av reguleringsenheter. Det søkes å optimalisere bygget slik at naturlig ventilasjon brukes i størst mulig grad. Lufta kommer inn i kontor, landskap og klasserom via både åpningsbare vinduer og ventilasjonsventil. Lufta beveger seg så inn i felles sone via overstrømningsventiler fra kontorene. Over trappa er det et overlys med automatisk åpningsbare vinduer for naturlig ventilasjon. Mekanisk avtrekk skjer via rist i vegg i trapperom. De automatiske vinduene inngår i driftsstrategien for å sikre optimal bruk av naturlig ventilasjon til lufting også når det ikke er personer i bygget.

## Energiforsyning

Figuren viser ZEB-COM-regnskapet for fire alternative løsninger for energiforsyning. De tre første alternativene er dimensjonert for å gi null klimagassutslipp med kun eksport av elektrisitet. Solcelleareal for å oppnå dette er beregnet til mellom ca. 580 m<sup>2</sup> (alt 1) og ca. 800 m<sup>2</sup> (alt 3).

Alternativ 4 "Gassifisering" er dimensjonert for dekning av både elektrisitets- og varmebehovet og er en optimal energiløsning integrert med resten av Campus Evenstad. CHP-anlegget er et kombinert kraft-varmeanlegg (Combined Heat and Power) som erstatter eksisterende pelletskjel og el-kjel og som gir overskudd til forsyning/eksport til andre deler av Campus. CHP-maskinen som er tenkt benyttet har en totalvirkningsgrad på 72% og en el-virkningsgrad på 21%, og skal benytte flis fra lokal leverandør. Totalt sett vil man med denne løsningen overkompensere for utslipp av klimagasser fra konstruksjonsfasen (C), driftsfasen (O) og fra produksjon av materialer (M) – dvs. netto utslippsgevinst.

*The design of the new educational facilities at Campus Evenstad are done in cooperation between Statsbygg (developer), Ola Roald (architect), Asplan Viak and Høyer Finseth (technical consultants), and Civitas (GHG analyses).*



## POWERHOUSE KJØRBO

Bjørn Jenssen (SKANSKA)

The project *Powerhouse Kjørbo* consists of a total refurbishment of two office blocks in Sandvika, Norway. The original buildings were built in 1979, scenically situated close to the outlet of the river Sandvikselva.

Powerhouse Kjørbo is the first project to be realized by the Powerhouse Collaboration, consisting of Entra Eiendom, Skanska, Snøhetta, the environmental NGO ZERO, the aluminium company Hydro, the aluminium profile company Sapa, and the consulting firm Asplan Viak. The main objective of the Powerhouse Collaboration is to demonstrate that profitable, energy-positive buildings are possible - also in Norway.

Refurbishment work started March 18. 2013 and the project was completed and handed over on February 5. 2014. The total heated floor space that was renovated is 5,180 m<sup>2</sup>.

One of the goals of the project was to make an energy positive building by compensating for the energy demand for the production of materials and components, construction, and energy for operation. As well as end-of-life treatment with on-site production of renewable energy. Another important goal was the achievement of BREEAM outstanding, with a good indoor environment as one of several objectives. In addition, profitability was a key objective for all the parties involved in the project.

Life cycle analysis was used to establish the primary energy balance. It was used actively throughout the interdisciplinary and iterative design process to ensure decision making based on a lifecycle perspective<sup>1</sup>.

Embodied energy as well as energy used during construction and for transport of materials is calculated as primary energy, but it can be converted to average yearly

equivalent electricity through the use of the primary energy factors throughout the buildings' expected lifetime<sup>2</sup>.

The equivalent yearly embodied electricity for all materials used throughout the buildings' expected 60 year lifetime (after total refurbishment) is estimated to be 61,716 kWh/year (11.91 kWh/m<sup>2</sup>/year). The equivalent yearly embodied electricity for the construction and transport of materials is calculated to be 7,082 kWh/year (1.37 kWh/m<sup>2</sup>/year).

The measured first year energy demand for operation and the energy production matches well with calculated values from design. Total measured first year energy use for ventilation, space and tap water heating, cooling, ventilation, and circulation pumps was 122,542 kWh (23.65 kWh/m<sup>2</sup>) while the predicted first year use was 121,947 kWh (23.54 kWh/m<sup>2</sup>). When adding energy use for plug-loads, the measured energy use adds



up to 181,497 kWh (35.04 kWh/m<sup>2</sup>), while the predicted first year use was 174,859 kWh (33.76 kWh/m<sup>2</sup>).

In addition, the buildings are equipped with a data centre. Total energy use for the computer servers in the centre during the first year of operation was 40,836 kWh (7.88 kWh/m<sup>2</sup>). Thus, the total measured first year energy use was 222.333 kWh (42.93 kWh/m<sup>2</sup>). This implies a reduction of approximately 82.5 % compared to the yearly use before refurbishment, typically measured to around 1,270,000 kWh (245.00 kWh/m<sup>2</sup>).

The roof mounted PV system produced 223,119 kWh the first year of full operation, while the predicted first year production was 227,782 kWh.

Powerhouse Kjørbo is the first building in Norway to achieve BREEAM outstanding, and user surveys based on the first year of operation show that more than 87.5 % of the users were satisfied with the thermal environment, while more than 95 % were satisfied with the perceived indoor air quality<sup>3</sup>. In addition, all parties in the Powerhouse

Collaboration have achieved their profitability requirements.

Even though Powerhouse Kjørbo is only at the start of its expected 60 year lifetime, operation is on track, and all objectives in the project seem to be within reach. This implies that Powerhouse Kjørbo probably is the the first profitable, energy-positive building ever built in Norway.



*Spiral staircase - Powerhouse Kjørbo. Photo: Anne Gunnarshaug Lien*

Prosjektet *Powerhouse Kjørbo* består av en total rehabilitering av to kontorblokker i Sandvika, Norge. De opprinnelige byggene ble oppført i 1979, og ligger naturskjønt til nær utløpet av Sandvikselva.

Powerhouse Kjørbo er det første prosjektet gjennomført av Powerhouse-samarbeidet, som består av Entra Eiendom, Skanska, Snøhetta, miljøorganisasjonen ZERO, aluminiumsselskapet Hydro, aluminiumsprofilselskapet Sapa og rådgivningsselskapet Asplan Viak. Powerhouse-samarbeidets hovedmål er å vise at lønnsomme plussenergibygg er realiserbare – også i Norge. Rehabiliteringsarbeidet startet 18. mars 2013, og prosjektet var ferdigstilt og overlevert 5. februar 2014. Totalt rehabilitert oppvarmet areal er 5 180 m<sup>2</sup>.

Et av målene med prosjektet var å konstruere et plussenergibygg, som gjennom fornybar energiproduksjon på tomten kompensere for energibehov knyttet til produksjon av materialer og komponenter, bygginstallasjon, drift og avhending etter endt livsløp. En annen viktig målsetning var å oppnå BREEAM Outstanding-sertifisering, der godt inneklime utgjør et av flere kriterier. Dessuten var lønnsomhet et sentralt mål for alle parter som var involvert i prosjektet.

LCA-metoden ble brukt for å beregne primærenergibalansen, og den ble aktivt anvendt i den integrerte (interdisiplinære) designprosessen for å sikre beslutningstaking basert på et livsløpsperspektiv<sup>1</sup>. Bundet energi så vel som energibruk knyttet til konstruksjon og transport av materialer regnes som

primærenergi, men kan også omregnes til «average yearly equivalent electricity» ved å bruke primærenergifaktoren gjennom byggets forventede levetid<sup>2</sup>. Tilsvarende årlig bundet elektrisitet for alle materialer brukt i løpet av byggets forventede 60 års levetid (etter totalrehabilitering) er estimert til 61 716 kWh/år (11,91 kWh/m<sup>2</sup>/år). Tilsvarende årlig bundet elektrisitet for konstruksjon og transport av materialer er beregnet til 7 082 kWh/år (1,37 kWh/m<sup>2</sup>/år).

Når det gjelder drift, svarer første års målte energibruk og produksjon godt til budsjettert bruk og produksjon. Første års totale måltall for energibruk knyttet til ventilasjon, rom- og tappevannoppvarming, kjøling og ventilasjons- og sirkulasjonspumper var 122 542 kWh (23,65 kWh/m<sup>2</sup>), mot beregnet førsteårs bruk på 121 947 kWh (23,54 kWh/m<sup>2</sup>). Inkluderer man vanlig elektrisk utstyr, øker energibruken til 181 497 kWh (35,04 kWh/m<sup>2</sup>), mot et beregnet førsteårs bruk på 174 859 kWh (33,76 kWh/m<sup>2</sup>). Videre ble byggene utstyrt med et datasenter. Den totale energibruken fra sentrets dataservere gjennom første driftsår målte 40 836 kWh (7,88 kWh/m<sup>2</sup>).

Dermed utgjorde den totale energibruken første driftsår 222 333 kWh (42,93 kWh/m<sup>2</sup>). Dette utgjør en nedgang på rundt 82,5 % sammenlignet med årlig energibruk før rehabilitering, som typisk lå rundt 1 270 000 kWh (245,00 kWh/m<sup>2</sup>). I løpet av første driftsår produserte det takmonterte PV-anlegget 223 119 kWh, mot en beregnet førsteårsproduksjon på 227 782 kWh.

Powerhouse Kjørbo er det første bygget i Norge som har oppnådd BREEAM-sertifiseringen Outstanding. Brukerundersøkelser basert på første driftsår viser at over 87,5 % av brukerne var fornøyde med det termiske miljøet, og over 95 % av brukerne var fornøyde med opplevd innendørs luftkvalitet<sup>3</sup>. I tillegg har alle parter i Powerhouse-samarbeidet fått oppfylt sine krav til fortjeneste.

Powerhouse Kjørbo er bare i starten av sitt beregnede 60 års livsløp, men prosessen er i rute, og alle prosjektets målsetninger ser ut til å ligge innenfor rekkevidde. Dette indikerer at Powerhouse Kjørbo trolig er den første lønnsomme plussenergibygningen noensinne ferdigstilt i Norge.

-

<sup>1</sup>Henning Fjeldheim, Torhildur Kristiansdóttir og Kari Sørnes (2015), Establishing the Life Cycle Primary Energy Balance for Powerhouse Kjørbo, Paper, Passivhus Norden 2015.

<sup>2</sup>Marit Thyholt, Henning Fjeldheim, Andrea Buijs, Tor Helge Dokka (2015), Primærenergifaktorer for Powerhouse – med revisjon av primærenergifaktoren for Elektrisitet, Rapport, Skanska Teknikk.

<sup>3</sup>Odin Budal Søggen (2015), Indoor Climate in a Zero Energy Building - An Analysis of the thermal Environment and indoor air quality, Master Thesis, NTNU.



## ZERO VILLAGE BERGEN

MISMATCH BETWEEN SOLAR POWER GENERATION AND THE ELECTRIC LOAD IN A ZERO EMISSIONS NEIGHBORHOOD

MISMATCH MELLOM SOLENERGIPRODUKSJON OG ELEKTRISK BELASTNING I ET NULLUTSLIPPS BOLIGOMRÅDE (ZEN - ZERO EMISSIONS NEIGHBORHOOD)

Igor Sartori (SINTEF) and Stanislas Merclet (Multiconsult)

A new housing estate is planned close to Bergen. Its ambitious goal is, considering the total energy demand of the buildings, to reach a Zero Emission Building (ZEB) target for the entire neighborhood. The project, “Zero Village Bergen”, consists of more than 700 dwellings divided between single-family dwellings and apartment buildings. It also includes non-residential areas such as offices, shops, and a kindergarten.

Solar systems (in this case solar cells - PV) have multiple benefits when integrated in buildings, but solar energy is, by definition, a weather dependent energy source. We therefore had to simulate PV production and compare it with the energy needs in

the buildings in order to assess the degree of mismatch. This can be done at different scales: yearly, seasonally, monthly (most common), daily, and hourly. In order to achieve as precise a study as possible, we chose to compare hourly values. We simulated PV generation profiles using state-of-the-art software PV syst and considered the variety of roof orientations and shading effects from a 3D model of the buildings.

Electric load profiles for residential buildings were obtained from a so-called “TUD” (for Time of Use Data) methodology, based on the normalization of data from surveys among real households. We calculated thermal loads using dynamic energy performance

simulations in the software IDA ICE, assuming the buildings to be built according to the Norwegian passive house standard. Both generation and load profiles were, of course, based on the same hourly weather data file in order to guarantee consistency when addressing the mismatch between the two.

The preliminary results show that, at an aggregated level, the PV system covers approximately 90% of the electric demand. Zero Village Bergen has a total electricity need of 3,3 GWh/year, while the PV plant generates in total 2,9 GWh/year. At more detailed levels, due to mismatch between periods of use and periods of production, one must differentiate between self-consumption (the portion of PV

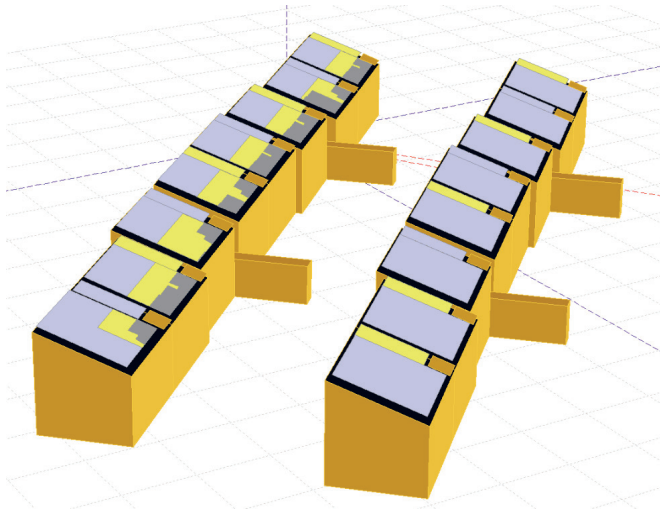


Figure 1: Example of shading effect (21st of December, 10:30 am). Credit: Multiconsult.

production used in the buildings - the rest is supplied to the electricity grid) and self-generation (the portion of the buildings' energy needs covered by PV production - the rest comes from the electricity grid). At a monthly level, self-consumption is 69 % and self-generation 62 %. At an hourly level, it goes down to 36 % and 32 %, respectively.

Although the PV system alone is not enough to achieve the ZEB ambition, the mismatch with the electric load causes large amounts of energy to be exported to the grid. In order to achieve the full ZEB target and improve interaction with the grid, alternative energy system solutions have to be investigated, such as a local thermal energy grid with biomass based cogeneration, additional PV capacity (on carports, for example), or the use of electric vehicle batteries (eventually additional

stationary batteries). Later studies will also consider the case of an all-electric solution, with heat pumps installed in each building.

Et nytt boligområde er under planlegging i nærheten av Bergen. Det ambisiøse målet er å oppnå et Zero Emission Building (ZEB) nullutslippsnivå for hele boligområdet, der byggenes totale energibehov er tatt med i betraktningen. Prosjektet "Zero Village Bergen" består av over 700 boenheter fordelt mellom eneboliger og blokkleiligheter. I tillegg rommer arealet yrkesbygg som kontorer, butikker og en barnehage.

Solenergisystemer (i dette tilfellet solceller - PV) har flere fordeler når de integreres i bygninger, men solenergi er per definisjon en væravhengig energikilde. Vi ble derfor nødt til å simulere PV-produksjonen og sammenligne

denne med byggenes energibehov for å kunne estimere hvor betydelig mismatchen, dvs. misforholdet, mellom produksjon og behov ville være. Dette kan gjøres i henhold til ulike måleskalaer: årlige, månedlige (som er vanligst), daglige eller timesbaserte lastprofiler. For å oppnå god nøyaktighet i undersøkelsen valgte vi å sammenligne verdier fra timesmålinger. Vi simulerte profiler på PV-produksjon ved bruk av programvaren PVsyst, og vurderte ulike takorienteringer og skyggeeffekter ved hjelp av en 3D-modell av byggene.

Lastprofiler for elektrisitetsbehov i boligbyggene ble fremskaffet ved bruk av en såkalt "TUD" (Time of Use Data) metodologi, basert på normalisering av data fra undersøkelser av faktiske husholdninger. Vi kalkulerte varmelastprofiler tilpasset norsk standard for passivhus gjennom dynamisk energiytelse-simuleringer i programvaren IDA ICE. Både energiproduksjon og lastprofiler ble naturlig nok basert på samme timesvise værdatafiler for å sikre stringens i undersøkelsen av mismatch mellom de to.

De innledende resultatene viser at PV-systemet i aggregert tilstand dekker omtrent 90 % av elektrisitetsbehovet. Zero Village Bergen har et totalt elektrisitetsbehov på 3,3 GWh/år, mot PV-kraftverkets totale energiproduksjon på 2,9 GWh/år. På et mer detaljert nivå må en differensiere mellom eget forbruk (andel PV-produksjon som går til dekning av behovet i bygningene – overskudds elektrisiteten blir levert til kraftnettet) og egenproduksjon (andel av bygningenes energibehov som dekkes av PV-produksjonen – underskuddet hentes fra kraftnettet). Ved månedsbaserte målinger

utgjør eget forbruk 69 % og egenproduksjon 62 %. Ved timesbaserte mål avtar verdiene til respektivt 36 % og 32 %.

Selv om PV-systemet alene ikke er tilstrekkelig for å oppfylle ZEB-nullutslippsmålet, forårsaker mismatchen i den elektriske lasten at store mengder energi eksporteres til nettet. For å kunne innfri den fulle ZEB-målsetningen og forbedre interaksjonen med kraftnettet, må alternative energisystemløsninger utforskes, slik som et lokalt varmenett med biomassebasert produksjon, ekstra PV-kapasitet (for eksempel på carport) og bruk av elbilbatterier (etter hvert stasjonære ekstrabatterier). Fremtidige studier vil også vurdere mulighetene for en helelektrisk løsning med varmepumper installert på carport i hvert enkelt bygg.

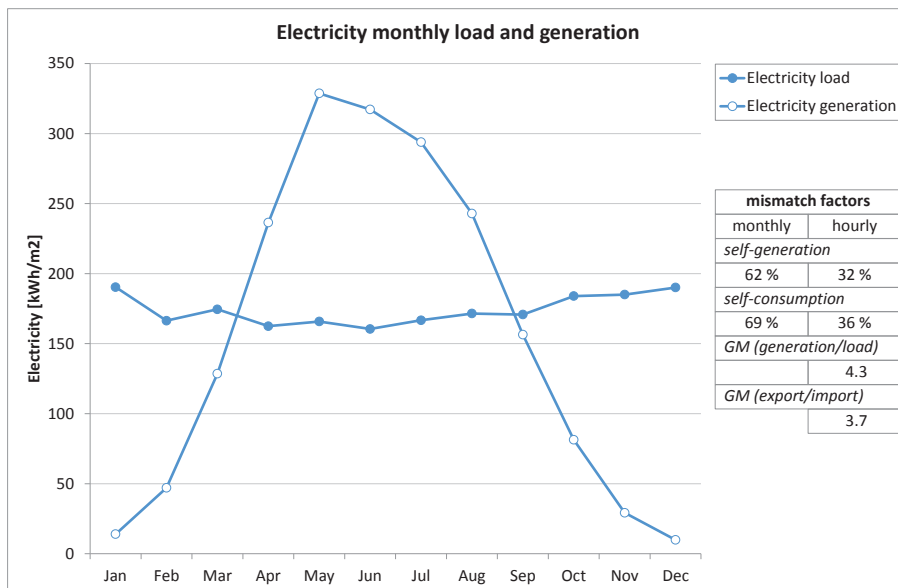


Figure 2: Monthly load and generation of electricity. Credit: SINTEF Building and Infrastructure.

The development of the Zero Village Bergen project is done in cooperation between Bybo (developer), Snøhetta (architect), ZEB (energy and GHG analyses) and Multiconsult (PV analysis).



## ØVRE ROTVOLL: A NET ZERO ENERGY NEIGHBOURHOOD IN TRONDHEIM ØVRE ROTVOLL: ET NULL-ENERGI BOLIGOMRÅDE I TRONDHEIM

Gabrielle Lobaccaro (NTNU)

The integration of solar systems on a building or district scale, producing energy covering the demand of the buildings, is becoming a priority in the urban planning process. However, despite solar radiation being sufficient, especially in southern and central parts of Norway (annual horizontal insolation around 900 kWh/m<sup>2</sup> in Grimstad), the electricity production from solar energy is still not significant. The difficulties are mostly related to unpredictability and unreliability. Therefore, new approaches for better integration of solar systems into the building envelope and preliminary evaluation of the energy use should increasingly be taken into consideration in the early design phases during urban planning processes.

The continuous development of the city of Trondheim due to the increase in population has generated a further need for residential buildings. The Norwegian Statistics Centre (SSB) has estimated that from 2000 to 2030, there will be an increase of 70 000 inhabitants.

In this framework, the area of Øvre Rotvoll, connecting downtown Trondheim with the residential neighbourhoods of Charlottenlund and Ranheim, has the ambition to become a development area designed according to the targets of the Net-Zero Energy Neighbourhood. This case study is framed within the Subtask C “*Case studies and action research*” of Task 51 “*Solar Energy in Urban Planning*” initiated by IEA’s Solar Heating and Cooling Programme. The scope of the case study was twofold: on the one hand, the aim was to develop a solar potential analysis of the district in order to maximize both passive and active design strategies, and, on the other hand, to achieve the energy target of the Net Zero Energy Neighbourhood.

In the solar potential analysis, solar dynamic simulations, using a RADIANCE based software, *DIVA for Rhino*, has been conducted. The results demonstrated how the optimization of the buildings’ orientation, their relative distances regulated by the aspect ratio

between the height (h) of the buildings and width (w) of the street, and the use of finishing materials on the façades and on the ground could consistently affect the solar accessibility of the buildings.

Based on the outcomes of a parametric study, in which different aspect ratios (h/w=0.5, 1, 1.5 and 2), colours, and finishing materials for the ground and façades, the entire masterplan for the Øvre Rotvoll district has been developed. The analyses conducted allowed minimizing as much as possible the overshadowing effect created by the nearby buildings. A combination between parametric modelling tools and solar dynamic simulation software has been used to optimize the building shapes in one part of the district (Figure 1). The analyses demonstrated that the optimized configuration of the buildings’ volumes could increase their solar accessibility approximately from 35% to 50% (Table 1).





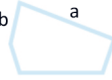

Concept	South-North		30° South-West		East-West	
	Optimized	Initial	Optimized 02	Initial	Optimized	Initial
Shape						
Compactness (S/V)	0,75	0,72	0,75	0,72	0,78	0,72
Volume (m <sup>3</sup> )	554	560	558	560	495	560
Surface roof a (m <sup>2</sup> )	95	43	84	43	91	43
Surface roof b (m <sup>2</sup> )	30	43	35	43	35	43
Irradiation per sq.m on roof a (kWh/m <sup>2</sup> yr)	828	640	884	675	843	866
Irradiation per sq.m on roof b (kWh/m <sup>2</sup> yr)	1132	1059	1095	1047	703	849
<b>% of increment of solar potential (Optimized vs Initial unit)</b>	<b>+ 54%</b>		<b>+ 52%</b>		<b>+ 37%</b>	
<b>Total irradiation (a+b)/Compactness [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>150160</b>	<b>101468</b>	<b>150108</b>	<b>102842</b>	<b>129895</b>	<b>102424</b>

Table 1. Comparison of the properties and values for optimized and initial volumes (shown as vertical sections) for each orientation.

The annual energy production, by using an appropriate PV technology, could reach 146 kWh/m<sup>2</sup>, while the operational energy use could reach 75kWh/m<sup>2</sup> for the whole building complex. This amount of energy makes it possible to cover approximately twice the operational energy demand of the entire neighbourhood.

To determine the ZEB level of the project, a comparison between the CO<sub>2</sub> emissions from materials and operational energy use and the energy produced, was carried out. For the conversion of energy use and production from kWh to kgCO<sub>2</sub>eq, the ZEB factor, 0.132 kgCO<sub>2</sub>eq, was used. The total CO<sub>2</sub> emissions from the materials and operational energy were calculated to be 19.23 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>BRA/year, and energy production was calculated to compensate for 19.36 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>BRA/year (Figure 1). Therefore, the ZEB-OM level was achieved.

The main purpose of the work was to define how energy efficiency and on-site renewable energy production can be implemented in the design of a housing development, as well as to what extent these strategies can impact the energy and CO<sub>2</sub> balance. The site is developed based on the concept of an eco-city as a sustainable urban form, thus emphasizing the reduction of the ecological footprint.

In conclusion, the integration of overall energy strategies can effectively reduce the ecological footprint of a housing development. Nevertheless, to be able to recommend the implementation of those strategies, further research and follow-up should be done to acquire more quantitative data.

Bruk av solenergisystemer som produserer energi som dekker bygningenes behov for energi, blir stadig viktigere, både på bygningsnivå og på områdenivå. Men, til tross for at det er tilstrekkelig solstråling, i hvert fall i de sørlige og midtre deler av landet (årlig innstråling i Grimstad er f.eks. ca. 900 kWh/m<sup>2</sup>), er bruk av solenergi ennå ikke spesielt utbredt i Norge. Det er derfor viktig å vurdere både energibehov og mulighetene for integrering av solenergisystemer i tak og fasader tidlig i en planprosess.

Den stadig voksende befolkningen i Trondheim har resultert i et økende behov for boliger. Statistisk Sentralbyrå (SSB) har antatt at fra 2000 til 2030 vil byen vokse med 70 000 innbyggere. I lys av dette har området Øvre Rotvoll, som forbinder Trondheim sentrum med Charlottenlund og Ranheim, et mål om å utvikles som et null-energi boligområde. Studien beskrevet under er del av delprosjekt C, "Case studies and action research", i Task

51, “Solar Energy in Urban Planning”, i det internasjonale energibyråets solenergiprogram (IEA SHC).

Målet har både vært å analysere områdets potensiale for bruk av solenergi med tanke på maksimal utnyttelse av både passive og aktive tiltak og å nå målet om en null-energistandard for hele området.

Dynamiske simuleringer, med *DIVA for Rhino* (programvare basert på *RADIANCE*), er benyttet til å analysere solenergi-potensialet. Resultatene viste hvordan en optimalisering av bygningenes orientering, deres innbyrdes avstand basert på forholdet mellom bygningshøyde (h) og gatebredde (w), og overflatebehandling på både fasader og marken rundt kan ha betydning for tilgangen på sol i bygningene.

En plan for hele området Øvre Rotvoll er utviklet på grunnlag av resultatene av en parameterstudie, hvor høyde-bredde forhold ( $h/w=0.5, 1, 1.5$  and  $2$ ), farger og overflatebehandling er variert. Analysene gjorde det mulig å minimalisere effekten av skygger fra tiliggende bygninger. Bygningsvolumene i en del av området er så optimalisert ved hjelp av en kombinasjon av parameterstudier og dynamiske simuleringer av solenergi-potensialet (Figur 1). Analysene viste at for de optimaliserte bygningsvolumene ville tilgangen på sol øke fra 35% til 50% (Tabell 1).

Årlig energiproduksjon, ved bruk av riktig solcelleteknologi, kan bli opp mot 146 kWh/m<sup>2</sup>, mens energibruk til drift for hele bygningsmassen er beregnet til å være 75 kWh/m<sup>2</sup>. Dette betyr at produksjonen fra

solcellene ville være det dobbelte av behovet til drift av området.

CO<sub>2</sub> utslipp fra produksjon av materialer og fra energibruk til drift er deretter analysert for å vurdere hvilket ZEB nivå området ligger på. For omregning fra energibruk og -produksjon (kWh) til utslipp (kgCO<sub>2</sub>eq) ble ZEB-faktoren, 0.132 kgCO<sub>2</sub>eq, brukt. Totalt CO<sub>2</sub> utslipp fra produksjon av materialer og fra energibruk til drift ble beregnet til 19.23 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>BRA/år, og energiproduksjonen ble beregnet til å kompensere for 19.36 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>BRA/år (Figur1). Dette tilsvarer ZEB-OM nivået.

Hovedmålet med prosjektet har vært å finne ut hvordan strategier for energieffektivisering og lokal energiproduksjon kan inkluderes i prosjekteringen av et boligområde samt å se hvilken effekt slike strategier kan ha

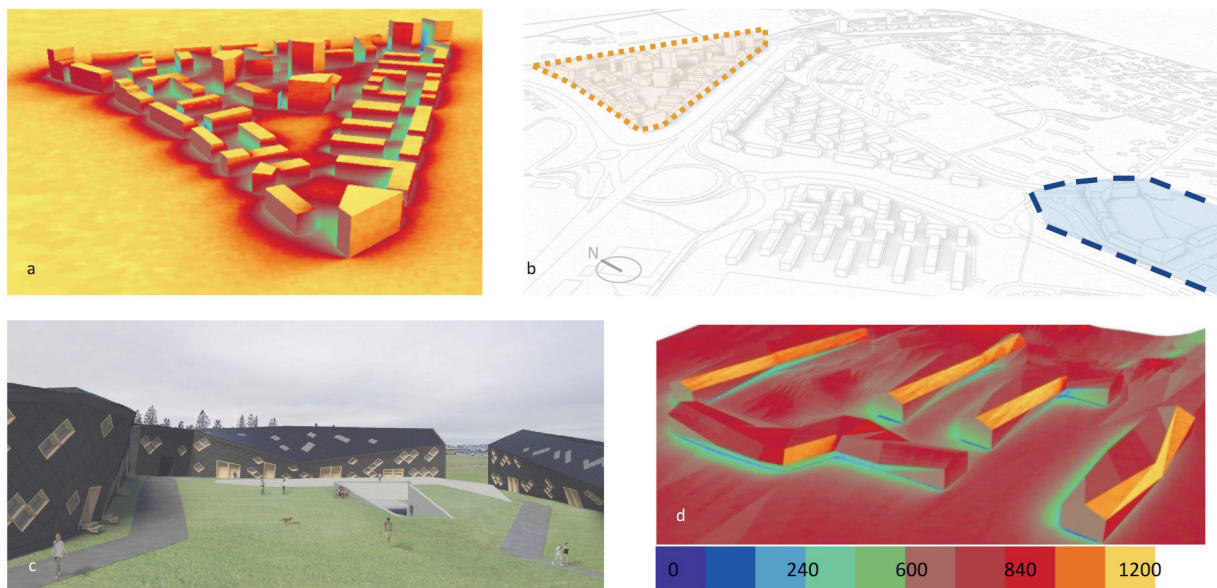


Figure 1. From the top right corner: a. Solar mapping analyses of the Northern area of Øvre Rotvoll (underlined in orange hatch and orange dashed line in b); rendering (c) and Solar mapping analyses (d) of the Southern area of Øvre Rotvoll (underlined in blue hatch and blue dashed line in b).



på energibruk og CO<sub>2</sub> balanse. Området er utviklet ut i fra konseptet «eco-city» og er således tenkt å ha et redusert økologisk fotavtrykk. Konklusjonen er at helhetlige energistrategier kan redusere det økologiske fotavtrykket for et boligområde. Det er likevel behov for mer forskning og flere kvantitative resultater før vi kan komme med konkrete anbefalinger.

Reference:

Lobaccaro, G.; Chatzichristos, S.; Acosta Leon, V.; *Solar optimization of housing development*, Proceeding of SHC 2015, International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, Istanbul, Turkey, December 2015.

Chatzichristos, S.; Acosta Leon, V., *Sustainable housing development in Øvre Rotvoll integration of on-site renewable energy production and energy efficiency behavioural strategies*, Master thesis at NTNU 2015.

Croce S., *Solar potential optimization of the Øvre Rotvoll neighborhood in Trondheim – Norway*, Master thesis – ERASMUS+ programme, 2015

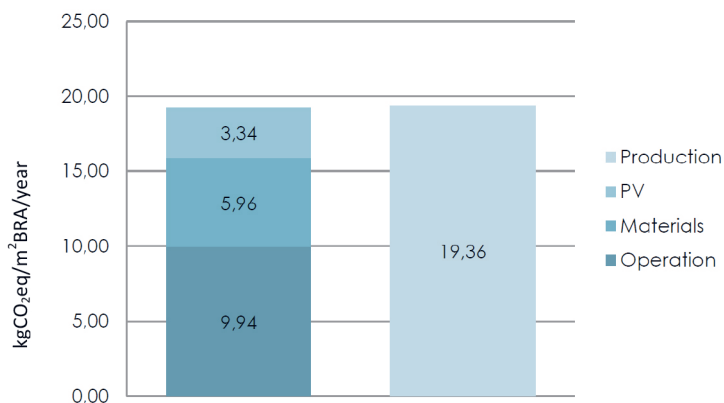


Figure 2. CO<sub>2</sub> Balance in kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>BRA/year of the buildings in the south area of the district (blue area with border in blue dashed line in Figure 1)



## VISITING RESEARCHER AT THE FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS (ISE)

### FORSKEROPPHOLD VED FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS (ISE)

Karen Byskov Lindberg (NTNU)

The Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE) is responsible for the making sure that the energy system continues to develop in the most rational manner, one which both safeguards the environment and utilizes available resources in the best possible way. Having worked for six years with energy analysis at NVE, I wanted to dig deeper into the subject matter. I therefore got in touch with ZEB and CenSES research centres to establish whether they were interested in looking at the effects of the wider introduction of zero emission buildings on the energy system. The solution was a part-time doctoral project, taking place at both NVE and in the Department of Electrical Power Engineering at NTNU.

The doctoral work is threefold. The first part aims to establish representative load profiles for different building types by analysing hourly

measurements from over 100 buildings. It is important to use measurement data when analysing the effect on the energy system. This because the dimensioning of the energy grid should be based on real data. The second part of the thesis looks at how local production in the building, often solar power from building integrated PV modules, can be utilized internally in the building or for the benefit of the energy grid by means of smart grids and smart end-user flexibility (demand side management). The third and final part of the work analyses a scenario with extensive deployment of ZEBs in Norway and Scandinavia by 2050 using the TIMES energy model and the power market model EMPS.

Because of my interest in the interaction between buildings, local PV production and smart grids (Part II of the doctoral project), I spent 13 months as a visiting researcher in

the Smart Grids Department at the Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (FhG-ISE) in Freiburg. In Germany, PV technologies and the concept of zero energy buildings is well known, and PV on buildings and smart grid technologies have been a focus of research for longer than in most other countries. It was therefore very inspiring to gain insight and take part in research work at the Department of Smart Grids at the FhG-ISE. Their work covers a wide range of technologies and solutions for smart homes and smart communication solutions.

Fraunhofer ISE was founded in 1981 and is now known as one of the world's best research institutions for solar energy. Initially, the main focus was solar thermal energy (ST), but solar power from PV was soon included, and eventually also multi-junction Concentrated PV (CPV). This system has the

world record of 46% for efficiency. FhG- ISE currently has approximately 1300 employees and covers a wide range of technology developments for both PV and ST modules, storage technologies, energy-efficient buildings, and smart energy management of the interaction between PV production, energy use in buildings, energy storage, and the charging of electric vehicles.

Working together with this team challenged my own views and ideas, and I gained valuable knowledge that resulted in a very productive year with several publications. The cooperation continued after I came back to Norway, and it is planned to continue after the doctoral work is completed. Collaboration projects included are:

- Load profiles for buildings: how to predict load profiles both by regression analysis and stochastic load profiles for household appliances connected with consumer behaviour [1] [2] [3]
- Smart Homes: minimization of costs for the operation of buildings with PV and heat pumps [4]

- Design of the energy system in ZEBs: selection and dimensioning of energy technologies [5] [6] [7] [8]

My whole family joined me in Freiburg, and being abroad with a family of five gave us a new perspective on life here in Norway as well as experiences and friendships that will last a lifetime.

Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) har ansvar for at energisystemet skal utvikle seg mest mulig rasjonelt og hvor både miljø ivaretas og tilgjengelige ressurser blir utnyttet på best mulig måte. Etter å ha jobbet i seks år med energisystemanalyse i NVE ønsket jeg å fordype meg mer i fagstoffet og tok kontakt med de to forskningssentrene ZEB og CenSES for høre om de var interessert i å se på virkningene på energisystemet av en stor utbredelse av nullutslippsbygg (ZEBs). Løsningen ble en deltids doktorgrad med tilhørighet både hos NVE og hos Institutt for Elkraftteknikk ved NTNU.

Doktorgradsarbeidet er tredelt, hvor første del går ut på å etablere representative lastprofiler for ulike bygningstyper ved å analysere timesmålinger fra over 100 bygg.

Det er viktig å benytte konkrete måledata, da det er den virkelige lasten kraftnettet må dimensjoneres for. Andre del av oppgaven ser på hvordan lokal produksjon i bygget, ofte solkraft fra bygningsintegreerte PV moduler, kan utnyttes internt i bygget eller til det beste for kraftnettet ved hjelp av smarte nett (smart grids) og smart sluttbrukerfleksibilitet (demand side management). Den tredje og siste delen av arbeidet analyserer et scenario med stor utbredelse av ZEBs i Norge og Skandinavia mot 2050 ved hjelp av energisystemmodellen TIMES og kraftmarkedsmodellen Samkjøringsmodellen.

I arbeidet med å analysere samspillet mellom bygninger, lokal PV produksjon og smarte nett (dvs. del II) var jeg gjesteforsker ved Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (FhG-ISE) på deres avdeling for Smart Grids i 13 måneder. I Tyskland er PV teknologi og konseptet for nullenergibygg (ZEBs) vel kjent, og PV på bygg og smart grid-teknologier har vært et fokusområde for forskning i lengre tid i Tyskland enn i de fleste andre land. Det var derfor veldig inspirerende å få innsikt i og ta del i forskningsarbeidet ved avdelingen for Smart grids ved Fraunhofer ISE. De dekker et vidt spekter av teknologier



og løsninger for smart homes og smarte kommunikasjonsløsninger.

Fraunhofer ISE ble grunnlagt i 1981 og er i dag kjent som en av verdens beste forskningsinstitusjoner for solenergi. I starten var hovedfokuset soltermisk energi (ST), men solkraft fra PV kom raskt på banen, og etter hvert også multi-junction concentrated PV (CPV). Denne teknologien har verdensrekorden for virkningsgrad - på 46 %. I dag har ISE ca 1300 ansatte og dekker et vidt spekter av teknologiutvikling for både PV og ST moduler, lagringsteknologier, energieffektive bygninger og smart energistyring av samspillet mellom PV produksjon, energibruk i bygg, energilager og lading av el-biler.

Å jobbe sammen med dette teamet utfordret mine egne synspunkter og ideer, og jeg fikk verdifull kunnskap som resulterte i et svært produktivt år med flere publikasjoner. Samarbeidet har fortsatt etter at jeg kom tilbake til Norge og vil forhåpentligvis fortsette også etter at doktorgradsarbeidet er avsluttet. Av konkrete samarbeidsprosjekt kan nevnes:

- Lastprofiler for bygninger: hvordan predikere lastprofiler både ved regresjonsanalyse og med stokastiske lastprofiler for husholdningsapparater koblet med forbrukeradferd [1][2][3]
- Smart Homes: minimering av kostnader for drift av bygg med PV og varmepumper [4]
- Design av energisystemet i ZEBs: valg og dimensjonering av energiteknologier [5][6][7][8]

Å være et år i utlandet med en familie på fem personer gav oss alle et nytt perspektiv på livet, også her i Norge, og har gitt oss erfaringer og vennskap som vil vare livet ut.

Publication list:

[1] D. Fischer, J. Scherer, A. Haertl, K. B. Lindberg, M. Elci, and B. Wille-Haussmann, "Stochastic Modelling and Simulation of Energy Flows for Residential Areas," in *VDE conference*, 2014.

[2] K. B. Lindberg, J. M. Chacon, G. L. Doorman, and D. Fischer, "Hourly Electricity Load Modeling of non-residential Passive Buildings in a Nordic Climate," in *IEEE Eindhoven PowerTech Conference, Holland, 29 June - 2 July*, 2015.

[3] D. Fischer, A. Flunk, N. Kreifels, B. Wille-haussmann, K. B. Lindberg, B. Stephen, and E. H. Owens, "Modelling the Effects of Variable Tariffs on Domestic Electric Load Profiles by Use of Occupant Behaviour Submodels," *IEEE Trans. Smart Grid*, under review, 2015.

[4] D. Fischer, T. R. Toral, K. B. Lindberg, and H. Madani, "Investigation of Thermal Storage Operation Strategies with Heat Pumps in German Multi Family Houses," *Energy Procedia*, vol. 58, pp. 137–144, 2014.

[5] K. B. Lindberg, A. Ånestad, G. L. Doorman, D. Fischer, C. Wittwer, and I. Sartori, "Optimal investments in Zero Carbon Buildings," in *1st Conference on Zero Carbon Buildings in Birmingham*, UK, Sept., 2014.

[6] K. B. Lindberg, G. Doorman, D. Fischer, I. Sartori, M. Korpås, and A. Ånestad, "Methodology for optimal energy system design for Zero Energy Buildings using mixed-integer linear programming," *Energy Build.*, under review, 2015.

[7] D. Fischer, K. B. Lindberg, and H. Madani, "Impact of PV and variable prices on optimal system sizing for heat pumps and thermal storage," *Energy Build.*, submitted Dec 2015.

[8] K. B. Lindberg, D. Fischer, G. Doorman, M. Korpås, and I. Sartori, "Cost-optimal energy system design in Zero Energy Buildings with resulting grid impact: A case study of a German multi-family house," *Energy Build.*, submitted Jan 2016.

All photos: Karen Byskov Lindberg





# THERMAL INSULATION PERFORMANCE OF REFLECTIVE MATERIAL LAYERS IN WALL AND FLOOR CONSTRUCTIONS

## VARMEISOLERENDE EFFEKT AV REFLEKTERENDE BELEGG I VEGG- OG GULVKONSTRUKSJONER

Silje Kathrin Asphaug and Sivert Uvsløkk (SINTEF)

Heat transfer through cavities can be reduced by good air tightness, by filling the cavity with thermal insulation material or by reflective layers to reduce heat transfer by radiation. Air leakages can be reduced and even eliminated by air tight material layers like vapour- and wind barriers.

The traditional solution, to fill some type of thermal insulation in the entire cavity, will reduce or eliminate both radiation and convection. Still air has higher thermal resistance than mineral wool. For air filled cavities the thermal properties can be improved by reflective surfaces to reduce radiation. Convection is kept low by reducing the thickness of the cavity. Conduction cannot be reduced in air filled cavities since the thermal conductivity of air sets a lower limit for heat transfer:

$$F_{\min} = \lambda_{\text{air}} \cdot DT / d \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$\lambda_{\text{air}}$  thermal conductivity of air, 0.025 W/(mK)  
 $DT$  temperature difference across the cavity, K  
 $d$  thickness of the cavity, m

ZEB focuses on reducing the carbon footprint from construction materials. The idea behind utilizing air cavities in building envelope components is to reduce the amount of thermal insulation materials while keeping the thermal resistance of the envelope.

By using reflective foils in floors cavities (such as crawl space), one can achieve a significant reduction of heat loss. The air in the cavity will be relatively stable as long as the temperature in the cavity is higher than the temperature in the ground under the building. This is because the heat transfer by convection becomes small. The heat transfer by conduction in the

stagnant air will also be small, because the thermal conductivity of the air is low, about 0.025 W/(mK). Heat transfer will be dominated by radiation from the underside of the floor structure to the ground, but the radiation can be reduced using one or more reflective foils mounted horizontally in the cavity, parallel to the floor area.

The maximum theoretical heat resistance that can be obtained in crawl space are about 3.5 m<sup>2</sup>K/W and about 4.1 m<sup>2</sup>K/W, respectively. This corresponds to a continuous layer of normal insulation (thermal conductivity 0.035 W/(mK)) with a thickness of around 120 mm and around 140 mm. In theory, this will reduce the heat loss through the floor with about 20%.

In addition to the reduction in heat loss, the temperature on the underside of the floor joists is raised a few degrees during



Reflective wind barrier mounted in a crawl space at The ZEB Pilot House Larvik

wintertime. An increase in temperature will decrease the relative humidity, RH under the floor joists compared to the RH in the outdoor air. The joists will become drier and less susceptible to fungal growth compared to an uninsulated crawl space with good ventilation.

Reflective layers can also be used to improve the thermal properties in roofs, floors, and walls. Reflective foils have the largest insulation potential in floors where the heat flow direction is downwards which gives thermal stable air layers and minimum convection. A closed air cavity bonded by a reflecting face,  $e = 0.05$ , may have a thermal resistance equivalent to ca 20 mm normal mineral wool insulation in roofs and ca 30 mm normal mineral wool insulation in walls. In floors a closed air cavity bonded by a reflecting face,  $e = 0.05$ , may have a thermal resistance equivalent to several cm of normal mineral wool insulation.

Varmeoverføring via hulrom kan reduseres ved god lufttetthet, ved å fylle hulrommet med varmeisolasjonsmateriale, eller ved å bruke reflekterende belegg for å redusere varmeoverføring i form av stråling. Luftlekkasjer kan reduseres, og til og med elimineres, ved bruk av lufttette materialer som damp- og vindsperrer.

Den tradisjonelle løsningen, å fylle hulrommet med en type varmeisolerende materiale, vil redusere eller helt fjerne både stråling og konveksjon. Stillestående luft har høyere varmemotstand enn mineralull. Varmeegenskapene i luftfylte hulrom kan forbedres ved bruk av reflekterende belegg som reduserer stråling. Konveksjonen holdes lav ved å redusere hulrommets tykkelse. Ledningsevnen kan ikke reduseres i luftfylte hulrom, siden luftens varmeledningsevne setter en nedre grense for varmeoverføring:

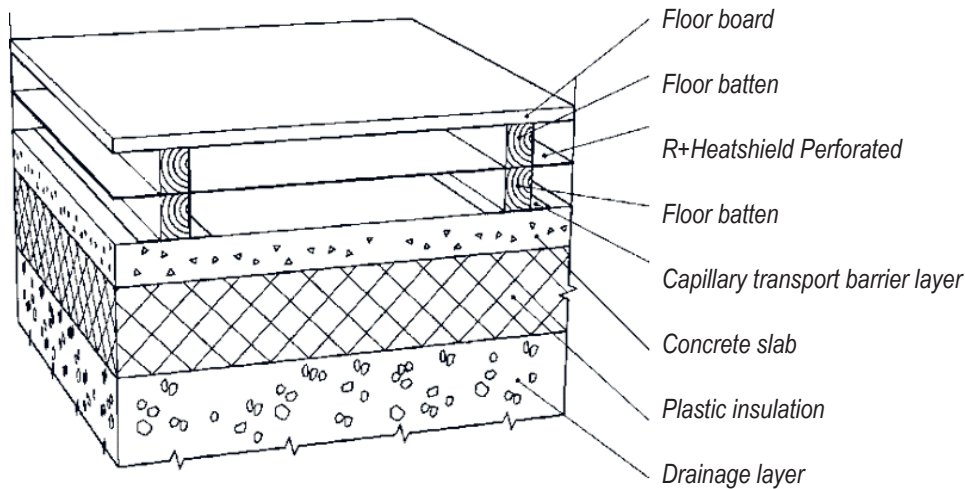
$$F_{\min} = \lambda_{\text{air}} \cdot DT / d \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$\lambda_{\text{air}}$  varmeledningsevnen til luft, 0,025 W/(mK)  
 $DT$  temperaturforskjell på tvers av hulrommet, K  
 $d$  hulrommets tykkelse, m

ZEB fokuserer på å redusere karbonavtrykket fra konstruksjonsmaterialer. Ideen med å benytte luftfylte hulrom i en bygnings omhyllingsflater er å redusere forbruket av varmeisolasjonsmaterialer, men samtidig opprettholde komponentenes varmemotstand.

Ved å bruke reflekterende folier i hulrom i gulvet (som f.eks. i kryperom), kan man oppnå en betydelig reduksjon av varmetap. Luften i hulrommet vil holde seg relativt stabil så lenge temperaturen i hulrommet er høyere enn temperaturen i bakken under bygget. Dette fordi varmeoverføringen i form av konveksjon er lav. Varmeledningen i den stillestående luften vil også være lav, fordi luft har lav varmeledningsevne, rundt 0.025 W/(mK). Den dominerende kilden til varmeoverføring vil være stråling fra undersiden av gulvkonstruksjonen, men strålingen kan reduseres ved å bruke en eller flere reflekterende folier plassert horisontalt i hulrommet, parallelt med gulvflaten.

Den maksimale teoretiske varmemotstanden som kan oppnås i kryperom ligger på 3,5 m<sup>2</sup>K/W og 4,1 m<sup>2</sup>K/W. Dette tilsvarer et sammenhengende lag med vanlig isolasjon (varmeledning 0,035 W/(mK)) med en tykkelse på henholdsvis rundt 120 mm og 140 mm. I teorien vil dette redusere varmetapet gjennom gulvet med omkring 20 %.



Reflective moisture barrier mounted in Living lab/testcell, figure from Air guard TG

I tillegg til redusert varmetap, vil temperaturen på undersiden av gulvbjelkene stige noen grader på vinterstid. En temperaturøkning vil senke den relative fuktigheten, RF, under gulvbjelkene sammenlignet med RF i utendørsluften. Bjelkene vil bli tørrere og mindre utsatt for soppvekst sammenlignet med et uisolert, godt ventilert kryperom.

Reflekterende lag kan også brukes til å forbedre varmeegenskapene i tak, gulv og vegger. Reflekterende folier har størst isolasjonspotensial i gulv med nedadgående varmestrøm, noe som gir varmestabile luftlag og minimal konveksjon. Et lukket hulrom kledd med en reflekterende overflate,  $e = 0,05$ , kan gi varmemotstand som tilsvarer ca. 20 mm

vanlig mineralullisolasjon i tak, ca. 30 mm vanlig mineralullisolasjon i vegger, og flere desimeter vanlig mineralullisolasjon i gulv.

ZEB partners have contributed with work, competence, and materials for this activity: Isola and DuPont have supplied reflective materials and assisted in developing the experiments. Brødrene Dahl have made installation of reflective foils possible in the The ZEB Pilot House Larvik.



## AEROGEL AND ARGON INSULATION IN WINDOWS AEROGEL OG ARGONISOLASJON I VINDUER

Nicola Lolli (NTNU/SINTEF)

To overcome the low thermal resistance of transparent surfaces, different types of multi-glazed windows have been developed, of which a wide variety are available on the market today. Triple-low-energy-glass windows with low-emissivity coatings and argon gas filling, for instance, represent an effective energy-saving solution. However, these technologies have the drawback that they drastically reduce the amount of solar radiation that passes through the glass due to the use of several coated layers. This condition can be disadvantageous at northern latitudes (such as in Scandinavian countries) where solar radiation in winter is low in terms of both hourly availability and quantity. Glazing with an aerogel filling has been proposed as a technology capable of providing daylight, with the benefit of an insulation value higher than that of classic triple and quadruple glazing solutions. The results presented here compare and assess the greenhouse gas (GHG) emissions of three different glazing

technologies applied as part of the energy retrofitting of a housing complex located near Oslo, Norway. The triple-glazing units with argon were partially substituted with double-glazing units with either monolithic aerogel or granular aerogel. Building energy use and GHG emissions were calculated and compared for the cases with different windows technologies.

Aerogels are extremely innovative materials that, among several applications in a variety of different fields, show very interesting insulation properties in both opaque and transparent building components. Aerogels have the special characteristic of being highly porous materials. The porous structure, constituting the skeleton of the aerogel, is called gel. The gel is a three-dimensional sponge-like network of particles made by condensing particles that are dispersed in a liquid solution, called sol. To obtain the final product from this sol-gel compound, the liquid part is substituted with

air through various processes and the final product can take the form of powder (granular aerogel) or be a monolith (monolithic aerogel). Almost all metal or semimetal oxides, such as silica ( $\text{SiO}_2$ ), aluminium oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), titanium oxide ( $\text{TiO}_2$ ), and zirconium oxide ( $\text{ZrO}_2$ ) can contribute to a gel formation. Among these, the  $\text{SiO}_2$ -gel is the one that has found the widest application.  $\text{SiO}_2$  aerogels, like the other metal oxides-based aerogels, also have interesting optical properties. Since the pores forming the gel networks are smaller than the visible light wavelength (380-740 nm), aerogels can be partially transparent. For this reason, aerogels represent the most promising solution for achieving very low insulation values in transparent and translucent surfaces without compromising the daylighting conditions.

A multi-glazed window with low-energy coating and gas filling has an insulation value of 0,5  $\text{W/m}^2\text{K}$ -1 and a g-value of 0,50. On the other



hand, a double-glazing with aerogel filling with a similar U-value has a g-value of 0,75, which means a window with the same thermal insulation property and higher transparency. This is very favourable, as a high g-value allows for high solar radiation, which in winter is beneficial for reducing the energy required for space heating.

However, it must be noted that depending on the form of the final product (powder or monolith), the optical properties of aerogel varies. While monolithic aerogel shows a visible transmittance which is comparable to glass, granular aerogel shows much lower values of visible transmittance, as the material is translucent. In such a perspective, the use of granular aerogel in residential buildings may have a limited application due to its translucent appearance.

The energy simulations showed that the substitution of triple-glazing with argon gas with aerogel glazing (either monolithic or granular) saves up to 20% of the delivered

energy for space heating. This is due, as explained above, to the high solar radiation through aerogel windows.

The calculation of the lifecycle of greenhouse gas emissions showed that the building lifecycle emissions decrease by 9% when the aerogel windows substitute triple-glazed windows. In figure 3, the comparison between the use of either aerogel windows or triple-glazed windows represents the most significant results (space heating, total building energy use, and building lifecycle emissions). The values are obtained by dividing each result given by the use of aerogel windows by the same result given by the use of triple-glazed windows. In the first column the different windows types (granular aerogel, monolithic aerogel, and triple-glazing) and the different glazing ratios (amount of glazed area/total facade area) are shown. It is possible to conclude, from the results of this study, that the use of aerogel windows is beneficial for the reduction of the building energy need for indoor space heating and the

lifecycle emissions for a residential building located in Norway.

For å få bukt med den lave termiske motstanden i transparente overflater er det utviklet vindustyper med flere lag glass, hvorav et bredt utvalg er tilgjengelig i dagens marked. Trelags vinduer med lavenergibelegg og argongassfylling er eksempel på en effektiv energispareløsning. Disse teknologiene har imidlertid den ulempen at de, som følge av de mange lagene med belegg, drastisk reduserer andelen solstråling som trenger gjennom glasset. Dette kan være ugunstig på nordlige breddegrader (som i de skandinaviske landene) der solstrålingen i vinterhalvåret er liten både med tanke på tilgjengelighet og lyskvalitet. Glass med aerogel er fremmet som en teknologi med evne til både å slippe inn mer dagslys og med en bedre isolasjonsverdi enn tradisjonelle vinduer med tre- og firelags glass. Resultatene presenterer her sammenligner og vurderer utslippene av drivhusgasser (GHG) fra tre ulike teknologier benyttet ved renovering av et boligkompleks

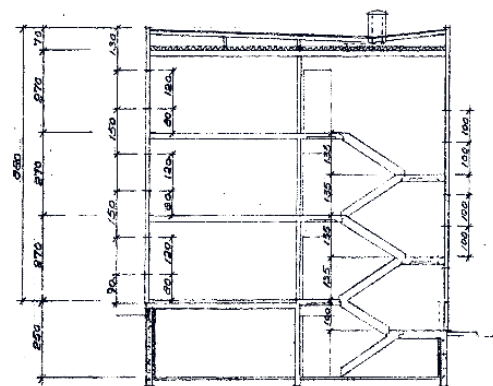


Figure 1. Top left and centre: the West and East façades of the test building, the Myhrerenga Borettslag before renovation. Top right: the original drawing of the cross section of one the apartment buildings. From Lolli, N., *Life cycle analyses of CO2 emissions of alternative retrofitting measures*, Ph.D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2014.

nær Oslo, Norge. Trelagsvinduer med argon ble delvis byttet ut med to-lags glass med enten monolittisk aerogel eller granulær aerogel. Energibruk i og klimagassutslipp fra bygg ble beregnet og sammenlignet for tilfellene med forskjellige vindus-teknologier.

Aerogeler er innovative materialer som, blant mange bruksmuligheter innen flere ulike felt, viser svært interessante isolasjonsegenskaper i både opake og transparente bygningskomponenter. Det spesielle ved aerogel er at det er et meget porøst materiale. Den porøse strukturen som utgjør aerogelens skjelett kalles gel. Denne gelen er en tredimensjonal, svampaktig gitterstruktur av partikler dannet gjennom kondensering av partikler oppløst i en flytende løsning kalt sol. For å fremstille sluttproduktet fra denne sol-gel forbindelsen, erstattes væskedelen med luft gjennom diverse prosesser. Sluttproduktet kan opptre i monolittisk form (monolittisk aerogel) eller i pulverform (granulert aerogel). Nesten alle metall- eller halvmetalloksider, som silika ( $\text{SiO}_2$ ), aluminiumoksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), titanoksid ( $\text{TiO}_2$ ) og zirkoniumoksid ( $\text{ZrO}_2$ ), kan benyttes til å lage gel. Blant disse er det  $\text{SiO}_2$ -gelen som har det bredeste anvendelsesområdet.

$\text{SiO}_2$  aerogeler har, i likhet med andre metalloksidbaserte aerogeler, interessante optiske egenskaper. Siden porene som danner gelgitter-strukturen er mindre enn bølgelengden for synlig lys (380-740 nm), kan aerogelene være delvis transparente. På grunn av dette representerer aerogelene den mest lovende løsningen for å oppnå veldig lave isolasjonsverdier i transparente og opake overflater uten at det går på bekostning av dagslysforholdene.

Et vindu med flere lag glass og med lavenergibelegg og gassfylling kan ha en isolasjonsverdi på  $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ -1 og en g-verdi på 0,50. Et vindu med to-lags glass og aerogel-fylling med tilsvarende U-verdi har derimot en g-verdi på 0,75, og er altså et vindu med de samme termiske isolasjonsegenskapene men med høyere lystransmittans. Dette er veldig gunstig, ettersom en høy G-verdi slipper inn mer solstråling og dermed reduserer behovet for romoppvarming om vinteren.

Imidlertid vil de optiske egenskapene til aerogel variere avhengig av formen på sluttproduktet (granulat eller monolitt).

Selv om monolittisk aerogel viser en lystransmittans som kan sammenlignes med glass, viser granulær aerogel mye lavere verdier av lystransmittans ettersom materialet er gjennomsiktig. I et slikt perspektiv vil bruk av granulære aerogel i boligbygg ha en begrenset anvendelse.

Beregningene av energibruk viste at det å erstatte vinduer med trelags glass og argongass med vinduer med tolags glass og aerogel (enten monolittisk eller granulær) gir en innsparing på inntil 20 % av energibehovet til romoppvarming. Dette tilskrives, som forklart ovenfor, den høye solinnstrålingen gjennom aerogel-vinduene.

Livssyklusberegninger av drivhusgassutslipp viste at bygningens utslipp ble redusert med 9 % som følge av at trelagsvindu ble skiftet ut med aerogel-vinduer. Sammenligningen i figur 2 mellom bruk av enten aerogel-vindu eller trelags-vinduer viser de mest signifikante resultatene (romoppvarming, bygningens energibruk og bygningens livssyklusutslipp). Verdiene fremkommer ved å dividere hvert resultat gitt ved bruk av aerogel-vinduer med tilsvarende resultat gitt ved bruk av trelags-

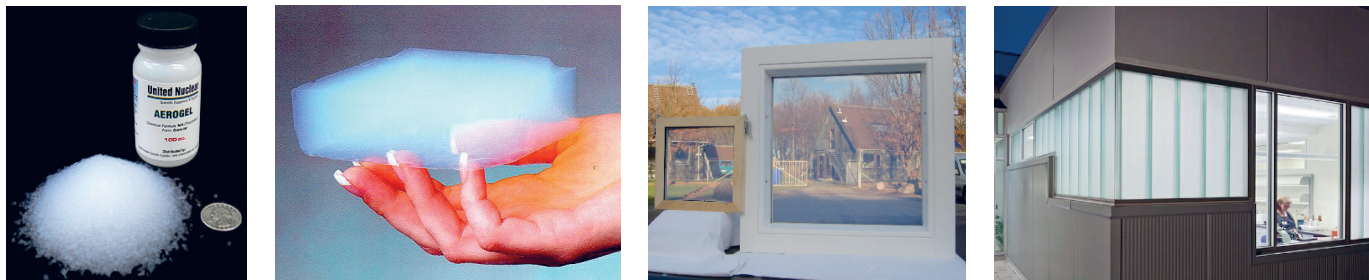


Figure 2. Three pictures of aerogel products. Left: granular aerogel. From [www.unitednuclear.com](http://www.unitednuclear.com). Centre: monolithic aerogel. From [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com). Right: monolithic aerogel as insulation in a window. From Jensen, K.I., Kristiansen, F.H., and Schultz, J.M., *Highly Insulating and Light Transmitting Aerogel Glazing for Super Insulating Windows*, Technical University of Denmark, 2005. Bottom: granular aerogel as insulation in a window. From [www.tgpamerica.com](http://www.tgpamerica.com).

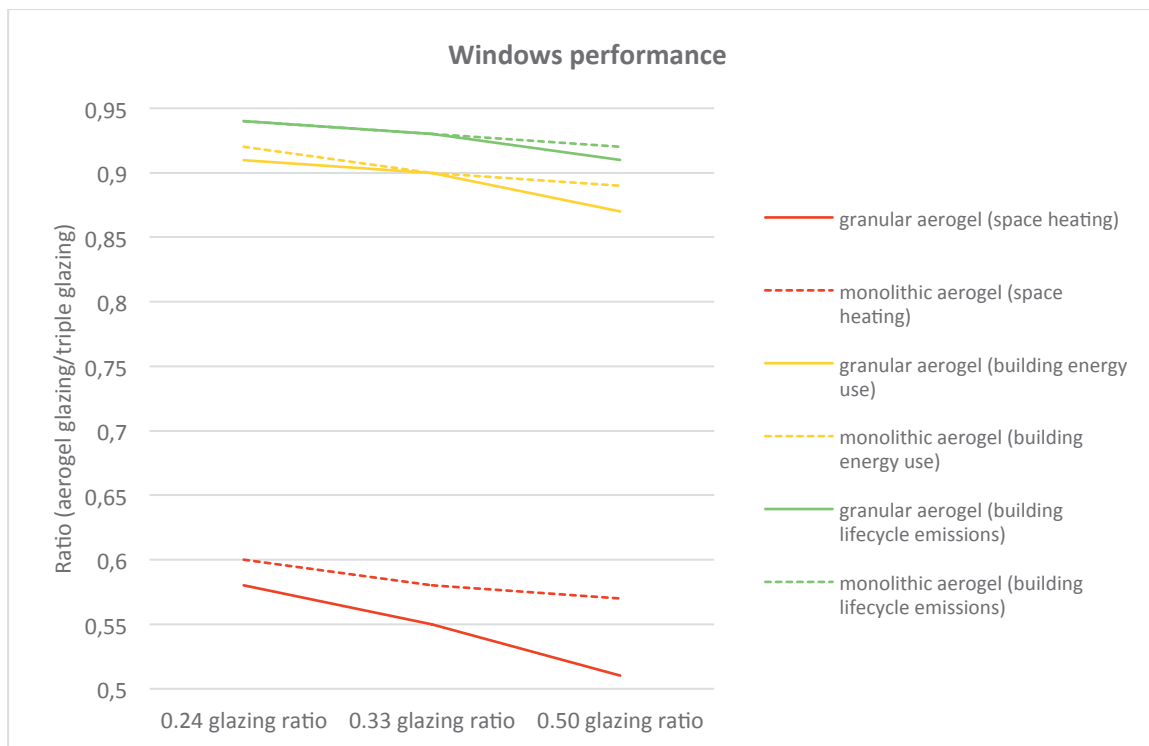
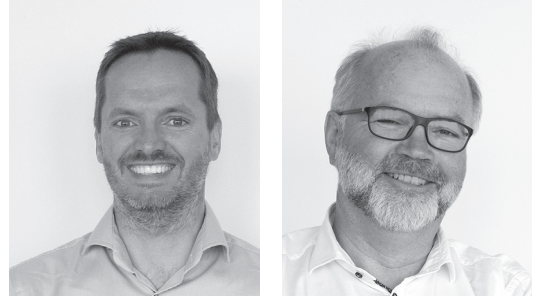


Figure 3. Ratio of the results given by the energy use and building lifecycle emissions between the alternatives with aerogel-insulated windows and the alternatives with argon-insulated windows with corresponding glazing ratio.

vinduer. Resultatene av denne studien viser at bruken av aerogel-vinduer kan gjøre det mulig å redusere energibehovet til romoppvarming og også GHG-utslippet fra boligbygg i Norge.

Based on

N. Lolli, I. Andresen, Aerogel vs. argon insulation in windows: A greenhouse gas emissions analysis, *Building and Environment*, 101 (2016) 64-76.



## NECESSARY TOOLS FOR SUSTAINABLE BUILDING DEVELOPMENT SENTRALE REDSKAPER FOR UTVIKLING AV BÆREKRAFTIGE BYGNINGER

Arild Gustavsen (NTNU) and Terje Jacobsen (SINTEF)

Good laboratory facilities are important for research, development, and improvement of sustainable buildings and building technologies. ZEB has built new laboratory facilities and improved existing laboratories at NTNU and SINTEF during its seven years of existence. Building materials, building assemblies, building services, interaction between building services and building materials, building integrated energy supply systems, and building-grid interaction can now be investigated. These facilities have been made available to researchers and the building industry and are helping to speed up the development of sustainable solutions for the building industry. The following examples present some of the experimental facilities that are available, including some laboratories built before the ZEB Centre was established.

### **Materials, building assemblies, and building services**

Building materials, building assemblies and building services are important parts of a building. Each component needs to be of good quality for the building to function well as a whole. NTNU and SINTEF have extensive facilities for investigating the strengths and weaknesses of building materials and components. Some examples are FTIR spectrometers, hot plate apparatus for measuring thermal conductivity, hot box for the measurement of thermal transmittance (U-value), and climate chambers for measuring the hygrothermal properties of building materials and assemblies. Climate simulators are available for measuring air and water tightness as well as building material durability. Experiments can be performed under constant and dynamic boundary conditions, and the influence of

solar radiation can also be investigated. The indoor environment generated using different ventilation strategies and components can be investigated in a test room. The performance of advanced heat exchangers for air handling units can be tested in dedicated rigs. In addition, a facility has been developed to investigate control strategies for sub-stations in district heating systems.

*Contact: Terje Jacobsen and Hans Martin Mathisen.*

### **ZEB Test Cell Laboratory**

The laboratory equipment mentioned and shown above utilizes a controlled environment on both sides of the sample, i.e. both an indoor and outdoor climate may be simulated. This is important for evaluating building components under standardized conditions, e.g. rating and comparison of building components such as windows

and doors. However, to fully evaluate the real performance of a building component, exposure to real climatic conditions is necessary. This can be achieved in the ZEB Test Cell Laboratory.

The Test Cell Laboratory can be used for research, development, and testing of low-energy, integrated building systems under realistic operational conditions. The laboratory is made of two test rooms, each one surrounded by a control volume. Each room has one surface exposed to the outdoor, so that different building envelope technologies can be tested in parallel, side by side. In addition to comparative and calorimetric tests on building materials and building envelopes, the Test Cell Laboratory is a technical development facility where different building equipment and terminals can be tested and optimized, together with their control systems, in combination with building envelope components.

*Contact: Francesco Goia and Einar Bergheim.*

### Facility for user-technology interaction studies “ZEB Living Laboratory”

The “component” often having the most influence on the energy use of a building is the user. A building laboratory is therefore not complete without facilities for evaluation of how different users interact with the buildings and its technologies and how this interaction influences energy use.

The ZEB Living Laboratory is a test facility that is occupied by real people, who are using the building as their home. The focus is on the occupants and their use of innovative building technologies, such as the intelligent control of

building services, interactive user interfaces and interplay with the energy system as a whole.

The ZEB Living Laboratory is at the same time used to study various technologies and design strategies in a real world living environment:

- User centered development of new and innovative solutions: the test facility is used within a comprehensive design process focusing on user needs and experiences.
- Performance testing of new and existing solutions: exploring building performance in a context of realistic usage scenarios.
- Detailed monitoring of the physical behavior of the building and its installations as well as the users’ influence on them.

ZEB researchers within the fields of architecture, social science, materials science,

building technologies, energy technologies, and indoor climate jointly study the interaction between the physical environment and the users. The ZEB Living Laboratory is important in making sure that the solutions developed within ZEB Centre are tested and verified at an early stage. The Living Laboratory strengthens collaboration between industry partners and researchers.

*Contact: Thomas Berker, Ruth Woods and Hans Martin Mathisen.*

### The next step: ZEB Flexible Laboratory

ZEB Living Laboratory and ZEB Test Cells Laboratory allow development and research on systems and technologies for smaller buildings. A laboratory facility for testing of full-scale integrated systems for zero emission commercial and public buildings in a Nordic climate is not yet available. The ZEB Flexible Laboratory will be such a facility.



*Figure 1. The figure shows a panorama view of building physics laboratory with rotatable hot box (grey box to the right), climate simulator (blue box in the middle), and RAWI box (rain and wind box, to the left). Photo: SINTEF Building and Infrastructure.*

The ZEB Flexible Laboratory will be an integrated and comprehensive laboratory research infrastructure for the holistic development of materials and technologies for zero emission buildings. Further, the ZEB Flexible Lab will be a large full-scale non-residential building where most of the building façade materials, components, and technical systems can be modified and replaced. The elements may also be interconnected so that they form a part of or become a complete zero emission building. This building or parts of the building (e.g. an office space) will form a living laboratory, i.e. a laboratory where people using it as an ordinary office building/space become an experimental parameter giving variations in loads through their use of the premises. The laboratory will be completed in 2019.

Contact: Terje Jacobsen and Arild Gustavsen.

Gode laboratoriefasiliteter er viktige for forskning, utvikling og forbedring av bærekraftige bygninger og bygningsteknologier. I løpet av sine sju år siden oppstart har ZEB bygget nye og forbedret eksisterende laboratorier ved NTNU og SINTEF.

Byggematerialer, bygningskomponenter, tekniske installasjoner, interaksjon mellom tekniske installasjoner og bygningsmaterialer, bygningsintegreerte energiforsyningssystem, og bygning-kraftnett interaksjoner kan nå undersøkes.

Laboratoriene er gjort tilgjengelige for forskere og industri, og bidrar til å sette fart på utviklingen av bærekraftige løsninger for bygningsindustrien. De følgende eksemplene representerer noen av de laboratoriene

som er gjort tilgjengelige, inkludert noen laboratorier som ble bygget før ZEB-senteret ble etablert.

### Materialer, bygningskomponenter og tekniske installasjoner

Byggematerialer, bygningskomponenter og tekniske installasjoner er viktige deler av en bygning. Hver komponent må være av god kvalitet for at bygningen skal fungere godt som en helhet. NTNU og SINTEF har betydelige fasiliteter for å undersøke styrkene og svakhetene ved byggematerialer og komponenter. Noen eksempler er FTIR-spektrometer, apparat for måling av varmeledningsevne, «hotbox» for måling av varmegjennomgangskoeffisient (U-verdi), og klimakammer for måling av hygrottermiske egenskaper ved materialer og konstruksjoner.

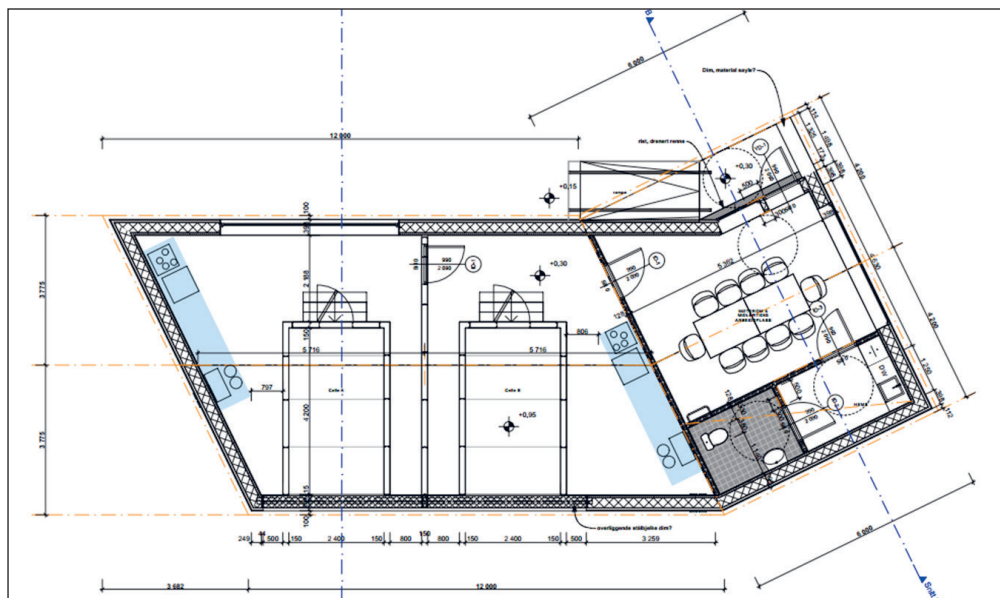


Figure 2. Floor plan of ZEB Test Cell Laboratory, showing the two test cells facing the south façade of the building. Main architect is Luca Finocchiaro, Faculty of Architecture and Fine Art, NTNU.

Klimasimulatorer er tilgjengelige for måling av luft- og vanntetthet samt holdbarheten til byggematerialer. Eksperimenter kan utføres under konstante og dynamiske rammebetingelser, og påvirkning fra solstråling kan også undersøkes. Ulike ventilasjonsstrategier og komponenters påvirkning på innemiljøet kan undersøkes i et forsøksrom. Ytelsen av avanserte luftvarmevekslere kan testes i egne rigger. I tillegg er det utviklet et anlegg for å undersøke kontrollstrategier for undersentraler i fjernvarmeanlegg.

*Kontakt: Terje Jacobsen og Hans Martin Mathisen.*

### ZEB Test Cell Laboratory

Laboratoriet styret som er nevnt og vist over benytter et kontrollert miljø på begge sider av forsøksobjektet, dvs. at både innendørs og utendørsklima kan simuleres. Dette er viktig med hensyn til evaluering av bygningsdeler under standardiserte betingelser, f.eks. vurdering og sammenligning av bygningskomponenter som vinduer

og dører. For å fullt ut kunne evaluere en bygningskomponents ytelse, er det imidlertid nødvendig å eksponere komponenten for virkelige klimaforhold. Dette kan utføres i ZEB Test Cell Laboratory.

Test Cell Laboratory kan brukes til forskning, utvikling og testing av integrerte, lavenergi bygningssystemer under realistiske driftsforhold. Laboratoriet består av to test-rom omgitt av hvert sitt kontrollvolum. Hvert rom har en overflate som er eksponert for friluft, slik at ulike bygningselementer kan testes parallelt, side om side. I tillegg til komparative og kalorimetrisk tester av bygningsmaterialer og bygningsekledninger, er Test Cell Laboratory et teknisk anlegg hvor forskjellige typer installasjoner og terminaler kan testes og optimaliseres sammen med sine respektive styringssystemer og i kombinasjon med komponentene i bygningsskallet.

*Kontakt: Francesco Goia og Einar Bergheim.*

### Forskningsanlegg for interaksjonsstudier mellom bruker og teknologi “ZEB Living Laboratory”

Brukeren er den “komponenten” som ofte har størst innvirkning på energibruken i en bygning. Et bygningslaboratorium er derfor ikke komplett uten fasiliteter for vurdering av hvordan ulike brukere interagerer med bygningene og dens teknologier, og hvordan denne interaksjonen virker inn på energiforbruket.

ZEB Living Laboratory er et testanlegg som bebos av virkelige mennesker som bruker bygningen som sitt hjem. Fokuset er på beboerne og deres bruk av innovative bygningsteknologier, for eksempel intelligent styring av bygningsfunksjoner, interaktive brukergrensesnitt og samspill med energisystemet som helhet. ZEB Living Laboratory brukes samtidig til å studere diverse teknologier og designstrategier i et ekte, levende miljø:

- Brukersentrert utvikling av nye og innovative løsninger: testanlegget brukes innenfor



Figure 3. ZEB Living Laboratory. Main architect is Luca Finocchiaro, Faculty of Architecture and Fine Art, NTNU. Photo: Katrine Peck Sze Lim



Figure 3b. Details from ZEB Test Cell Laboratory. Photo: Ole Tolstad



Figure 4. Illustration of ZEB Flexible Laboratory. Illustration by Snøhetta.

en helhetlig designprosess med fokus på brukerbehov og erfaringer.

- Ytelsestesting av nye og eksisterende løsninger: utforske bygningsytelse i en kontekst av realistiske brukerscenarier.

- Detaljert overvåking av den fysiske oppførselen til bygningen og dens installasjoner, så vel som brukernes innvirkning på dem.

ZEB-forskere innen fagområdene arkitektur, samfunnsvitenskap, materialteknologi, bygningsteknologi, energiteknologi, og inneklima studerer i samspill interaksjonen mellom det fysiske miljøet og brukerne. ZEB Living Laboratory er nødvendig for å sikre at løsningene som utvikles ved ZEB-senteret

testes og verifiseres på et tidlig stadium. Living Laboratory styrker samarbeidet mellom næringslivspartnere og forskere.  
*Kontakt: Thomas Berker, Ruth Woods og Hans Martin Mathisen.*

### Det neste steget: ZEB Flexible Laboratory

ZEB Living Laboratory og ZEB Test Cells Laboratory muliggjør utvikling og forskning på systemer og teknologier for mindre bygninger. En laboratoriefasilitet for testing av fullskala integrerte systemer for kommersielle og offentlige nullutslippsbygg i et nordisk klima, finnes foreløpig ikke. ZEB Flexible Laboratory skal bli en slik fasilitet.

ZEB Flexible Laboratory vil bli en integrert og omfattende laboratorieforskningsinfrastruktur for holistisk utvikling av materialer og teknologier for nullutslippsbygg. Videre vil ZEB Flexible Lab bli et stort fullskala næringsbygg hvor mesteparten av fasadematerialene, bygningskomponentene og de tekniske systemene kan endres og skiftes ut. Elementene kan også være innbyrdes forbundet slik at de utgjør en del av eller hele nullutslippsbygget. Denne bygningen eller deler av bygningen (for eksempel en kontorplass) vil utgjøre et levende laboratorium, dvs. et laboratorium der folk som bruker bygget som en ordinær kontorbygning/plass blir en eksperimentell parameter som gir variasjoner i last gjennom sin bruk av lokalene. Laboratoriet vil være ferdigstilt i 2019.

*Kontakt: Terje Jacobsen og Arild Gustavsen.*

### Acknowledgements

The development of these laboratories would not have been possible without the contributions of the Research Council of Norway, ZEB partners, NTNU and SINTEF, which we thank for their support.

For the ZEB Living Laboratory and ZEB Test Cell Laboratory the following ZEB Partners have contributed with work, competence, and materials: Caverion, Glava, Sapa, DuPont, NorDan, Isola, and VELUX. Contributions have also been received from Kährs, NorDesign, OSO, Electrolux and FLEXIT.





## LIVING LAB, A LIVEABLE LABORATORY

### LIVING LAB, LABORATORIET EIN KAN BU I

Marius Støylen Korsnes (NTNU)

The Zero Emission Building Living Lab is a detached house newly erected on the edge of the NTNU Campus Gløshaugen. The house, which has a living space of 100m<sup>2</sup>, is constructed with state of the art technology for energy saving and efficiency and the production of renewable energy. Since October 2015 three different groups have lived in the house, and three new groups shall take up residence before the first round of qualitative experiments are over at the end of April 2016. The goal of the qualitative experiments is to learn more about the interaction between users and zero emission buildings, something that will help to make society better prepared for a future that will include zero emission buildings.

The qualitative experiments are unique in a Norwegian context, and are important to gain a better understanding of how users and the house may be expected to influence one another. Users can for instance make an impact on the zero emission ambitions of the building, and the building can on the other

hand influence people's everyday lives and practices. Social science innovation literature points out that new and important innovation often happens when a new technology is actually used. Feedback from real users is therefore very useful in order to make the technology accessible for a larger group of people. Hence, the qualitative experiments in Living Lab can help to reveal challenges and advantages within a zero emission building, which are difficult to imagine when the building is not in actual use.

The experiments is organised in the following way: Six groups were chosen from 150 applicants to live in the lab for a period of 25 days each. The six chosen groups ordinarily live in a variety of housing types, from student housing and apartments, to row houses and detached houses, and none of the aforementioned homes has specific ambitions regarding low energy usage. The six groups chosen were based on three main demographic categories: student couples under the age of thirty, families with two

small children and couples around the age of sixty. Two groups that were as similar as possible within each category were chosen. By having two and two similar groups we are able to compare and contrast our findings, which allows a better understanding of to what degree similarities and differences are connected to the group as a singular factor, or to other factors. Qualitative experiments are not as rigorous as controlled laboratory experiments, but they do provide new perspectives and a broader ground for comparison than other approaches.

During each group's stay a broad range of data was collected, and the methodologies applied are a mix of sociological and anthropological understandings of energy use. The residents are interviewed before, during and after their stays in the lab. Participant observation also takes place sporadically during the 25 days at different times of the day. The residents keep their own diary where they write down their daily activities and schedule, as well as other observations and

reflections about the house. The residents also have access to a camera that they can use to film themselves during their everyday activities, and there is a guest book, where the residents and their guests can record their thoughts about the house. Sensors which are located throughout the house register information about energy use, production and indoor climate. The sensors amongst other things measure temperature, CO<sub>2</sub>-level, electricity use, air humidity and movement – to indicate what rooms are in use.

During an interview, which takes place approximately 25 days after participation in the experiment has ended; a selection of data registered by the sensors is presented to each of the resident groups. This enables them to provide reflections about their own experienced energy use during their stay. In this way, we can say something about the difference between experienced and actual energy use in a zero emission building versus “normal” buildings.

By comparing and contrasting data from all participating groups the qualitative experiments conducted in Living Lab may contribute to a better understanding of how a zero emission building can function in a Norwegian context. For instance, how important is access to a “cosy” fireplace and cold bedrooms with “fresh” night air to the different groups? The experiments in Living Lab contribute to solving challenges that arise when the daily needs of Norwegian householders and the future needs imposed by climate change meet.



Nullutsleppshuset ZEB Living Lab står ferdig bygd ved Perleporten på NTNU Campus Gløshaugen. Huset, som har buareal på 100m<sup>2</sup>, er bygd med det aller siste av teknologi for energisparing og effektivisering og utnytting av fornybar energi til energiproduksjon. Sidan oktober 2015 har det budd tre ulike bebuargrupper i huset, og tre nye grupper skal inn før den første runda av kvalitative eksperiment er over i slutten av april 2016. Målet med dei kvalitative eksperimenta er å lære meir om samspelet mellom brukarar og nullenergibyg, noko som vil gjere framtida betre budd for innføring av nullutsleppshus.

Dei kvalitative eksperimenta som no føregår inne i laben er unike av sitt slag i Noreg og er viktige for å forstå betre korleis brukarane og huset kan påverke kvarandre gjensidig. Brukarar kan påverke bygget sine føresetnader om nullutslepp, og nullutsleppsbygg kan på den andre sida også påverke kvardagslivet og rutinane til folk. Frå innovasjonslitteraturen innanfor samfunnsfaga er det poengtert at nye og viktige oppdagingar ofte gjerast ved bruken av ein ny teknologi. Innspel frå faktiske brukarar er difor svært hjelpsame for at teknologien skal gjerast tilgjengeleg for ei større gruppe menneske. Dei kvalitative eksperimenta i Living Lab kan soleis bidra til å avdekkje utfordringar eller føremoner med nullutsleppsbygg som er vanskelege å tenkje seg til og som betre kjem til syne ved faktisk bruk.

Eksperimenta er satt opp på følgjande måte: Det er seks grupper som er utvalde til å bu i labben i ei periode på 25 dagar kvar. Dei utvalde gruppene bur til vanleg i studentkollektiv, leilegheit, rekkehus eller hus, og desse bustadene har ingen spesielle ambisjonar om låg energibruk. To og to av desse gruppene er så like som mogleg med omsyn til livssituasjon, alder, kjønn og tal på personar. Vi har difor to grupper à to studentar, to grupper à to barnefamiljar (med to barn kvar), og to grupper à eit eldre par rundt 60 år gamle. Ved å ha to like grupper kan vi samanlikne funn og betre forstå i kva grad likskapar og skilnader er knyta til gruppa som einskildgruppe eller til andre faktorar. Kvalitative eksperiment er naturlegvis ikkje like rigorøse som kontrollerte eksperiment i lukka laboratorium, men dei gjev eit nytt perspektiv og breiare samanlikningsgrunnlag enn alternative tilnærmingar.

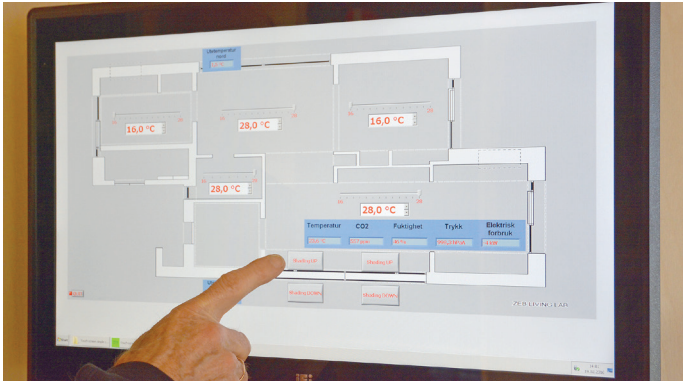
Datainnsamlinga som vert gjort under residensperioden for kvar gruppe er brei, og metodane er ei blanding av antropologiske og sosiologiske tilnærmingar til forståing av energiforbruk. Vi gjer intervju med bebuarane både før, under og etter opphaldet i laben. Vi gjer deltakande observasjon som skjer sporadisk under dei 25 dagane og på ulike tidspunkt av døgnet. Bebuarane fører sjølve ei dagbok som dei fyller ut kvar dag, der dei skriv ned daglege aktivitetar, og andre observasjonar og refleksjonar om huset. Bebuarane har også tilgang på eit kamera

som dei kan filme seg sjølve med under ulike daglegdagse aktivitetar, og det ligg ei «hyttebok» i huset der både gjestar og bebuarane sjølve kan skrive ned deira tankar om huset. I tillegg til alt dette vert det ved hjelp av sensorar plasserte på ulike punkt inne i huset logga informasjon om energibruk, energiproduksjon og inneklima. Sensorane måler blant anna temperatur, CO<sub>2</sub> nivå, straumbruk, luftfuktigheit og rørsle for å sjå kva rom som er mest i bruk.

Eit utval data registrert av sensorane vert så presenterte til brukarane i intervjuet etter opphaldet i Living Lab, der dei kan luften refleksjonar og tankar om deira eigen energibruk i opphaldstida. På denne måten kan vi seie noko om skilnaden mellom tenkt og faktisk energibruk i eit nullutsleppsbygg versus «vanlege» heimar.

Ved å analysere og samanlikne data frå alle gruppene vil vi med dei kvalitative eksperimenta i Living Lab kunne bidra til å betre forstå korleis nullutsleppsbygg kan fungere i ein norsk kontekst. Kor viktig er det til dømes for de ulike gruppene å ha tilgang på koseleg peisvarme og kald nattluft? Eksperimenta i Living Lab er med på å løyse utfordringar knytta til å dekkje vanlege huseigarar sine dagleg behov samstundes som framtidas klimautfordring vert møtt.

*All photos by Ole Tolstad and Ruth Woods*





## THE FLOCK

Kristian Edwards (Snøhetta)

The flocking Starling asks his neighbour “do you know where we’re going?” The neighbour replies “I thought you did”.

We at Snøhetta are often asked to describe our methodology, our process - this being the very thing that we point out as being the secret to successful projects. This is no less the case with the enormous interest around the realised pilot projects, Powerhouse Kjørbo and ZEB Pilot House Larvik.

The process around our high-level research projects is an up-scaled version of one we already employ. That said, this process is hard to define - it’s meta - at once tangible and yet not. Constantly evolving.

Our understanding of architecture behaves in a very similar way. Entirely dependent on the unique biography of each individual observer. Each subsequent observation changes the boundary conditions for the next. With infinite

and immeasurable exponent.

Architecture at any one moment is perhaps quite simply put: a uniquely convoluted aggregate of infinite observations.

In the initial phases of our collaborative projects with ZEB, researchers, industry partners, and advisors are understandably curious to the seemingly chaotic fusion of multiple disciplines. Yet within this apparent madness lays precisely the method - we must simply equip our process to accommodate multiple volatile agencies.

Flocks of birds, and more specifically murmurations of starlings, are the parallel that we draw most closely to the organic initial phases of complex projects. Craig Reynolds suggests that “the flocking behaviour in birds can be explained by assuming that each bird follows three simple rules:

- “Separation (don’t crowd your neighbours)
- Alignment (steer toward the average heading of your neighbours)
- Cohesion (steer toward the average position of your neighbours).”

*Quote via John Naughton from C.W. Reynolds “Flocks and Herds and Schools: A distributed Behavioural model”.*

The contrast between the scientific simulation and our flock or murmuration of ideas, people, and processes - added to what we call rapid prototyping - that is: model, manufacture, trial and error; is arguably the success factor to our collaborative pilots.

As each member of the pilot team adds their own unique biography to the evolving project we must remain open to new, untested notions. Stimulated by questioning and reasoning from dynamic groupings of multiple disciplines - our critical contributions add

incalculable value. We add more birds and new directions to the swirling flock.

Fixed targets and plenum-negotiated milestones are imperative. With subtle navigation, our aim, as for the flock, is to land in natural unison. It is above all this process, this framework, this thing of spectacular organic beauty, we can pass on to new constellations, so that together they too may discover the code to their own unfaltering equilibrium.

As the Centre's time draws to a close, we each have left our own unmistakable imprint on the pilot projects in ZEB. So have the projects, the processes, and the people of the ZEB centre left their own indelible mark on each of us. In our eagerness to reach such lofty ambitions, however, we must not neglect to communicate beyond our own sphere; the very reason behind our embarkation on such radical missions. The mission for a sustainable, recovering environment, the cause for such overwhelming individual investments of intensity, energy, capital, and

sheer willpower still requires the strongest communication.

Finally, we take an incredible spirit of investigation with us into our future collaborative projects - and add our own unique layer to a burgeoning culture of stratospheric sustainable ambition.

See you up there.

Den svermende stæren spurte sin nabo «vet du hvor vi skal?». Naboen svarer «jeg trodde du visste det».

Vi på Snøhetta blir ofte bedt om å beskrive vår metodologi, vår prosess, og dette er nettopp hva vi trekker frem som hemmeligheten bak vellykkede prosjekter. Ikke minst var dette tilfelle med våre ferdigstilte pilotprosjekter Powerhouse Kjørbo og ZEB Pilot House Larvik, som har vekket enorm interesse.

Prosessten vi bruker i våre high-level forskningsprosjekter er en oppskalert versjon av en vi allerede benytter. Når det er sagt, er denne prosessen vanskelig å definere – den

er meta – på en gang håndgripelig og samtidig ikke. I stadig utvikling.

Vår forståelse av arkitektur fortoner seg veldig likt. Fullstendig avhengig av hver individuelle observatørs unike biografi. Hver påfølgende observasjon endrer grensesnittet for den neste. Med uendelig og grenseløs eksponent.

Kanskje litt enkelt formulert, men arkitektur er, til enhver tid, en unikt sammenfoldet opphopning av tallrike observasjoner.

I de tidlige fasene av våre prosjektsamarbeid med ZEB, var forskere, rådgivere og samarbeidspartnere fra industrien naturlig nok nysgjerrige på denne på øyensynlig kaotiske fusjonen mellom flere disipliner.

Like fullt, i dette tilsynelatende vanviddet ligger metoden, Vi må bare ruste prosessene våre til å imøtekomme flere skiftende aktører.

Fugleflokker, og mer konkret stærens synkroniserte sverming, er den lignelsen som bringer oss nærmest de organiske startfasene i komplekse prosjekter.

Craig Reynolds foreslår at svermende atferd i fugler kan forklares ved å anta at hver fugl følger tre enkle regler:

- Atskillelse (ikke fortrenge naboene dine)
- Justering (styr mot middelkursen av det dine naboer holder)
- Samhold (styr mot middelposisjonen i forhold til dine naboers plasseringer)



ZEB Pilot House Larvik. Photo: Paal A. Schwital/Metro.

Sitat via John Naughton fra C.W. Reynolds "Flocks and Herds and Schools: A distributed Behavioural model".

Kontrasten mellom den vitenskapelige simuleringen og vår flokk eller sverming av ideer, mennesker og prosesser – i tillegg til det vi kaller hurtig prototyping – altså: modell, produksjon, og prøving og feiling; er uten tvil suksessfaktoren til våre samarbeidspiloter.

Samtidig med at hvert medlem av pilotteamet tilføyer sin unike biografi til det utviklende prosjektet, må vi bli ved å holde åpent for nye, uvante ideer. Stimulert av utspørringene og fornuftsvurderingene til de mangedisiplinære dynamiske grupperingene, tilfører vårt kritiske bidrag en uforlignelig verdi. Vi føyer flere fugler og nye baner til den virvlende flokken. Solide mål og felles fremforhandlede

milepæler er avgjørende. Med nennsom navigasjon er vårt mål, som svermens, å lande i naturlig samstemthet. Det er fremfor alt denne prosessen, dette rammeverket, dette fenomenet av spektakulær organisk skjønnhet, som vi kan gi videre til nye konstellasjoner, så de også sammen kan oppdage koden til deres avstemte likevekt.

Ettersom senterets tid går mot slutten, har hver enkelt av oss etterlatt vårt umiskjennelige preg på pilotprosjektene i ZEB. Likeså har prosjektene, prosessene og folket på ZEB-senteret etterlatt sine uutslettelige spor i hver av oss.

I vår iver etter å oppfylle slike høye ambisjoner må vi ikke forsømme dette å kommunisere

utover vår egen sfære; selve drivkraften bak det å legge i vei mot slike radikale mål. Ambisjonen for et bærekraftig og restituerende miljø, motivet for en slik overveldende individuell investering av intensitet, energi, kapital og ren viljestyrke krever den kraftigste formidling.

Til slutt tar vi med oss en utrolig utforskerånd inn i våre fremtidige samarbeidsprosjekter, og tilføyer våre egne unike lag til en spirende kultur av stratosfæriske bærekraftige ambisjoner.

Vi sees der oppe.



ZEB Pilot House Larvik.  
Photo: Paal A. Schwital/Metro.

*Snøhetta has been involved in a number of ZEB pilot buildings: Powerhouse Brattørkaia, Powerhouse Kjørbo, ZEB Pilot House Larvik (Multikomfort), Ådland / Zero Village Bergen. A number of the pilot buildings are presented in other articles in the annual report for 2015. At the ZEB House Larvik the following partners have been involved, Snøhetta, SINTEF, Brødrene Dahl, Isola, Glava, Weber.*

## Personnel

In 2015 a total of 36 persons were involved in ZEB 10 % or more of their total working hours. In addition, ZEB had 8 PhD and 2 PostDoc in 2015, where 5 of them are Norwegian and 5 females.

Further, 5 PhD are working closely to the centre, with financial support from other sources.

In total, there were 20 ZEB-related master graduates in 2015.

## Publications

Type of publication	2015	Total
Journal paper	14	103
Published Conference Papers	27	133
Conference and seminar presentations	26	292
Popular Science Articles	6	28
Books and books chapters	3	8
Reports incl. PhD and master thesis	25	120
Media contributions	48	159

## Funding and Cost

The total funding in 2015, including in-kind contribution was NOK 32 604 264. The table shows the funding per partner (all figures in NOK 1 000):

	Funding	Amount	Amount
The Research Council			16 569
The Host Institution (NTNU)			5 535
Enterprise partners			8 322
Brødrene Dahl AS		339	
ByBo AS		489	
Byggenæringens Landsforening		58	
Caverion Norge AS		558	
DuPont de Nemours		113	
Glava AS		386	
Isola AS		320	
Multiconsult		407	
NorDan AS		355	
Norsk Teknologi		50	
Protan		100	
SAPA Building Systems		372	
SINTEF		1 652	
Skanska Norge AS		1 454	
Snøhetta AS		257	
Weber		952	
Sør Trøndelag fylkeskommune		460	
Public partners			2 178
Direktoratet for byggkvalitet		5	
Entra Eiendom AS		150	
Forsvarsbygg		198	
Husbanken		569	
Statsbygg		1 256	
<b>Total</b>			<b>32 604</b>



## Annual Cost

The total cost in 2015 was NOK 32 604 264. The table shows the costs for the different activities (all figures in NOK 1 000):

Activity	2015
Management and administration of the Centre	3 586
WP1: Advanced materials and technologies	2 598
WP2: Climate-adapted low-energy envelope systems	1 590
WP3: Energy systems for zero-emission buildings	1 611
WP4: Energy efficient use and operation	2 065
WP5: Concepts and strategies for ZEB	3 016
Dissemination of knowledge (conferences, seminars, workshops)	1 812
Training of research personnel, professor position	6 204
In kind contribution from the user partners	4 935
Equipment	5 187
<b>Total costs</b>	<b>32 604</b>

The table shows the cost per partner (all figures in NOK 1 000):

	Cost	Amount	Amount
The Host Institution (NTNU)			17 282
Research Partners (SINTEF)			11 603
Enterprise partners			2 934
Brødrene Dahl AS		89	
ByBo AS		338	
Byggenæringens Landsforening		8	
Caverion Norge AS		358	
Glava AS		86	
Isola AS		196	
Multiconsult		207	
NorDan AS		105	
SAPA Building Systems		222	
Skanska Norge AS		455	
Snøhetta AS		107	
Weber		553	
Sør Trøndelag fylkeskommune		210	
Public partners			778
Direktoratet for byggkvalitet		5	
Entra Eiendom AS		150	
Forsvarsbygg		48	
Husbanken		69	
Statsbygg		506	
Equipment			7
<b>Total</b>			<b>32 604</b>





