

Energiforsyningsløsninger for lavenergi yrkesbygg i Norge

Jostein Wall

Master i energi og miljø

Innlevert: August 2012

Hovedveileder: Natasa Djuric, EPT

Medveileder: Trygve Magne Eikevik, EPT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for energi- og prosessteknikk

EPT-M-2012-93

MASTER THESIS

for

Jostein Wall

Spring 2012

Energy supply solutions for Norwegian low energy commercial buildings

*Energiforsyningsløsninger for lavenergi yrkesbygg i Norge***Background and objective**

There is a trend that all new buildings from the year 2020 will be built according to the passive building standard until 2020. Low-energy buildings require application of energy-efficient technologies like high quality building insulation, energy-efficient building services, and high level of heat recovery. The application of these technologies has led to changes in building energy demand. On the other hand there is a requirement that energy supply system for the new buildings should be based on renewable energies. Therefore, it is important to analyse energy performance of the building integrated to renewable energies. The aim of this project is to simulate a new office building that is energy supplied by heat pump and solar collectors.

This project work is closely related to The Research Centre on Zero Emission Building at NTNU and SINTEF (FME ZEB) that has the vision to eliminate the greenhouse gas emissions caused by buildings. This national research centre will place Norway in the forefront with respect to research, innovation and implementation within the field of energy efficient zero-emission buildings.

The main objective of FME ZEB is to develop competitive products and solutions for existing and new buildings that will lead to market penetration of buildings that have zero emissions of greenhouse gases related to their production, operation and demolition. The Centre encompasses both residential and commercial buildings, as well as public buildings.

The following tasks are to be considered:

1. Literature review of heat pump technologies and solar collectors. The review should also include integration between these two technologies, like solar supported heat pumps.
2. Based on design drawings, develop a building simulation model. Simulate building energy demand.
3. Further, for the developed building model, develop an energy supply system model that would include heat pump and solar collectors.

4. Estimate and analyze the possibility of different system solutions that make use of heat pump and solar collectors for energy supply of commercial energy effective building. This would imply to recommend performance requirements on the energy supply solutions.
5. Make a "Draft paper" from the results of the thesis (8-10 pages).

-- " --

Within 14 days of receiving the written text on the master thesis, the candidate shall submit a research plan for his project to the department.

When the thesis is evaluated, emphasis is put on processing of the results, and that they are presented in tabular and/or graphic form in a clear manner, and that they are analyzed carefully.

The thesis should be formulated as a research report with summary both in English and Norwegian, conclusion, literature references, table of contents etc. During the preparation of the text, the candidate should make an effort to produce a well-structured and easily readable report. In order to ease the evaluation of the thesis, it is important that the cross-references are correct. In the making of the report, strong emphasis should be placed on both a thorough discussion of the results and an orderly presentation.

The candidate is requested to initiate and keep close contact with his/her academic supervisor(s) throughout the working period. The candidate must follow the rules and regulations of NTNU as well as passive directions given by the Department of Energy and Process Engineering.

Risk assessment of the candidate's work shall be carried out according to the department's procedures. The risk assessment must be documented and included as part of the final report. Events related to the candidate's work adversely affecting the health, safety or security, must be documented and included as part of the final report.

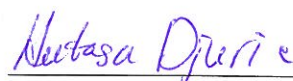
Pursuant to "Regulations concerning the supplementary provisions to the technology study program/Master of Science" at NTNU §20, the Department reserves the permission to utilize all the results and data for teaching and research purposes as well as in future publications.

The final report is to be submitted digitally in DAIM. An executive summary of the thesis including title, student's name, supervisor's name, year, department name, and NTNU's logo and name, shall be submitted to the department as a separate pdf file. Based on an agreement with the supervisor, the final report and other material and documents may be given to the supervisor in digital format.

Department of Energy and Process Engineering, 20. February 2012



Olav Bolland
Department Head



Natasa Djuric
Academic Supervisor

Research Advisors:
Trygve M. Eikevik,

Forord

Denne rapporten er resultatet av den avsluttende masteroppgaven for det 5-årige studiet *Energi og Miljø*, med spesialisering *Energibruk og energiplanlegging* og hovedprofil *Energibruk i bygninger*. Oppgaven har en studiebelastning på 30 studiepoeng, og har gått over vårsemesteret 2012.

Våren 2011 hadde jeg emnet TEP 4260 - *Varmepumper for bygningsklimatisering*. Dette emnet var det første jeg fattet en genuin interesse for under mitt studie på NTNU, og det vekket en interesse for bygningsoppvarming og varmepumper. Jeg valgte emner slik at studiet mitt fikk en hovedvekt på inneklimasystemer og varmepumpeteknikk til bygninger, og jeg var så heldig at jeg dessuten fikk en masteroppgave som omfatter samme tema. Dette er imidlertid første gang jeg benytter noe annet simuleringsverktøy enn det forholdsvis enkle programmet SIMIEN, noe som har krevd mye tid.

Masteroppgaven tar for seg et bestemt kontorbygg som ble påbegynt omtrent samtidig som jeg begynte på oppgaven. Nå som denne rapporten er ferdig skrevet skal byggingen være kommet i sin slutfase. Masteroppgaven tar for seg simuleringer av dette kontorbygget med ulike energikilder til oppvarmingssystemet, der varmepumper og solfanger inngår som energikilder. Simuleringene skal gi grunnlag til hvilken energiforsyningsløsning som best vil være tilpasset denne bygningens behov og dermed bidra til en minimering av energibruk og kostnader.

Jeg vil rette en stor takk til Natasa Djuric ved NTNU. Hun har vært min veileder i denne oppgaven og bidratt til svært mye hjelp. Takk for at du alltid hadde tid til å hjelpe meg alle de gangene jeg trengte det. Jeg vil også takke Jens Petter Burud som har funnet et spennende byggeprosjekt jeg kunne skrive om og som har vært svært behjelpelig med å gi meg den informasjonen om bygget jeg trengte, eller satt meg i kontakt med de personer som hadde den. Takk også til Trygve Magne Eikevik som hjalp meg med informasjon om varmepumper, i samtale og ved de forelesningene som jeg tok parallelt med denne masteroppgaven. Takk til Øystein som fikk meg til å fortsette på studiene, og til Anniken som lyser opp dagene.

Drammen, 27.07.2012.

Jostein Wall

Sammendrag

Stortinget legger grunnlaget for en opptrapping av arbeidet med å redusere klimagassutslippene i Norge med Klimameldingen og Klimaforliket, som fører til stadig strengere krav og økt fokus på energibruken til bygninger. I denne masteroppgaven blir det sett på et 3 000 m² stort kontorbygg som bygges på kysten i Mandal kommune, og som skal tilfredsstillе passivhusstandarden. Det benyttes en ny løsning for varmeavgiver i det vannbårne oppvarmingssystemet, nemlig takvarmepaneler som skal integreres i YIT sitt KlimaTak.

EnergyPlus er et dataprogram for energianalyse og termisk simulering, og er det simuleringsprogrammet som benyttes i denne oppgaven. Det blir bygget en simuleringsmodell av kontorbygget med grunnlag fra arkitektoniske plantegninger, med oppvarmingssystem og med tilhørende takvarme og ventilasjonssystem. Simuleringsmodellen blir kjørt med ulike energikilder til det vannbårne oppvarmingssystemet, der følgende kombinasjoner blir undersøkt:

1. Direktevirkende elektrisitet
2. Luft-veske varmepumpe + elektrisitet som spisslast
3. Vann-veske varmepumpe med energibrønn + elektrisitet som spisslast
4. Solfanger + luft-veske varmepumpe + elektrisitet som spisslast
5. Solfanger + vann-veske varmepumpe med energibrønn + elektrisitet som spisslast

Det er varmepumpe med R410a som arbeidsmedium som benyttes, og vann-veske varmepumpa benytter dessuten en energibrønn med en aktiv borehullsdybde på 1 000 m.

Oppvarmingssystemet som kom best ut i simuleringene og den økonomiske analysen, var systemet med luft-veske varmepumpe og direktevirkende elektrisitet som spisslast. Dette systemet hadde en investeringskostnad på 246 000 kr og en årlig energisparing i forhold til referanse-systemet med kun direktevirkende elektrisitet som oppvarmingskilde på 57 579 kWh/år.

Systemene med solfanger kom dårlig ut på lønnsomhetsanalysen fordi energien fra solfangeren bidro for lite til dekning av energibehovet til bygningen. Solfangersystemet med en 100 m² solfanger leverte under 1 300 kWh/år, og vil av den grunn ikke kunne rettferdiggjøre en innkjøpspris på 305 000 kr. Om den tapte energien fra solfangeren, som utgjør over 18 000 kWh årlig, kunne utnyttes helt eller delvis, kunne dette utgjøre større utslag på energibruken til oppvarmingssystemet.

Behovsimuleringen av kontorbygget der kun oppholdssonene ble klimatisert og det ble benyttet utvendig solavskjerming med styring på innetemperatur og solinnstråling, resulterte i et årlig energibehov på 356 026 kWh/år. Dette er et stort avvik fra tilsvarende simulering i SIMIEN.

Det ble også forsøkt simuleringer med varierende styring av innnetemperaturen i kontorbygget. Behovsanalysen benyttet en nattsenkning av innnetemperaturen på inntil 5 °C senkning utenfor arbeidstid, mens det også ble forsøkt å holde innnetemperaturen på konstant 21 °C over hele døgnet. Det ble imidlertid funnet at en økning i energibehovet på 19 973 kWh ved å gå fra nattsenkning til konstant innnetemperatur spares inn for oppvarmingssystemene med varmepumpe, fordi en får et mer stabilt effektbehov og dermed bedre arbeidsvilkår for varmepumpa.

Abstract

The Norwegian Parliament lays the foundation for an expansion of the efforts to reduce greenhouse gas emissions in Norway with Klimameldingen (Climate Report) and Klimaforliket (Climate change compromise) that leads to increasingly stricter requirements and increased focus on energy use of buildings. In this master thesis will be based on a 3000 m² office building currently being built on the coast in Mandal municipality, that shall meet the passive house standard. The building will use a new solution for thermal heat panels in the waterborne heating system, namely, ceiling heating panels to be integrated with YIT's KlimaTak.

Energy Plus is a computer program for energy analysis and thermal simulation, and is the simulation program which is used in this task. It was built a simulation model of the office building with a basis from the architecture plan drawings with a heating system complete with ceiling heating panels and ventilation system. The simulation model was run with different energy sources for the waterborne heating system, where the following combinations are examined:

1. Direct electric heating
2. Air-to-water heat pump + electric peak load
3. Water-to-water heat pump with energy well + electric peak load
4. Solar collector + air-to-water heat pump + pump electric peak load
5. Solar collector + water-to water heat pump with energy well + electric peak load

The heat pump which is used in the simulations uses R410a as the working medium, and the water-to-water heat pump uses an energy well with an active borehole depth of 1000 m total.

The heating system that did the best in the simulations and economic analysis was the system with the air-to-water heat pump and electric peak load. It had an investment cost of 246 000 NOK and annual energy savings, compared to the reference system with only electricity as heating source, at 57 579 kWh/year.

The systems with a solar collector scored poorly on the economy analysis, because it contributed too little for the coverage of the energy demand. The solar collector system with a 100 m² solar collector delivered less than 1 300 kWh/year, and will therefore not be able to justify a purchase of 305 000 NOK. If the lost energy from the collector, which is more than 18 000 kWh per year, could be utilized in whole or in part, this system could represent a better economic choice.

The simulation of energy demand of the office building was simulated with only the zones for permanent residence air conditioned and heated, and it was installed automatic outside shading which was controlled by both indoor temperature and solar radiation. The simulation resulted in an annual energy requirement of 356 026 kWh/year. This is a big deviation from the corresponding simulation in SIMIEN.

There were also done simulations with variable control of the indoor temperature in the office building. The demand analysis used regulation of the temperature that allowed a lowering of the temperature of 5 °C outside of working hours. However, there was also made simulations with a constant indoor temperature of 21° C throughout the day. It was found that an increase in the energy demand of 19 973 kWh when going from nighttime temperature reduction to constant indoor temperature is overshadowed from the saved electric energy demand by the heat pump. This is due to the more stable power demands and thus improved working conditions for the heat pump.

Innhold

1	INTRODUKSJON	1
1.1	Forskrifter for å fremme energieffektivisering	2
1.2	Enovas støtte til energieffektivisering	2
1.3	Energimerkeordningen	3
1.4	Fornybare energikilder	4
1.4.1	Vindkraft	4
1.4.2	Solenergi	5
1.4.3	Varmepumpe	5
1.4.4	Bioenergi	6
1.5	Målsetting med oppgaven	6
1.6	Begrensninger av oppgaven	6
2	VARMEPUMPETEKNOLOGI	7
2.1	Arbeidsmedier	10
2.1.1	Syntetiske medier	12
2.1.2	Naturlige medier	12
2.2	Varmekilder	13
2.2.1	Uteluft	13
2.2.2	Energibrønn (grunnvarme)	15
2.3	Levetid	17
2.4	Pris	17
3	SOLFANGERSYSTEM	19
3.1	Solfangeren	20
3.1.1	Plan solfanger	21
3.1.2	Vakuumrørsolfanger	22
3.2	Levetid	22
3.3	Pris	22
4	VARMESYSTEM FOR BYGG	23
4.1	Temperaturer i varmesystem	23
4.2	Takvarme	23

4.3	Forklaring av begreper om energibehov	26
5	ENERGYPLUS.....	28
6	BYGNINGSBESKRIVELSE	29
6.1	Byggets klimaanlegg.....	30
6.2	Værforhold i Mandal.....	33
6.3	Grunnforhold på stedet til bygningen	33
7	SIMULERING AV BYGNINGEN I ENERGYPLUS	35
7.1	Inndata for simulering i EnergyPlus	39
7.1.1	Temperaturkrav	39
7.1.2	Varmekilder.....	39
7.1.3	Luft	39
7.1.4	Temperatur i grunn.....	39
7.2	Avvik i simulering	40
7.2.1	Byggets utforming.....	40
8	RESULTATER.....	42
8.1	Behovsimulering	42
8.1.1	Solavskjerming.....	43
8.1.2	Diskusjon energibehov	44
8.2	Kjølebehov	45
8.3	Sammenlikning med ulike energikilder	46
8.3.1	Direktevirkende elektrisk oppvarming	49
8.3.2	Luft-veske varmepumpe.....	51
8.3.3	Diskusjon luft-veske VP.....	56
8.3.4	Vann-veske varmepumpe	58
8.3.5	Diskusjon vann-veske varmepumpe.....	61
8.3.6	Mindre installert varmepumpeeffekt	65
8.3.7	Solfangersystem	67
8.3.8	Luft-veske varmepumpe og solfanger.....	67
8.3.9	Vann-veske varmepumpe og solfanger	68
8.3.10	Diskusjon solfangersystem i kombinasjon med varmepumpe	70
8.4	Ulikt effektbehov i bygningens soner	71

9	ØKONOMISK BETRAKTNING	73
9.1	Nåverdiberegning.....	74
10	DISKUSJON OG KONKLUSJON	77
11	VIDERE ARBEID	79

Figurliste

Figur 1 - Kyoto-pyramiden for passiv energidesign [5].....	2
Figur 2 - Grafisk fremstilling av kostnadskurven til alternative klimagassreducerende tiltak.....	4
Figur 3 - Skjematisk fremstilling av en varmepumpeprosess	7
Figur 4 - Sammenheng mellom temperaturløft og effektfaktor for ideell og virkelig varmepumpeprosess [19].....	9
Figur 5 - Plassering av komponenter i varmepumpen.....	9
Figur 6 - Metningskurve for ulike arbeidsmedium.....	11
Figur 7 - Skisse over varmgassavriming av fordamper i en varmepumpekrets	14
Figur 8 - Temperaturen til grunnvann som funksjon av dybde under jordskorpe i ulike måneder av året.....	15
Figur 9 - Prinsipp for varmeuttak av energibrønn	16
Figur 10 - Varmepumpeanlegg med energibrønn for Bravidabygget i Fredrikstad	16
Figur 11 - Solfangere på Bravidabygget er montert på sørsiden av veggen	17
Figur 12 - Månedlig energibruk til romoppvarming og tappevann til en lavenergi bolig (blokkleilighet) i Oslo. Total månedlig solinnstråling for samme sted er også vist.....	19
Figur 13 - Prinsipiell skisse av hovedkomponentene i et solfangersystem	20
Figur 14 - Kurver for typiske virkningsgrader for ulike plane solfangere. Viser også typiske temperaturnivå som er typisk for ulike bruksområder.	21
Figur 15 – Prinsipiell oppbygging av en plan solfanger.....	21
Figur 16 - Snitt gjennom en vakuumrørsolfanger med "direkte gjennomstrømning"	22
Figur 17 - Strålingsassymmetri. Antall misfornøyde som funksjon av grad strålingsassymmetri fra varmt tak og kaldt vindu.....	24
Figur 18 - Skisse av KlimaTak i himling med og uten montert takvarme	25
Figur 19 - Takvarmepanelet skal være enkelt å kople til, være fleksibelt og ha en enkel konstruksjon	25
Figur 20 - Takvarmepaneller montert i himling kan gjøres estetisk og lite synlig.....	25
Figur 21 - Viktige begreper av byggets energibehov	27
Figur 22 - Illustrasjon av ferdig bygg på rett lokasjon (foto: www.havutsikt.no).....	29
Figur 23 - Nord på bygget (foto: www.havutsikt.no).....	29

Figur 24 - Skisse for plassering av KlimaTak og takvarme (tegning av Odd Drage – februar 2012)	31
Figur 25 - KlimaTakets prinsipp og virkemåte	31
Figur 26 - KlimaTak monteres integrert i himling	32
Figur 27 - Prinsippskisse av ventilasjonssystemet til bygningen	32
Figur 28 - Månedsmidlere utetemperatur for Mandal og Oslo	33
Figur 29 - Berggrunnskart over Mandal, hentet fra NGU	34
Figur 30 - Simuleringsmodellen ble bygget slavisk ut i fra plantegningene til Havutsikt.	35
Figur 31 - Utsnitt fra plantegning (venstre) og simuleringsmodell (høyre) av plan 2	36
Figur 32 - Etasjene ble bygget hver for seg ut i fra plantegningene. Etterpå ble det satt sammen til et bygg	36
Figur 33 - Byggets ulike termiske soner sett fra havet	37
Figur 34 - Byggets termiske soner sett fra land	37
Figur 35 - Sammenlikning av energibehovet til Havutsikt med alle rom klimatisert (brede søyler) og kun oppholdsrom klimatisert (smale søyler)	43
Figur 36 - Sammenlikning av energibehovet til Havutsikt uten solavskjerming (brede søyler) og med solavskjerming med styringssystem (smale søyler)	44
Figur 37 - Temperaturforløp med og uten ekstra luftmengder i uke 29 (16.-22. juli)	46
Figur 38 - Totalt energibruk med elektrisitet som energikilde	48
Figur 39 - Varighetsdiagram for total energibruk til bygget med direktevirkende elektrisitet som energikilde. Rødt indikerer energien fra elektrisitet brukt til oppvarming, mens blått indikerer energi brukt til EL-spesifikt utstyr	48
Figur 40 - Energibruk til oppvarming av takvarme og ventilasjonsluft med elektrisitet som energikilde	49
Figur 41 - Varighetsdiagram for oppvarming med elektrisitet som energikilde	50
Figur 42 - Sammenlikning av energibehov og energibruk	51
Figur 43 - Energibruk til oppvarming med luft-veske varmepumpe og elektrisitet til spisslast	52
Figur 44 - Varighetsdiagram for luft-veske varmepumpe med nattsinking av innetemperatur. Installert nominell effekt 57,41 kW, brukstid 1203 timer	52
Figur 45 - COP ved varierende levert varme fra varmepumpa	53
Figur 46 - COP ved varierende utetemperatur	53
Figur 47 - Energibruk til oppvarming med luft-veske varmepumpe og konstant innetemperatur over døgnet	54
Figur 48 - Varighetsdiagram for luft-veske varmepumpe uten nattsinking av innetemperatur. Installert nominell effekt 57,41 kW, brukstid 1775 timer	55
Figur 49 - COP ved varierende levert varmeeffekt fra varmepumpa	56
Figur 50 - COP ved varierende utetemperatur	56

Figur 51 - Sammenlikning av energibruken til oppvarmingssystem med luft-veske varmepumpe med og uten nattsinking av innetemperatur	57
Figur 52 - Forskjell i dynamikken til oppvarmingssystemet med og uten nattsinking av innetemperatur morgenen 9. januar	58
Figur 53 - Energibruk til oppvarming med vann-veske varmepumpe og direktevirkende elektrisitet til spisslast med nattsinking av innetemperatur	59
Figur 54 - Varighetsdiagram for vann-veske varmepumpe med nattsinking av innetemperatur. Installert nominell effekt 50,8 kW, brukstid 1276 timer	60
Figur 55 - Energibruk til oppvarming med vann-veske varmepumpe og direktevirkende elektrisitet til spisslast med konstant innetemperatur	61
Figur 56 - Varighetsdiagram for vann-veske varmepumpe med konstant innetemperatur. Installert nominell effekt 50,8 kW, brukstid 1927 timer	61
Figur 57 - Sammenlikning av energibruken til oppvarmingssystem vann-veske varmepumpe med nattsinking av innetemperatur og med konstant innetemperatur	62
Figur 58 - Sammenlikning av COP for luft-veske varmepumpe og vann-veske varmepumpe ved varierende utetemperatur og nattsinking av innetemperatur i bygningen.....	63
Figur 59 - Sammenlikning av COP for luft-veske varmepumpe og vann-veske varmepumpe ved varierende utetemperatur og konstant innetemperatur i bygningen.	63
Figur 60 - Sammenlikning av COP for luft-veske varmepumpe og vann-veske varmepumpe ved varierende levert varmeeffekt fra varmepumpa og nattsinking av innetemperatur i bygningen. ..	64
Figur 61 - Sammenlikning av COP for luft-veske varmepumpe og vann-veske varmepumpe ved varierende levert varmeeffekt fra varmepumpa og konstant innetemperatur i bygningen.	64
Figur 62 - Varighetsdiagram for solfangersystem med luft-veske varmepumpe	68
Figur 63 - Nyttiggjort energi fra solfangersystemet i kombinasjon med luft-veske varmepumpe og direktevirkende elektrisitet som spisslast	68
Figur 64 - Varighetsdiagram for solfangersystem med vann-veske varmepumpe	69
Figur 65 – Nyttiggjort energi fra solfangersystemet i kombinasjon med vann-veske varmepumpe og direktevirkende elektrisitet som spisslast	69
Figur 66 - Sammenlikning av nyttiggjort energi fra solfanger med luft-veske og vann-veske varmepumpe viser at nyttiggjort energi er tilnærmet likt som for de to systemene	70
Figur 67 - Energi fra solfangersystemet som blir nyttiggjort til bygningsoppvarming, og energi som ikke blir nyttiggjort	71
Figur 68 - Kostnadsfordeling over kalkulasjonsperioden for luft-veske varmepumpesystem med reinvestering av varmepumpeanlegget etter 20 år	74
Figur 69 - Nåverdi med varierende årlig økning av energipris fra 0 % - 7 %	76

Tabelliste

Tabell 1 - Oversikt over noen aktuelle arbeidsmedium.....	11
Tabell 2 - Merkestnad for varmepumper med nødvendig utstyr. Prisen er oppgitt i kroner avrundet til nærmeste tusen.....	18
Tabell 3 - Eksempel på hvordan COP fra vann-vann varmepumpe varierer med distribusjonssystemets tur- / returtemperatur [37].....	23
Tabell 4 - Liste over termiske soner i bygningsmodellen	38
Tabell 5 - Tabell over energibehov for ulike simuleringer.....	45
Tabell 6 - Sammenlikning av luft-veske og vann-veske varmepumpe	65
Tabell 7 - Sammenlikning av resultater for luft-veske varmepumpe og vann-veske varmepumpe mellom tidligere simuleringer og med varmepumper med mindre installert maksimaleffekt	66
Tabell 8 - Nyttig energi levert fra solfanger montert i ulike himmelretninger.....	67
Tabell 9 - Maksimalt effektbehov for de ulike sonene i 2. etasje.....	72
Tabell 10 - Oversikt over investeringskostnad og årlig spart energi i forhold til referansesystem	73
Tabell 11 - Grunnlag for nåverdiberegningene	75

Vedlegg

Vedlegg 1 - Kostnad for energibrønn fra kommunikasjon ved telefon og e-post med Per Stykket	
Vedlegg 2 – Klimasone D	
Vedlegg 3 – Kart fra NGU over grunnforhold på byggested i Mandal	
Vedlegg 4 – Plantegninger datert 30.12.2011	
Vedlegg 5 – SIMIEN-rapport	
Vedlegg 6 – Skisse av fasader og snitt til Havutsikt	
Vedlegg 7 – Skisse av montering av KlimaTak og takvarme	
Vedlegg 8 – Utkast på engelsk "Draft paper" som besvarelse på oppgave 5 i oppgaveteksten	

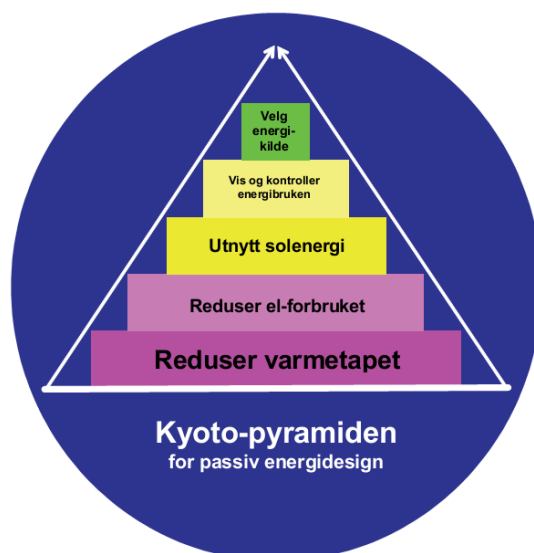
1 Introduksjon

Bygningsmassen står for 40 % av energibruken, 40 % av klimapåvirkningen og 40 % av materialbruken i Norge [1]. Globalt sett har bygninger en andel på 30 % av verdens energiforbruk og står for 21 % av klimagass-utslippene. Energibruken i norske husholdninger og næringsbygg flater ut og viser en synkende tendens. Enovas byggstatistikk viser imidlertid at kategorien nye forretningsbygg stadig bruker mer energi, hovedsakelig basert på elektrisitet og olje [2]. Lavenergiutvalget overleverte i juni 2009 en rapport til olje- og energiministeren, der utvalget foreslår en halvering av energibruken i bygg innen 2040. I følge modeller SINTEF Byggforsk arbeider med, kan føringer for trinnvis nedtrapping av energibehovet i ny og eksisterende bebyggelse redusere energibehovet i bygningsmassen med 50-60 % innen 2040 [2].

Klimameldingen [3] og Klimaforliket [4] i Stortinget legger grunnlaget for en opptrapping av arbeidet med å redusere klimagassutslippene i Norge. Målet med Klimaforliket er at Norge skal kutte de globale utslippene av klimagasser tilsvarende 30 % av Norges utslipp i 1990 innen år 2020. Disse ambisiøse nasjonale klimamålene vil bety at også bolig- og byggsektoren må bidra for å nå disse målene. Stortinget har som mål å redusere klimagassutslippene fra sluttbrukerne av energi i boliger og bygg. Dette innebærer blant annet en endring i valg av energikilder til boligoppvarming, fra direktevirkende elektrisitet og fossile brenslere til miljøvennlige alternativer som ulike typer fornybar energi.

Ved prosjektering av lavenergi boliger og passivhus bør man følge en strategi som innebærer at man først reduserer behovet for energi mest mulig, og deretter sørger for at det resterende energibehovet kan dekkes opp av fornybar energi. Denne strategien er illustrert i Kyoto-pyramiden [5] som er vist i Figur 1. Varmetapet blir redusert gjennom balansert ventilasjon, god isolasjon av bygget, bedre vinduer og ved å redusere luftlekkasjer. Strømførbuket reduseres ved blant annet å velge andre energikilder en direktevirkende strøm til oppvarming, benytte effektivt utstyr som bruker lite energi og automatisk styring av lys, ventilasjon og lignende. Solenergi kan utnyttes ved å ha flest vinduer mot solrik orientering, solfanger og solcellepanel. SD¹-anlegg, bevegelsessensorer og lignende kan benyttes til å styre energibruken etter behov, og til slutt velges en energikilde og oppvarmingsløsning som er tilpasset energibehovet til bygningen. Forskrifter, veiledning og støtte fra Enova er eksempler på ulike virkemidler som blir brukt for å fremme disse tiltak i nybygg og rehabilitering av eksisterende bygg.

¹ SD er en forkortelse for sentral driftskontroll



Figur 1 - Kyoto-pyramiden for passiv energidesign [5]

1.1 Forskrifter for å fremme energieffektivisering

Erfaring viser at miljøtiltak som ikke betaler seg gjennom innsparte driftskostnader på kortere tid enn tre til fem år, vanligvis ikke blir gjennomført [2]. Det har derfor blitt besluttet at staten skal vurdere om det skal stilles krav til gjennomføring i lov og forskrift, eller om det skal innføres økonomiske incentiver når samfunnshensyn tilsier det. Byggteknisk forskrift TEK10 er et eksempel på krav staten stiller til nybygg. TEK10 er et viktig ledd fra Stortinget i veien på å realisere de mål som er gitt i Klimameldingen. I Klimameldingen er det besluttet en utfasing av oljekjeler, og med TEK10 som styrende regelverk er det nå innført forbud mot å installere nye oljekjeler. Strengere krav til bygningsisolering for å minimere energibruk til oppvarming i bygget er også foretatt, og gjennom Klimaforliket er det også bestemt at passivhusstandarden skal vurderes og innføres som krav for alle nybygg innen 2020 [2]. Det stilles dessuten krav i TEK10 til at deler av energien levert til bygget skal komme fra fornybare energikilder.

1.2 Enovas støtte til energieffektivisering

Enova ble etablert av Stortinget i 2001 og eies av Olje- og energidepartementet [6]. Enova ble etablert for å være en drivkraft i omlegging av energibruk og energiproduksjon i Norge, og har som mål å bidra til varige markedsendringer gjennom sine tilskudd. Finansieringen til Enova skjer via tildelte midler fra Energifondet, som igjen finansieres blant annet gjennom et kostnadspåslag på 1 øre per kWh på strømregningen.

Det ble besluttet i Klimameldingen å gjøre en satsing på energieffektive bygg gjennom Enova, der en økning i Energifondet skal gå til å styrke Enovas program for bygg, bolig og anlegg for å gi større muligheter til å utvikle og ta i bruk nye effektive byggemetoder og materialer [3].

Alle partene ved Klimaforliket er enige om at det skal være gode støtteordninger gjennom blant annet Enova og av denne grunn gir Enova nå økonomisk investeringsstøtte til både næring og

private som ønsker å bygge eller rehabilitere bygg. Støtte gis blant annet til bygg som implementerer ny teknologi, eller som fremmer energieffektive løsninger som går ut over dagens minimumskrav.

Bygningen som denne rapporten omhandler har fått økonomisk støtte av Enova både for gjennomføring av ekstra tiltak som skal gi energikutt og for implementering av ny teknologi.

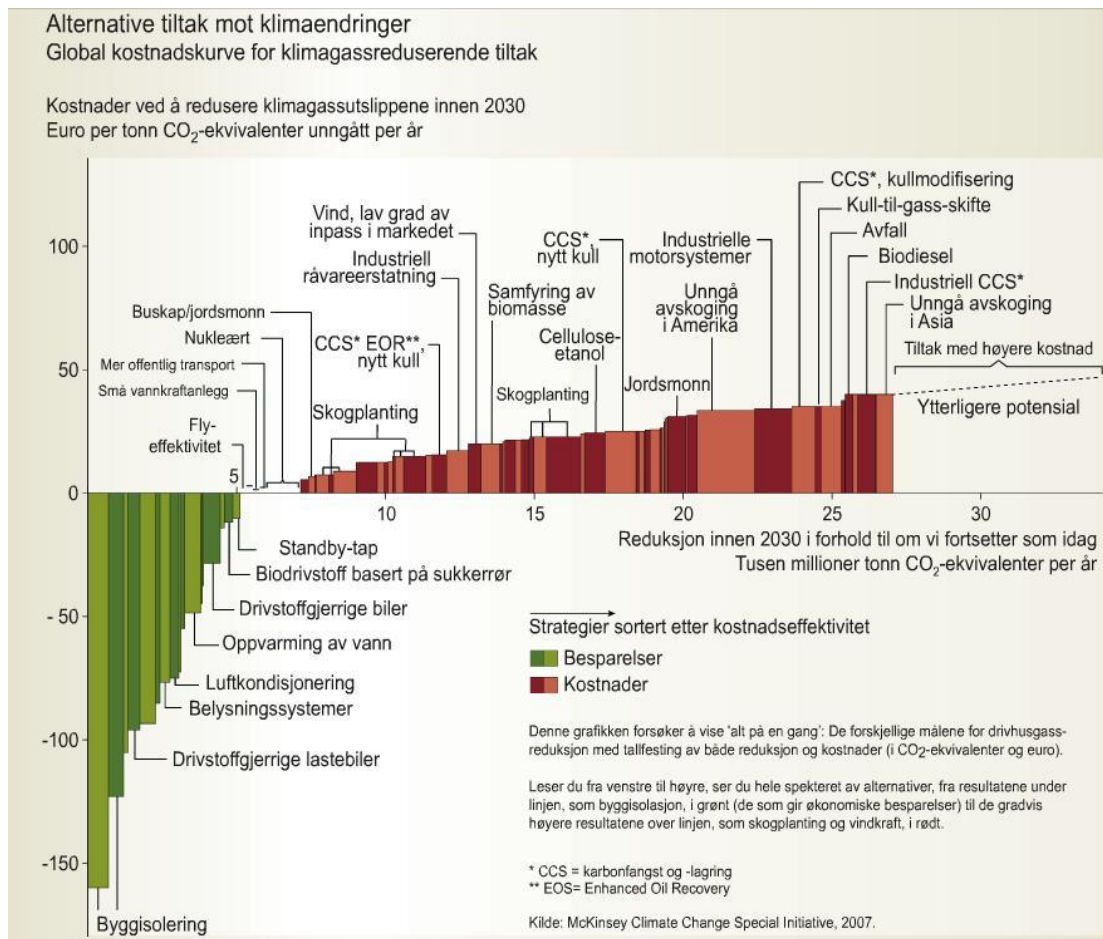
1.3 Energimerkeordningen

Forskrift om energimerking av bygninger og energivurdering av tekniske anlegg trådte i kraft 1. januar 2010 [7]. Energimerkeordningen har som formål å stimulere til økt oppmerksomhet om bygningers energitilstand og mulighetene for å redusere energibruken i bygninger. Energimerkeordningen skal gjøre det lettere å sammenlikne ulike bygg med hensyn til energibruk. Ordningen baserer seg av den grunn på standardverdier for ulike brukervariable input, som for eksempel elektriske installasjoner, elektrisitet til belysning og lignende. Dette gjør at ulike bygg kan sammenliknes uten å ta hensyn til de ulike brukere bygget har, med tanke på forbruksmønster og brukstid.

Energiytelsen til en bygning skal oppgis som den totale energibruken til bygningen ved standardisert bruk, og skal inkludere oppvarming, kjøling, tappevannsoppvarming, belysning og andre energiposter. Det skal også tas hensyn til fornybar energiforsyning i form av varmepumper, solfangere og andre, og energiytelsen skal angis i form av en eller flere numeriske indikatorer.

Energimerking er obligatorisk for nybygg og for alle som skal selge eller leie ut boliger eller yrkesbygg. Yrkesbygg over 1 000 m² skal alltid ha gyldig energiattest.

Konsulentselskapet McKinsey gjorde i 2007 en omfattende analyse over hvilke tiltak som globalt hadde mest kostnadsbesparelser for å redusere klimagassutslipp innen år 2030 [8]. Resultatet i deres rapport var at det nest mest kostnadseffektive tiltaket som kan gjøres er bygningsisolering som vist i Figur 2, og er et av de viktigst tiltakene i å få ned energibruken til bygninger.



Figur 2 - Grafisk fremstilling av kostnadskurven til alternative klimagassreducerende tiltak

1.4 Fornybare energikilder

En fornybar energiressurs defineres på Fornybar.no [9] slik:

"Fornybar energiressurs. Energiressurs som inngår i jordas naturlige kretsløp og dermed kontinuerlig "fornyes". Dette er kretsløp med svært kort omløpstid i forhold til tiden det tar å danne olje, kull og gass. I Norge er vannkraft den viktigste fornybare energiressursen."

Det er mange ulike fornybare energikilder tilgjengelige i Norge, og det vil her nevnes fire som er vanlige i Norge.

1.4.1 Vindkraft

Vindkraft er en fornybar energikilde menneskene har brukt til ulike formål siden den førindustrielle tid [10], blant annet til pumping av vann og oppmaling av korn, der vindmøllene har fått sitt navn fra. Vindkraftindustrien slik vi kjenner den i dag har sitt opphav fra 1970-tallet, da oljekrisen førte til en økt interesse for og fokus på alternative energikilder.

Det finnes i dag vindkraft i 80 land i verden som til sammen har installert nesten 240 GW kapasitet. Det er en stor vekst av vindkraft i verden, og den samlede kapasiteten i verden forventes å doble seg hvert 3-4 år og nærme seg 1 000 GW i år 2020 [11]. Totalt ble det i år 2010 investert

50 milliarder Euro i vindkraft på verdensbasis. Norge vil på slutten av 2011 ha en installert ytelse på nesten 525 MW som vil levere rundt 1,2-1,3 TWh/år. Dette tilsvarer rundt 1 % av elektrisitetsforsyningen i Norge [12].

De siste årene har vindmøller plassert til havs fått økende interesse. Et stykke ute på havet er det mer vind og møllene kan lages fysisk mye større siden de her kan stå utenfor synsvidde fra land. På oppdrag fra Enova har SWECO Grøner i samarbeid med ECON og Kjeller Vindteknikk kartlagt potensialet for havenergi i det norske kraftsystemet. Studien omfattet blant annet en kartlegging av ressurser og teknologi der det fysiske potensialet for offshore vindkraft i Norge er estimert til ca. 14 000 TWh/år [13]. Kun ett vindkraftverk til havs er gitt konsesjon per januar 2011, resterende er kun konsesjon for pilotprosjekter [14]. Av pilotprosjektene er flere gitt konsesjon, men kun en konsesjon er blitt utbygget. Dette er HyWind, som er en flytende vindturbin på 2,3 MW utenfor Rogaland.

1.4.2 Solenergi

Energiinnstrålingen fra solen til jordkloden hvert år er flere tusen ganger større¹ enn den energimengden som menneskene i verden bruker, og mange ganger større enn jordens totale energireserver [15]. På grunn av Norges beliggenhet foregår det i dag ikke elektrisitetsproduksjon fra solcellepaneler i stor skala. Dette er fordi solens energiinnstråling er svært lav i vinterhalvåret, og i enkelte deler av landet totalt fraværende. Den årlige solinnstrålingen i Norge varierer fra ca. 700 kWh/m² i nord til 1 100 kWh/m² i sør. Dette svarer til 30-50 % av innstrålingen ved ekvator. På grunn av at variasjonene over døgnet og året er så store, fra 8,5 kWh/m²døgn på en skyfri sommerdag til 0,02 kWh/m²døgn en overskyet vinterdag, ligger utfordringen i å utnytte energien på en rasjonell måte. Energien i solinnstrålingen mot Norges landareal i løpet av et år er allikevel 1 500 ganger større enn energimengden vi bruker [15]. Sola tilfører den norske bygningsmassen 3-4 TWh nyttig varme per år i form av passiv solvarme, som representerer 10-15 % av oppvarmingsbehovet.

Energien fra sola kan utnyttes på mange måter, men som regel blir solenergien omdannet til varme eller elektrisk energi [15]. I Norge er solvarme konkurransedyktig med elektrisitet til vann- og boligoppvarming, mens strøm fra solceller fortsatt blir mer kostbart enn nettstrøm. Ofte benyttes solcellepanel derimot på steder der tilkoping til det elektriske nettet er vanskelig, eller på bygninger som er i lite bruk som for eksempel fritidshytter.

1.4.3 Varmepumpe

Varmepumper bygger på et prinsipp som gjør det mulig å transportere varme fra et lavere til et høyere temperaturnivå. I luft, jord, sjø, grunnvann og fjell finnes det energi i form av varme. Varmepumper fungerer som et omvendt kjøleskap, og utnytter elektrisk energi til å hente ut varme ved lav temperatur i en kilde og levere denne energien ved høyere temperatur. En mer inngående forklaring av varmepumpeteknologien er forklart i kapittel 2.

¹ IEA estimerer at effekten til solinnstrålingen som treffer jordens overflate er over 120 000 TW. Med 2006 som referanse tilsvarer dette over året ca. 7700 ganger det totale globale energiforbruket.

1.4.4 Bioenergi

Bioenergi er et samlebegrep for en energimessig utnyttelse av biomasse. Det vanligste bruksområdet for bioenergi er produksjon av varme, men det er også mulig å produsere elektrisk kraft, flytende biodrivstoff, biogass og hydrogen fra biomasse. Bioenergi er i dag den viktigste energikilden for minst halvparten av verdens befolkning [16].

Både i Norge og globalt er vanlig vedfyring den mest brukte formen for bioenergi, men bruken av bioenergi i mer foredlede former, som biopellets, biogass og biodrivstoff til kjøretøy øker i omfang. Bioenergi avgir CO₂ når den brennes, men det regnes allikevel som nøytralt i klimasammenheng fordi planter gjennom fotosyntesen tar opp like mye CO₂ som de avgir ved forbrenning [17]. Den totale årlige tilveksten av biomasse i Norge er på rundt 425 TWh. Det årlige uttaket av bioenergi i Norge ligger på ca. 16-17 TWh, noe som er ca. 6 % av det årlige energibehovet i Norge. Tilgangen på bioenergi er stor i Norge, og tilveksten i norske skoger er langt større enn avvirkningen [17].

1.5 Målsetting med oppgaven

Formålet med denne oppgaven er å avdekke energibehovet til et bestemt kontorbygg som skal bygges etter passivhusstandarden. Det er ønskelig å få kunnskap om hvilket energiforsynings-system som er optimalt for dette bygget, og det er varmpumpe med uteluft og energibrønn som er de aktuelle energikildene. Det er også ønskelig å se på hvordan et solfangersystem vil bli utnyttet i kombinasjon med disse varmpumpesystemene. Følgende mål er satt for oppgaven:

- 1) Gjøre litteratursøk på aktuelle varmpumpe- og solfangersystemer
- 2) Bygge opp en modell av kontorbygget i simuleringsprogrammet med oppvarmingssystem
- 3) Simulere modellen av kontorbygget med de aktuelle oppvarmingssystemene
- 4) Analysere resultatene fra de ulike simuleringene

1.6 Begrensninger av oppgaven

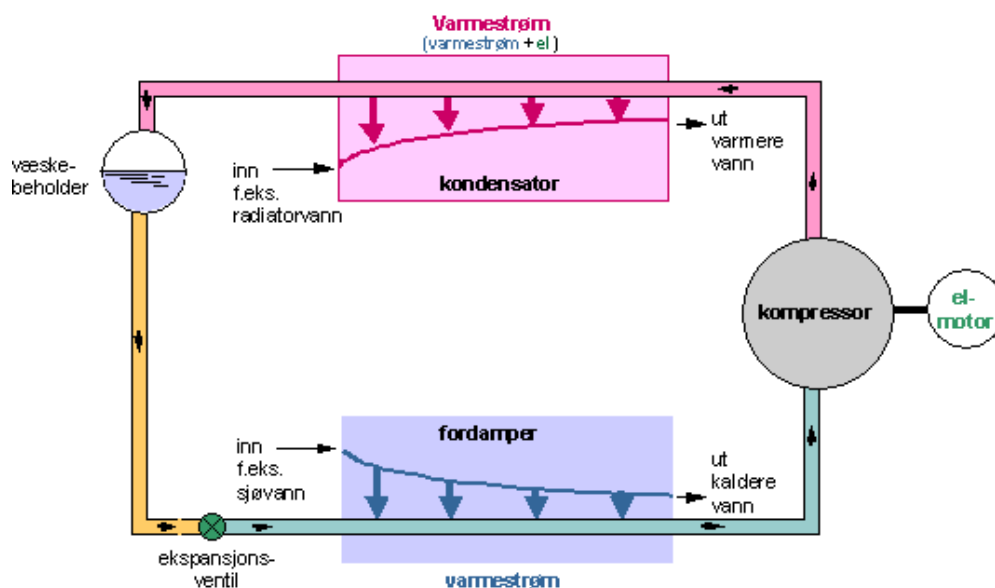
For å begrense omfanget av oppgaven ble det bestemt at det kun skulle benyttes standardverdier for belastning av bygningen. Til dette ble tall fra TEK10 og Prosjektrapport 42 benyttet. Siden det var stor usikkerhet rundt det lille behovet av varmt tappevann, ble bygningen simulert uten noe slikt behov.

2 Varmepumpeteknologi

Det er varmepumpe som skal benyttes som den fornybare energikilden i simuleringene i denne rapporten. Derfor vil teknologien forklares litt nærmere i dette kapittelet, i tillegg til det som tidligere er skrevet i kapittel 1.4.3.

Varmepumpeteknologien fremstår som et viktig bidrag til å redusere klimautslippene fremover, og inngår i EUs fornybar-direktiv med krav om $COP > 2,8$ [18]. Siden TEK10 stiller krav til at 40 eller 60 % av bygningens oppvarmingsbehov skal komme fra fornybar energikilde, har det blitt økt fokus rundt varmepumper som energikilde til bygg. Kravene stilles avhengig av bygningens størrelse, der 40 % er kravet for bygg under 500 m^2 og 60 % gjelder for bygg over 500 m^2 . Årlig selges det 80-90 tusen varmepumpeanlegg i Norge [18].

En varmepumpe er en innretning som har til oppgave å hente energi fra lavt temperaturnivå og bringe denne opp til et høyere temperaturnivå ved bruk av energi, som regel fra elektrisitet. Den energi som hentes ved lav temperatur regnes som "gratis" fornybar energi, og denne energien hentes typisk fra uteluft, sjøvann, grunnvann, jord o.l. Dette gjøres mulig ved å sirkulere et fluid, videre omtalt som *arbeidsmedium* i en lukket røkrrets som inneholder fire hovedkomponenter: kompressor, kondensator, ekspansjonsventil og fordamer. Dette settes i et system som vist i Figur 3. Ekspansjonsventilen struper trykket til arbeidsmediet ned til lavt trykk, som gjør at arbeidsmediet begynner å fordampe/koke ved lavt trykk og temperatur. Ved utgangen av fordameren er alt arbeidsmedium fordampet og denne gassen blir sugd opp av kompressoren som komprimerer gassen til et høyere trykk. Med høyere trykk på gassen følger også høyere temperatur, og den nå overhete gassen avkjøles i en kondensator. Her kondenserer gassen til den ved utgangen helt eller delvis har nådd veskefase. Deretter strupes trykket ned ved en ekspansjonsventil, og med det lave trykket følger også lav temperatur på fluidet som nå ofte befinner seg i en veske-/gassfase. Deretter varmes fluidet opp på ny i fordameren.



Figur 3 - Skjematisk fremstilling av en varmepumpeprosess

Effektfaktoren til varmepumpen, eller *Coefficient of performance* (COP), angir forholdet mellom tilført energi som elektrisitet og den energi varmepumpa leverer fra kondensator ved en gitt driftstilstand. COP ønskes så høy som mulig, da dette betyr at du for en gitt varmemengde trenger å tilføre mindre strøm til kompressor, og dermed henter mer gratis energi fra varmekilden. Det er flere forhold som fører til lavere COP enn ved en ideell teoretisk prosess, men det viktigste forholdet er hvilket temperaturløft varmepumpa må jobbe mellom, altså temperatur i fordampere og kondensator. Formel for COP er gitt i formel 1 og 2 med følgende notasjoner: k - kompressor, f - fordampere, c - carnot, \dot{Q} - varmestrom avgitt fra kondensator, W - tilført effekt. Carnotvirkningsgraden til en varmepumpe η_c , angir godheten til varmepumpa sammenlignet med en ideell prosess og er definert som forholdet mellom COP for ideell og virkelig prosess. Denne ligger typisk mellom 0,3 og 0,7 avhengig av arbeidsmedium, temperaturdifferanser i varmevekslere, virkningsgrad for kompressor/motor og lignende [19].

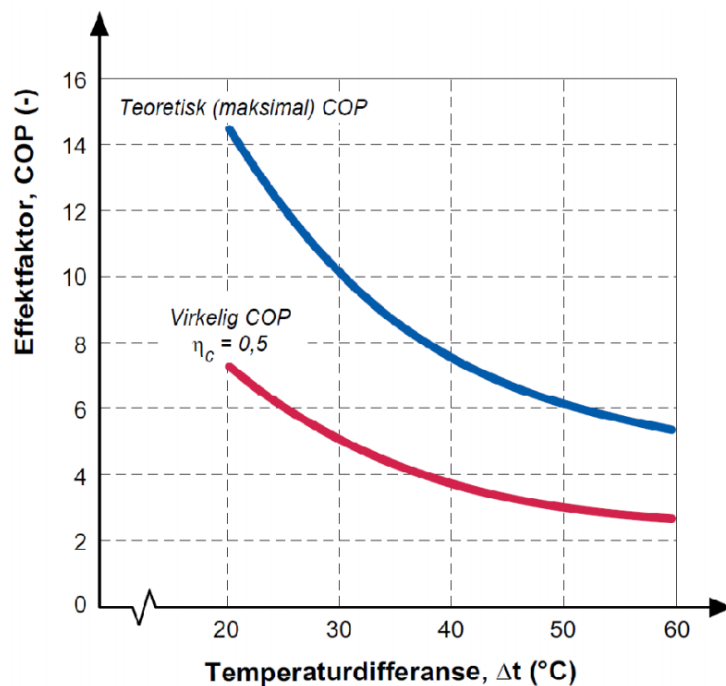
$$\varepsilon_c = COP_c = \frac{T_k}{T_k - T_f} \quad (1)$$

$$COP = \varepsilon_c \cdot \eta_c = \frac{\dot{Q}}{W} \quad (2)$$

COP er en momentanverdi som angir effektfaktor ved en gitt tilstand. For bruk til bygningsoppvarming vil det derimot være store variasjoner i belastning og temperaturdifferanse over året, og en momentanverdi gir dårlig indikasjon på godheten til varmepumpa. For å bedre kunne vite hvor god en varmepumpe er, blir en derfor nødt til å se på gjennomsnittlig COP over året, en såkalt *Seasonal performings factor*, SPF. SPF vil ta høyde for de gitte temperaturvariasjoner over året for det sted varmepumpa skal brukes, og er definert som i formel 3.

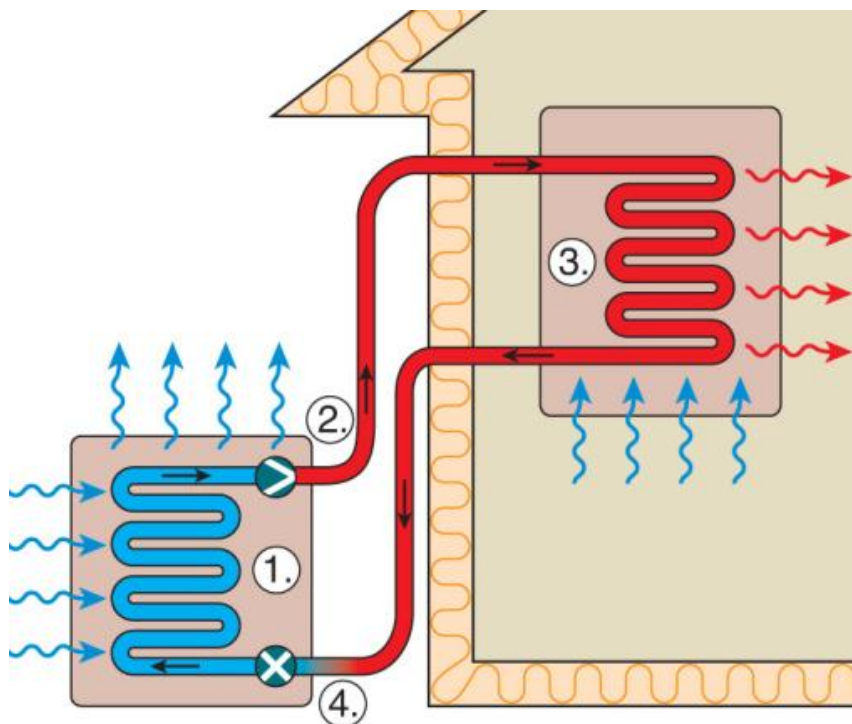
$$SPF = \frac{\text{Levert varme fra varmepumpe}}{\text{Tilført elektrisk energi}} \quad (3)$$

Figur 4 viser sammenhengen mellom COP og temperaturløftet varmepumpa jobber med, ΔT , for en ideell prosess angitt ved blå farge, og en virkelig prosess angitt ved rød farge. Den virkelige prosessen har her en carnotvirkningsgrad på 0,5 som vil si at virkelig COP er halvparten av den maksimale teoretisk oppnåelige verdien.



Figur 4 - Sammenheng mellom temperaturløft og effektfaktor for ideell og virkelig varmepumpeprosess [19]

En varmepumpe for praktisk bruk er i virkeligheten mye mer kompleks enn denne forenklede fremstillingen med fire komponenter, men prinsippet er det samme. Ved å plassere kondensatoren innendørs og fordampere utendørs som illustrert i Figur 5, er det mulig å varme opp en bygning med en lavtemperatur energikilde som uteluft, jordvarme, sjø eller lignende. Nærmere forklaring av lavtemperatur energikilder blir omtalt senere i kapittel 2.2.



Figur 5 - Plassering av komponenter i varmepumpen

2.1 Arbeidsmedier

1.januar 1989 trådte Montreal-protokollen i kraft, med krav om betydelig nedtrapping av forbruket av enkelte ozon-nedbrytende stoffer. Dette innebar blant annet at KFK^I-stoffer brukt som eller i arbeidsmedium i varmepumper. I Norge ble det fra 1. juli 1991 forbudt å tilvirke, innføre, installere, utføre og omsette kuldeanlegg og varmepumper med KFK som arbeidsmedium. Fra 1995 ble det innført importforbud, men det vil fortsatt være tillatt å benytte KFK til etterfylling av eksisterende anlegg en stund til. Fra 1992 ble HKFK^{II}-mediene innlemmet i Montreal-protokollens reduksjonsplaner, deriblant R22. Frem til 1990 var det hovedsakelig R12 og R22 som ble benyttet som arbeidsmedium i varmepumper [20].

Det vil her bli presentert noen aktuelle arbeidsmedier for bruk i varmepumpeanlegget som bygget denne rapporten omhandler. Nøkkelegenskaper for arbeidsmediene er samlet i Tabell 1, som omtales nærmere i kapitlene 2.1.1 og 2.1.2. Av egenskapene som er oppsummert i Tabell 1, er det ønskelig at arbeidsmediet hverken er giftig eller brennbar. Om dette skulle være tilfelle, vil det gi et fordyret anlegg på grunn av lovpålagt ekstra sikkerhetstiltak knyttet til disse egenskapene. For enkelte bruksområder vil også giftighet og/eller brennbarhet utelukke bruken av dette i et direkte system. Dette vil for eksempel ofte gjelde ved bruk i matindustri der selv små lekkasjer av et giftig medium vil føre til at all mat på et kjølelager må kasseres. GWP er en forkortelse for Global Warming Potential og er et mål på de ulike drivhusgassenes effekt når det gjelder global oppvarming. GWP-verdien for en gass defineres som den akkumulerte påvirkningen på drivhuseffekten fra ett tonn utslipp av gassen sammenlignet med ett tonn utslipp av CO₂. Ved hjelp av GWP-verdiene blir utslippene av klimagasser veid sammen til CO₂-ekvivalenter. Maksimalt utgående vanntemperatur er en viktig faktor som kan være avgjørende ved høye temperaturbehov. Er temperaturbehovet høyere enn den maksimalt utgående vanntemperaturen fra varmepumpa, er det aktuelle arbeidsmediet utelukket hvis behovet skal kunne dekkes utelukkende av varmepumpa. Ved bruk av tilleggsoppvarming fra spisslast satt i seriekopling etter varmepumpa, kan imidlertid temperaturbehovet nåes til tross for dette.

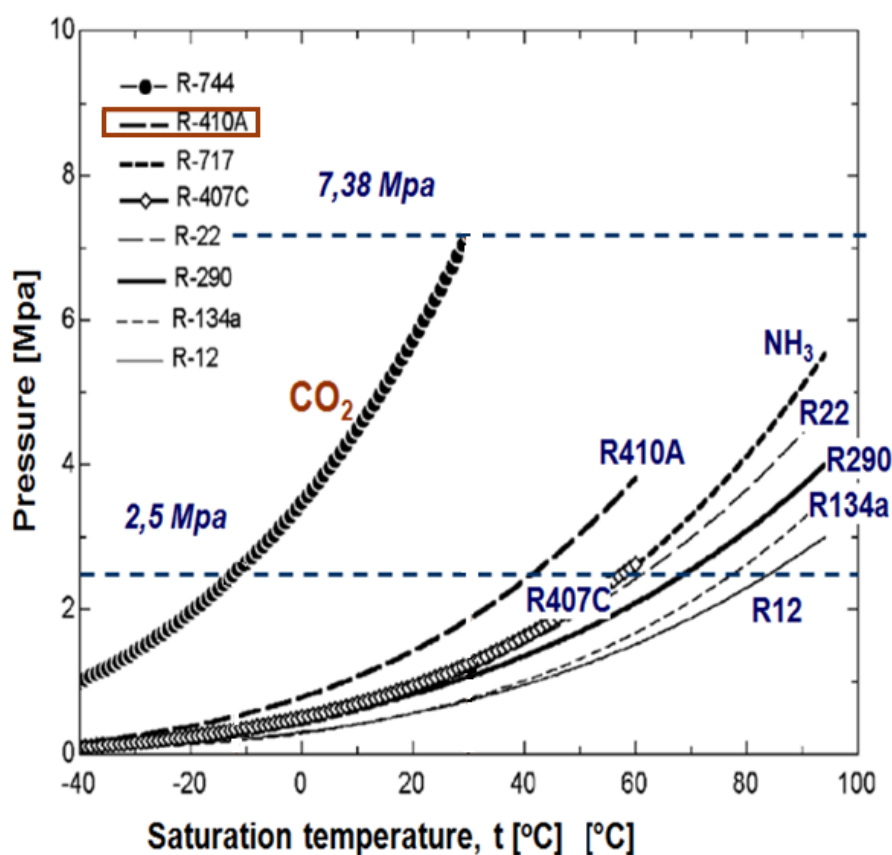
^I KFK er en forkortelse for klorfluorkarbon, som er en fullstendig klor- og fluor-basert halogering av et hydrokarbon. Disse stoffene har vært svært populære som arbeidsmedier i varmepumper på grunn av ingen giftighet og høy stabilitet.

^{II} HKFK er en forkortelse for hydroklorfluorkarbon som er et ufullstendig halogeneret hydrokarbon med klor og fluor

Tabell 1 - Oversikt over noen aktuelle arbeidsmedium

Navn på arbeidsmedium	Formel	Giftig / Brennbar	GWP	Maksimalt utgående vanntemperatur
R134a	CH ₂ F-CF ₃	Nei / Nei	1 300	70 (90 °/40 bar) ¹
R410a	HFK-blanding	Nei / Nei	1 890	50
R290	C ₄ H ₁₀	Nei / Ja	0	62
R477	CO ₂	Nei / Nei	1	95

Metningstrykket til arbeidsmedium er en viktig egenskap som setter begrensninger til maksimalt utgående vanntemperatur ved ulike gitte trykk. 25 bar trykk er den mest vanlige standard som komponenter til varmepumpeanlegg er bygget for, men komponenter for høyere trykk er også tilgjengelige, men da oftere for en høyere pris. I Figur 6 er metningskurven til noen arbeidsmedier angitt, og her er 25 bar tegnet inn som avgrensende trykk ved stiplet horisontal linje. CO₂ skiller seg her ut fra alle andre medier, og dette er grunnen til at varmepumpeanlegg som benytter CO₂ som medium må benytte komponenter som er tilpasset høyere trykk enn 25 bar.



Figur 6 - Metningskurve for ulike arbeidsmedium

¹ Gjelder ved to-trinns anlegg

2.1.1 Syntetiske medier

R134a er et klorfritt medium uten ozonnedbrytende effekt. Det har høy GWP-verdi (GWP = 1 300), og prisen er relativt høy på grunn av denne grunn i kombinasjon med komplisert framstillingsprosess. Mediet har store strupningstap, og anbefales derfor å bruke underkjølingsvarmeveksler. Lav volumetrisk varmeytelse øker kompressorstørrelsen.

R410a er en blanding av to komponenter HFK-125 og HFK-32 med likt blandingsforhold. R410a bidrar ikke til nedbrytning av ozonlaget, og er av denne grunn blitt mye brukt etter at R-22 har blitt faset ut. Mediet har imidlertid en høy GWP-verdi på 1 725, som er av samme størrelse som for R-22. R410a opererer ved høyt trykk [21], og har omtrent 50 % høyere metningstrykk enn R22 [22] og nødvendig kompressorvolum er redusert tilsvarende.

2.1.2 Naturlige medier

R290 (Propan) har meget gode termodynamiske egenskaper, og er relativt lik R22 med hensyn på volumetrisk varmeytelse og energieffektivitet. R290 har imidlertid vesentlig lavere trykkørstemperatur og har meget god blandbarhet med mineralolje og har GWP = 0. Mediet er imidlertid svært brenn- og eksplosjonsfarlig, og har en nedre eksplosjonsgrense og tenntemperatur på henholdsvis 2,1/2,0 volum-% og 470/491 °C. R290 er dessuten tyngre enn luft, og vil av denne grunn lett kunne bygge opp høy konsentrasjon ved en eventuell lekkasje. På større anlegg stilles det omfattende sikkerhetstiltak som for eksempel installasjon av aggregatene i gasstette containere, Ex-sikkert utstyr, aktiv og passiv lufting av maskinrom m.m.

R744 (CO₂) har fått stor oppmerksomhet den siste tiden, og har blitt svært populært i varmepumper for tappevannsberedning i Japan. Det er ugiftig, ubrennbart og har per definisjon GPW = 1. R744 er et høytrykksmedium med kritisk temperatur og trykk på henholdsvis 31,1 °C og 73,8 bar. Det høye trykket gir stor energitetthet og høy volumetrisk varmeytelse, og fører til mulighet for svært små dimensjoner på komponenter i systemet. På grunn av lavt kritisk punkt vil varmepumpen få en transkritisk prosess, der fordampning foregår ved konstant temperatur under kritisk punkt, men varmeavgivelsen skjer i en gasskjøler ved glidende temperatur over det kritiske punktet. Dette gjør mediet lite egnet til systemer som har lave temperaturløft, men svært godt egnet til høye temperaturløft som for eksempel oppvarming av tappevann fra 5-70 °C.

Varmepumper for tappevann med R744 oppnår cirka 20 % høyere effektfaktor enn de mest energieffektive varmepumpene med konvensjonelle arbeidsmedium [23]. Det er imidlertid svært viktig for denne typen varmepumper å være konstruert slik at en oppnår lavest mulig temperatur på vannet inn på gasskjøleren. Effektfaktoren til en slik varmepumpe avtar raskt ved høyere inngående vanntemperatur, siden dette bidrar til høyere temperatur på utgående CO₂ fra gasskjøleren. Viktigheten av dette fremkommer tydelig i en analyse og test av en CO₂-varmepumpe beregnet på svenske forhold som både skulle kunne benyttes til oppvarming av tappevann og vannbårent oppvarmingssystem [24]. Denne varmepumpen hadde høy inngående vanntemperatur ved noen forhold, som gjorde at effektfaktor ble redusert betraktelig i forhold til oppnåelig effektfaktor ved ideelle forhold.

2.2 Varmekilder

Varmepumper kan benytte en rekke ulike kilder til opptak av varme til fordamper. Varmepumpens økonomi er nært knyttet til varmekildens egenskaper, og bør tilfredsstillende flest mulig av kravene under [20]:

- 1) Tilstrekkelig mengde tilgjengelig ved forbruksstedet
- 2) Høyest mulig temperatur over året (gir lavest mulig temperaturløft)
- 3) Stor spesifikk varmekapasitet
- 4) Gode varmeoverføringsegenskaper
- 5) Minst mulig korrosiv og forurenset
- 6) Lave kostnader for tilknytning til/utnyttelse av varmekilden
- 7) Lave energiutgifter til transport av varmekilden gjennom varmepumpen

De to ulike typer varmekilder til varmepumpen som skal simuleres i denne rapporten er uteluft og grunnvarme (energibrønn). Varmepumpeanlegg med sjøvann eller uteluft som varmekilde er de to vanligste typene i Norge [20], men grunnvarme har etter hvert fått en økende betydning.

2.2.1 Uteluft

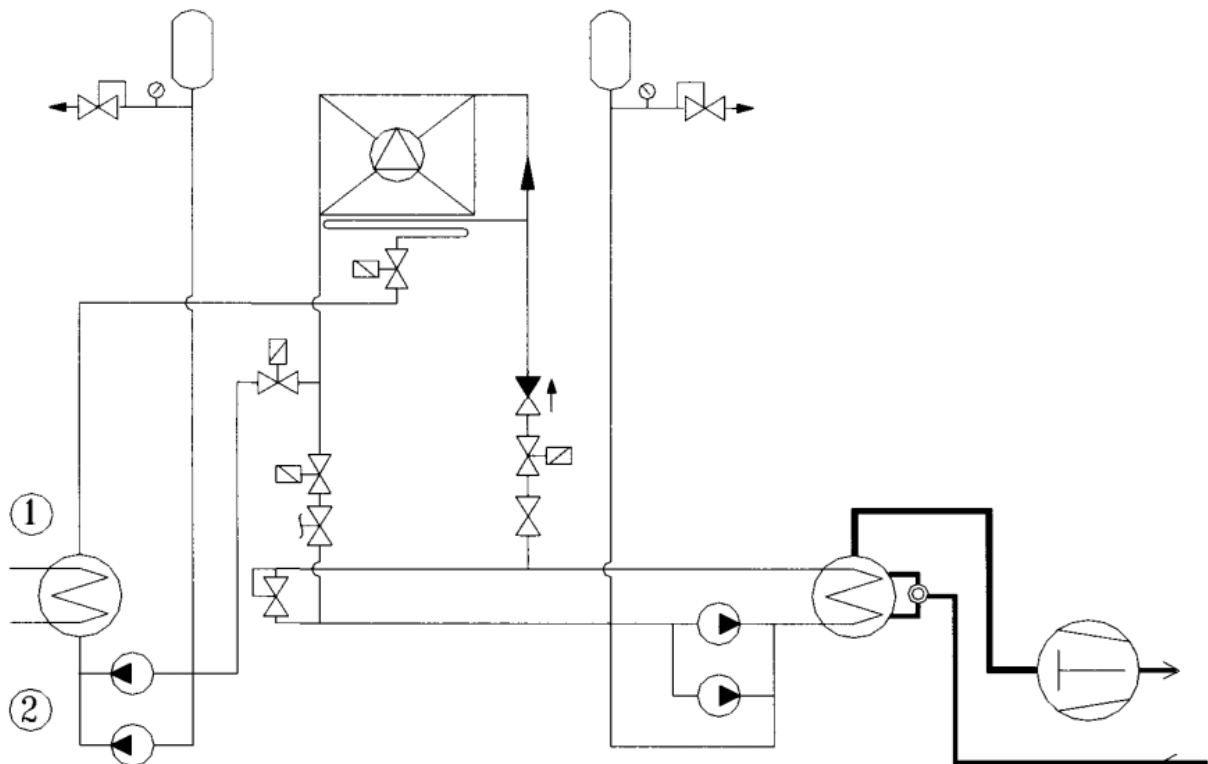
Uteluft er lett tilgjengelig i ubegrensede mengder overalt, og luft er av denne grunn mye benyttet som varmekilde for varmepumper. Når varmepumpa benyttes til bygningsoppvarming har imidlertid uteluft den ulempe at temperaturen på varmekilden og behovet for oppvarming er i motfase. Dette resulterer i at både varmekapasiteten og COP for varmepumpa avtar når det er størst behov for oppvarming. Uteluft egner seg derfor best som varmekilde for områder med høy årsmiddeltemperatur og med liten sesongvariasjon. Luft har lav spesifikk varmekapasitet, som vil gjøre det nødvendig å sirkulere store mengder med luft i varmeveksleren. Dette gjøres ved å installere vifter på fordamperens varmeveksler, noe som krever ekstra effekt fra strøm til viftedrift, som vil bidra til lavere COP siden denne effekten regnes med som tilført effekt for varmepumpa, se Formel 2. Luft har dårlige varmeoverføringsegenskaper. For ikke å få for store flater på varmeveksleren kreves det derfor stor temperaturredifferanse mellom luften og arbeidsmediet. Lavere temperatur på arbeidsmediet i fordamperen fører til lavere COP, se formel 1. Korrosivt og forurenset luft kan være et problem ved kystklima der uteluften fører med seg salter fra sjø og dette må tas hensyn til ved valg av utvendig varmeveksler.

Varmeopptaket fra uteluft kan skje på to ulike måter

- 1) Et direkte system der fordamperen befinner seg utendørs. I disse systemene varmeveksles uteluften med fordampende arbeidsmedium som sirkulerer i et lamell- eller ribberørsbatteri
- 2) Et indirekte system der uteluften først varmeveksles mot et sekundærmedium, som en etylenglykol-blanding eller saltlake, i en tilsvarende varmeveksler som for et direkte system. Sekundærmediet sirkulerer ved hjelp av en sirkulasjonspumpe inne i bygget og varmeveksles der med arbeidsmediet til varmepumpa.

Et direkte system er både termodynamisk og investeringsmessig best, og er derfor nesten enerådende på anlegg av alle størrelser [20].

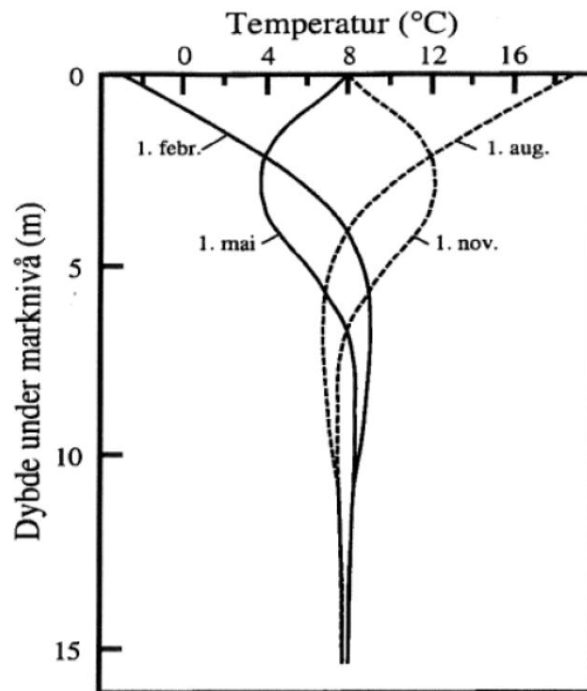
Når overflatetemperaturen på varmeveksleren utendørs blir lavere enn $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ vil en del av vandampinnholdet i uteluften fryse ut på overflaten til varmeveksleren. Rimet som vil bygge seg opp vil ha dårlig varmegjennomgang og dessuten hindre luften å strømme igjennom varmeveksleren. Det vil derfor kreves periodisk avriming av varmeveksleren. Dette kan utføres på forskjellige måter, men varmepumpa som er simulert i denne rapporten har avriming av fordamperen ved varmgass. Varmgassavriming fungerer ved å bringe varm kondensatorgass direkte til fordampere, og slik varme opp fordampere til all rim har smeltet og rent vekk. Dette er en termodynamisk gunstig metode, siden en da benytter varme generert fra varmepumpa til avriming [25]. Varmgassavriming kan utføres på flere ulike måter og en mulig måte er vist i Figur 7. I anlegg med kun én fordampere, må det akkumuleres tilstrekkelig varme i en akkumuleringstank siden varmepumpeprosessen ikke kan opprettholdes under varmgassavrimingen. Her kan det for eksempel benyttes varmtvann fra varmekretsen i bygget, markert i Figur 7 ved punkt 1 for turlledning og punkt 2 for retur fra varmekretsen. Ved avriming varmeveksles denne akkumulerte varmen mot kuldebæreretsen. En slik løsning er energiøkonomisk, siden energien som benyttes er energi produsert av varmepumpa som har en $\text{COP} > 1$.



Figur 7 - Skisse over varmgassavriming av fordampere i en varmepumpekrets

2.2.2 Energibrønn (grunnvarme)

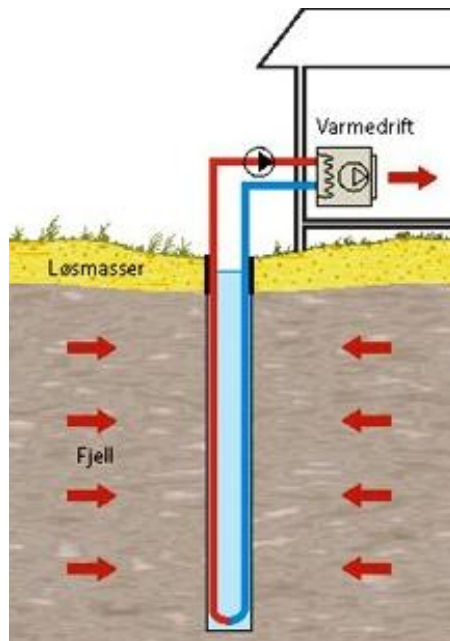
Grunnvarme er temperaturmessig en meget god varmekilde for varmepumper. Temperaturen er stabil fra omtrent 10 m dybde, og varierer mer med utelufttemperaturen jo nærmere jordoverflaten en kommer. I Figur 8 er denne årsvariasjonen i temperatur vist som en funksjon av dybde under jorda [20].



Figur 8 - Temperaturen til grunnvann som funksjon av dybde under jordskorpe i ulike måneder av året

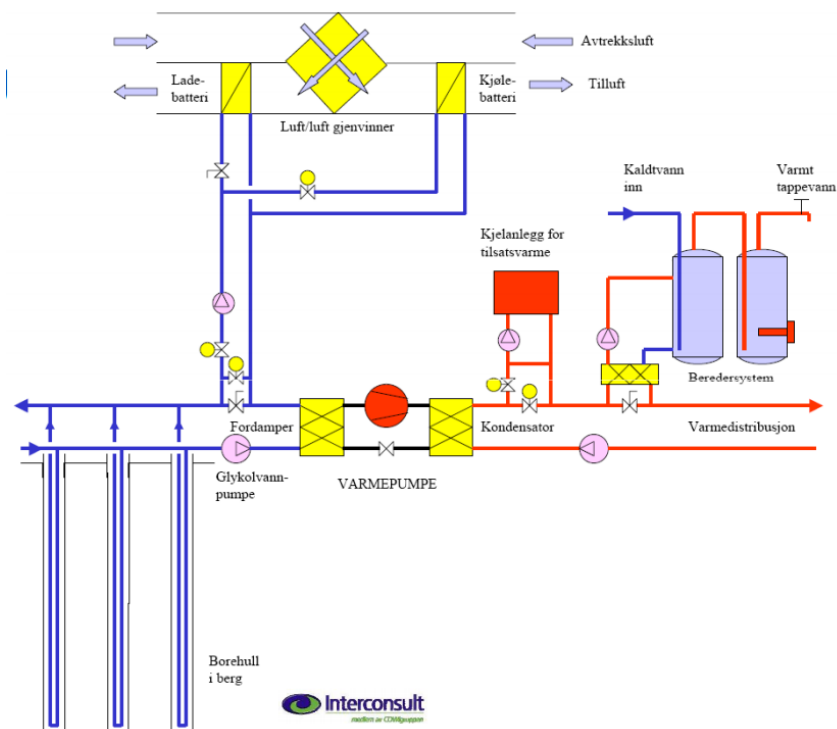
Mulig varmeopptak fra energibrønn vil variere mye fra sted til sted, der grunnvannstilsig, berggrunn, varmeledningsevne og annet har stor innvirkning [20]. Det er derfor svært viktig å kartlegge grunnforekomster, fare for setninger og lignende ved planlegging av større varmepumpesystemer.

Det er ulike måter å lage en energibrønn på, men den mest vanlige metoden [26], og den som er benyttet i denne rapporten benytter indirekte varmeopptak. Ved bruk av indirekte varmeopptak fra brønn sirkulerer sekundærmediet (glykol- eller saltblanding) i en lukket krets mellom fordampere til varmepumpa og borehullet. Sekundærmediet blir kjølt ned i fordampere og sirkulerer ved hjelp av en sirkulasjonspumpe ned i energibrønnen. I energibrønnen blir arbeidsmediet varmet opp av en varmere omgivelsestemperatur, og vil så senere avgi denne varmeenergien i fordampere. Det benyttes plastslanger med god varmeledningsevne som er helsveiset for å hindre lekkasje. En prinsippsskisse for energibrønn er vist i Figur 9. Ved underdimensjonering av energibrønnen blir det hentet ut for mye varmeenergi i forhold til tilsig fra omliggende grunn. Dette vil føre til at temperaturen i energibrønnen vil synke, og varmepumpa må jobbe mot en høyere temperaturdifferanse. Dette vil igjen føre til en dårligere COP, se Formel 1.



Figur 9 - Prinsipp for varmeuttak av energibrønn

Et eksempel på utforming av et varmepumpeanlegg med energibrønn som oppvarmingskilde er Bravidabygget som befinner seg i Fredrikstad [27]. En skisse av anlegget er vist i Figur 10. Bygget har et areal på 6 300 m² og benytter en 250 kW R290 varmepumpe. Anlegget har 20 energibrønner på 200 m hver som benyttes til termisk lager for både varme og kjøling. Bygget har dessuten 300 m² solfangere mot sør som er montert på vegg og tak, vist i Figur 11. Energibruket i bygget er målt til å være på under 100 kWh/m²år og hele kjølebehovet dekkes med frikjøling.



Figur 10 - Varmepumpeanlegg med energibrønn for Bravidabygget i Fredrikstad



Figur 11 - Solfangere på Bravidabygget er montert på sørsiden av veggen

2.3 Levetid

Hvorvidt det vil være økonomisk lønnsomt å installere et varmepumpeanlegg avhenger av flere faktorer. Økonomisk levetid for anlegget er en viktig faktor i lønnsomhetsanalysen, og denne varierer fra anlegg til anlegg. Ifølge Norsk Teknologi regnes økonomisk levetid på ca. 20 år [28] for større anlegg, som er det som vil bli benyttet i denne rapporten. Levetiden på energibrønn er vesentlig lengre og beregnes i denne rapporten til å være 40 år, dobbelt så lenge som levetiden til varmepumpa. For mindre varmepumper for boliger er økonomisk levetid typisk 10-15 år.

2.4 Pris

I rapporten er det gjort simuleringer med to ulike typer varmepumper. Den ene er en luft-veske varmepumpe levert fra SGP [29], den andre varmepumpa er en vann-veske varmepumpe som leveres fra Variant VVS [30]. De kostnader som blir benyttet i den økonomiske analysen er merkostnader, det vil si at kostnader som er felles for de ulike installasjoner og referansesystemet ikke er medberegnet. Kostnader for elektrisk tilkøpling og styringssystem i bygget er eksempler på kostnader som ikke er medberegnet. Siden spisslast fra direktevirkende elektrisitet bør dimensjoneres for å kunne dekke totalt effektbehov for bygget, spares det ikke kostnader for elektrisitetsskjel ved bruk av varmepumpe som grunnlast. Spisslast bør dimensjoneres for totalt effektbehov for å kunne dekke behovet ved eventuell feil eller vedlikehold på varmepumpa.

Luft-veske varmepumpa har en total kostnad på 245 825 kr, som er den kostnaden som vil bli benyttet i denne rapporten. I dette inngår luftkjølt fordampere og komplett røranlegg med montering og nødvendig utstyr.

Vann-veske varmepumpa har en kostnad på 51 500 kr. I tillegg til dette er det nødvendig med en mellomveksler mellom energibrønn og varmepumpa, denne har en kostnad på 15 000 kr.

Kostnad for energibrønn er hentet ved kommunikasjon ved telefon og e-post med Per Stykket fra ABK-klima [31] og e-postens vedlegg ligger som vedlegg 1. Informasjon om grunnforhold, effekt- og energiuttak med mer fra simuleringene ble lagt til grunn for kostnadsoverslag. Det ble gjort beregninger på ulike effektinstallasjoner, og prisene som blir lagt til grunn i denne rapporten er et gjennomsnitt av installasjonene på 40 og 60 kW fra kostnadene fra ABK-klima. Kostnadene for de to ulike varmepumpene med tilhørende nødvendig utstyr er avrundet til nærmeste hele tusen og er vist oppsummert i Tabell 2. Dette er de kostnadene som vil bli benyttet i den økonomiske analysen i denne rapporten.

Tabell 2 - Merkostnad for varmepumper med nødvendig utstyr. Prisen er oppgitt i kroner avrundet til nærmeste tusen

	Luft – veske varmepumpe	Vann – veske varmepumpe med energibrønn
Varmepumpe	246 000	52 000
Mellomveksler		15 000
Boring		304 000 ¹
Arbeid rørlegger		54 000
Total merkostnad	246 000	425 000

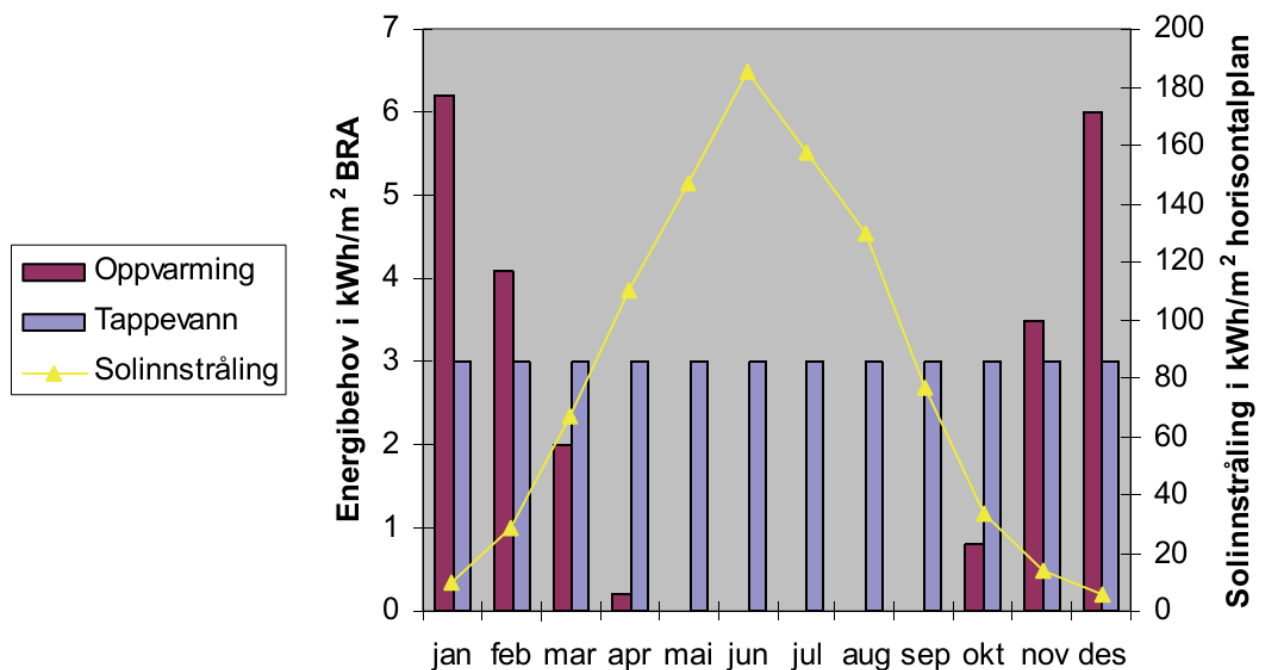
¹ Inkludert alt kollektormateriell utvendig; men eksklusive graving og tilbakefylling.

3 Solfangersystem

Det er et ønske fra utbygger av kontorbygget denne rapporten omhandler, at det skal undersøkes mulighet for utnyttelse av solenergi til oppvarming bygningen. Det vil bli gjort simuleringer med solfanger i oppvarmingssystemet i kombinasjon med varmpumpe, og det vil derfor forklares nærmere om solfangersystem i dette kapitlet.

Utnyttelse av solvarme til å dekke deler av varmebehovet i boliger er en miljøvennlig løsning som har en enkel konstruksjon. Dette er foreløpig en lite utnyttet ressurs i Norge, men det er et betydelig potensial for utnyttelse av solenergi her til lands [32]. Etter innføringen av energimerkeordningen, har utnyttelse av solvarme fått en økt betydning både ved omsetning av bygg og ved nybygging.

Passivhus er karakterisert som bygg med svært lite energibehov til oppvarming, oppvarmingsbehovet er redusert til en fjerdedel av eksisterende snitt for bygninger [32]. Det resterende oppvarmingsbehovet til bygningen er for det meste i vintermånedene, den tiden det er minst solinnstråling. En indikasjon på hvordan forløpet over året kan være er vist i Figur 12, som viser energibehovet til en lavenergibolig i Oslo sammen med innstrålt energi fra sola. Figur 12 viser at innstrålt solenergi er i motfase til energibehovet for oppvarming, noe som kan være problematisk for utnyttelse av energien fra solfangeren. For bygg med konstant tappevannsbehov kan solfangersystemet dimensjoneres slik at det dekker mesteparten av tappevannsbehovet om sommeren, slik at solfangersystemet kan utnyttelsen hele året.

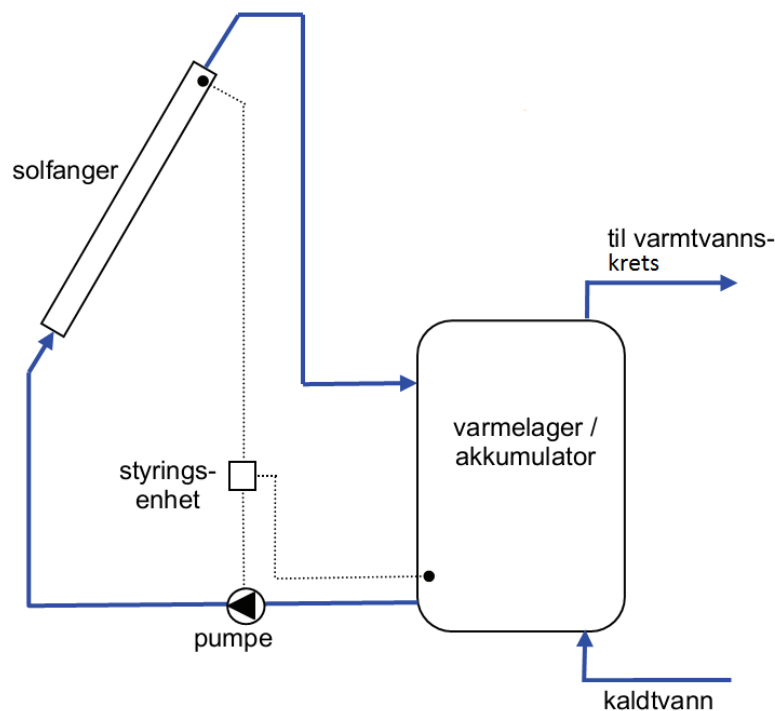


Figur 12 - Månedlig energibruk til romoppvarming og tappevann til en lavenergibolig (blokkleilighet) i Oslo. Total månedlig solinnstråling for samme sted er også vist

Et solfangersystem til bygningsoppvarming består av følgende deler:

- Solfanger
- Varmelager / akkumuleringstank
- Distribusjonssystem
- Styringsautomatikk

Prinsipiell skisse av et solfangersystem er vist i Figur 13. Solfanger er plassert utenpå bygningens yttervegg, og rør med sirkulerende veske bringer vann til og fra solfangeren til varmelager. Vannet sirkulerer ved hjelp av en pumpe som reguleres av en styringsenhet. Styringsenheten sørger for at vannet slutter å sirkulere hvis vanntemperaturen ut fra solfanger er kaldere enn temperaturen i varmelager, og sørger også for korrekt styring for å unngå frost eller koking av veske. Oftest benyttes et indirekte system der returvannet fra byggets varmedistribusjonssystem varmeveksles med varmelageret før andre effektkilder tilfører resterende nødvendig varmeenergi.



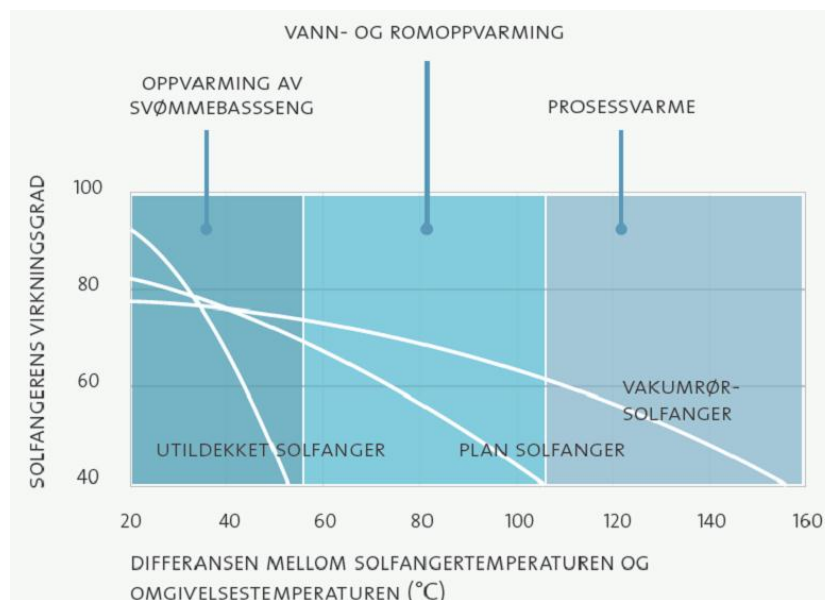
Figur 13 - Prinsipiell skisse av hovedkomponentene i et solfangersystem

3.1 Solfangeren

I solfangeren blir solstrålingen omdannet til varme. Det finnes flere ulike typer solfangere, og oppbygningen til to ulike typer vil bli beskrevet i dette kapitlet. Den plane solfangeren er den som tradisjonelt har vært mest brukt i bygninger, men også vakuurrørsolfangere har fått en større andel på markedet etter hvert [32].

I Figur 14 er virkningsgrad for tre ulike solfangertyper vist. Vakuurrørsolfanger har høy varmeisolering, og har derfor en flatere kurve enn både plan og utildekket solfanger. Ved liten

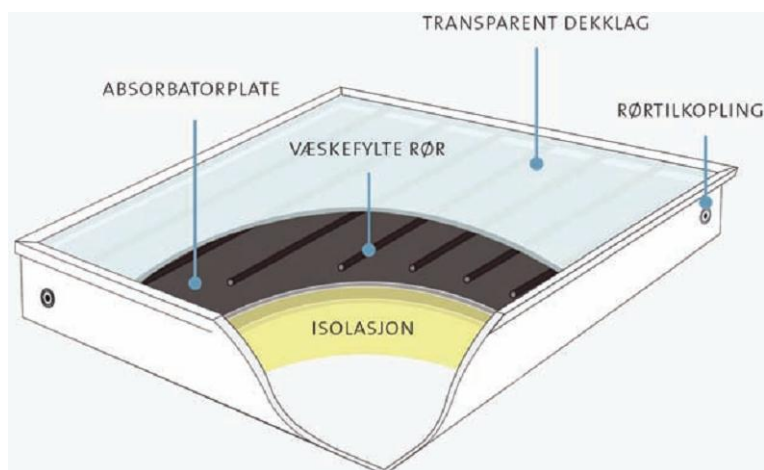
solinnstråling og store temperaturdifferanser vil en slik solfanger være et riktig valg. Ved stor solinnstråling og lave temperaturdifferanser vil en plan- eller utildekket solfanger være bedre valg. Figur 14 viser at inngående temperatur til solfanger bør være så lav som mulig, ha god isoleringsevne og dekklaget til solfanger bør ha høy soltransmittans.



Figur 14 - Kurver for typiske virkningsgrader for ulike plane solfangere. Viser også typiske temperaturnivå som er typisk for ulike bruksområder.

3.1.1 Plan solfanger

Oppbygningen av en plan solfanger er vist prinsipielt i Figur 15. Dekklaget består av et lag herdet glass i en ramme av ekstrudert aluminium, og er forseglet med gummi. Dekklaget er gjennomsiktig, og bør ha så høy soltransmittans som mulig for å slippe inn mest mulig solenergi. Absorbatoren er den komponenten som absorberer den innstrålte energien fra sola. Dette er en kopper-, aluminium-, eller plastplate med ribber og innstøpte rør som det sirkulerer veske i, som den absorberte energien overføres til. Under og langs kantene er solfangeren isolert for å minimere varmetapet til omgivelsene.

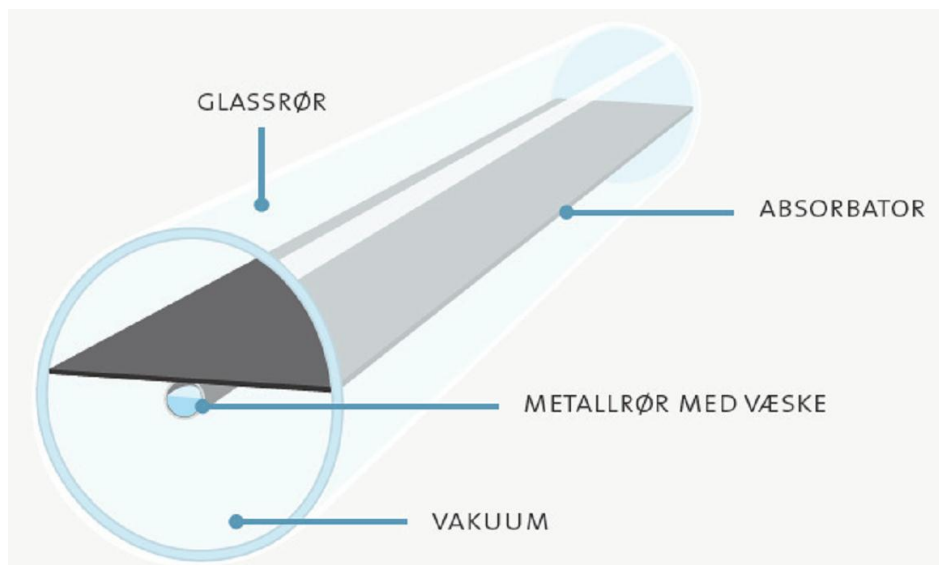


Figur 15 – Prinsipiell oppbygging av en plan solfanger

3.1.2 Vakuurrørsolfanger

En vakuurrørsolfanger skiller seg fra den plane solfangeren ved at absorbatoren er plassert i et glassrør med vakuum. Varmetapet fra solfangeren minimeres av denne grunn, fordi vakuum har en mye bedre varmeisoleringssevne enn luft. Det finnes flere ulike typer vakuurrørsolfangere, i Figur 16 er det vist et snitt igjennom en type med såkalt "direkte gjennomstrømning". Her strømmer varmemediet gjennom et metallrør inne i vakuurrøret, og varmen overføres på tilsvarende måte som i en plan solfanger.

Vakuurrørsolfangere har en høyere virkningsgrad enn plane solfangere ved lave utetemperaturer og liten solinnstråling, men er som regel to til tre ganger så dyre i innkjøp [33]. Levetiden er oftest også kortere fordi lekkasjer kan oppstå som gjør at det ikke lenger blir vakuum i glassrørene.



Figur 16 - Snitt gjennom en vakuurrørsolfanger med "direkte gjennomstrømning"

3.2 Levetid

Levetiden til solfangere er en viktig faktor ved en økonomisk analyse av solfangersystemet, og dette vil variere mellom de ulike systemer. Ved den økonomiske analysen senere i rapporten vil NVE sin rapport fra 2008 *Solenergi for varmeformål – snart lønnsomt?* legges til grunnlag, som benytter solfangersystemet som helhet sin levetid til å være 20 år.

3.3 Pris

Prisen som legges til grunn til den økonomiske analysen av solfangeren i denne rapporten er 3 050 kr/m². Denne prisen ble oppgitt av Valliant [33] som er en leverandør av solfangere i Norge. Det ble i samtalen forklart hvilken type solfanger som ble benyttet ved simuleringen, en type Vakuurrørsolfanger som har tilsvarende virkningsgrad som en av Valliant sine plane solfangere. Kostnaden varierer mellom ulike leverandører, og etter hvert som solfangere blir mer benyttet i Norge vil prisene kunne synke som resultat av økende konkurranse.

4 Varmesystem for bygg

I denne rapporten blir det fokusert på energisystem for større bygninger. Det blir gjort vurderinger i forhold til en bestemt bygning, nemlig et større kontorbygg på omtrent 3 000 m² som bygges i Mandal. Det er ønske fra byggherre at bygget skal tilfredsstillende passivhusstandard, en standard som ikke enda har kommet for yrkesbygg. NS3701 *Kriterier for passivhus og lavenergibygninger – Yrkesbygninger* er forventet fastsatt i løpet av 1. halvår 2012 [34], og i mangel av denne er Prosjektrapport 42 - *Kriterier for passivhus og lavenergibygninger – Yrkesbygg* [35] benyttet som grunnlag for kriteriene til passivhusstandard.

NS 3031, *Beregning av bygningers energiytelse – Metode og data*, har delt opp de ulike bygningskategoriene i følgende deler: småhus, boligblokk, barnehage, kontorbygning, skolebygning, universitets- og høyskolebygning, sykehus, sykehjem, hotellbygning, idrettsbygning, forretningsbygning, kulturbygning og lett industribygning, verksteder [36]. Den kategorien som er valgt for bygget beskrevet i denne rapporten er kontorbygning.

4.1 Temperaturer i varmesystem

Forskjellige vannbårne distribusjonssystemer for oppvarming har ulike krav til temperatur på inn- og utgående vann. Ved bruk av varmpumper til oppvarming av dette vannet, er temperaturområde og -løft direkte knyttet til effektfaktoren til systemet, som forklart og vist i Formel 1 i kapittel 2. IEA gir på deres nettside [37] en indikasjon på hvilken effekt valg av ulike oppvarmingssystem kan ha for effektfaktoren på varmepumpa, vist i Tabell 3.

Tabell 3 - Eksempel på hvordan COP fra vann-vann varmepumpe varierer med distribusjonssystemets tur- / returtemperatur [37]

Varmedistribusjonssystem (tur- / returtemperatur)	COP
Konvensjonelle radiatorer (60 / 50 °C)	2,5
Gulvvarme (35 / 30 °C)	4,0
Lavtemperatur radiatorer (45 / 35 °C)	3,5

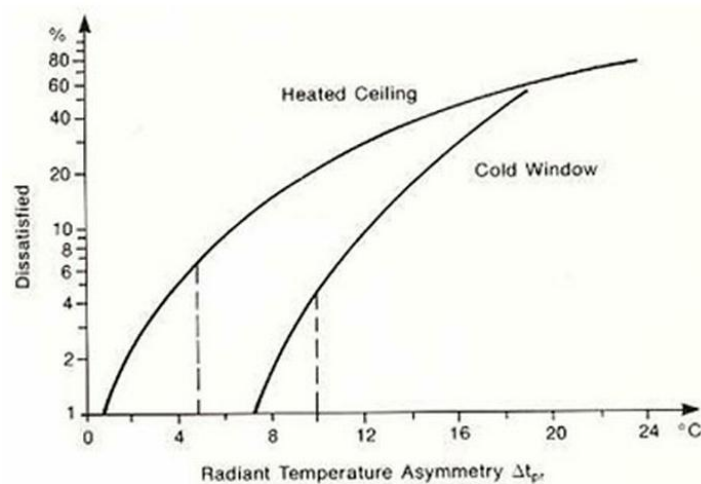
Tilsvarende reduksjon vil også gjelde for solfanger, da solfangere har en høyere virkningsgrad ved både lave temperaturløft og lave operative temperaturer som vist i Figur 14, kapittel 3.1. Maksimal temperatur på varmtvann levert fra varmekilde er satt til 55 °C i simuleringene.

4.2 Takvarme

I passivhus er det lite varmebehov grunnet mye isolasjon og gode vinduer. Dette fører til at radiatorer kan ha mindre varmeoverflate, og blir derfor mindre i størrelse. Grunnet gode vinduer er det ikke lenger nødvendig å plassere radiatorene under vindu for å forhindre kaldras. Plassering

i taket/himling vil kunne frigjøre plass og være en estetisk bedre løsning. YIT skal i dette byggeprosjektet i samarbeid med ENOVA¹ benytte takvarme som varmeavgiver i oppvarmings-system i bygningen. Takvarmesystemet fra YIT har enkel tilkøpling med hurtigkobling som skal minske monteringskostnader og skal kunne integreres i deres egen ventilasjonsløsning KlimaTak™ [38]. Dette er en helt ny løsning, og bygningen som denne rapporten omhandler er det første som benytter systemet med denne løsningen fra YIT.

Takvarme tar et dårlig rykte for å bidra til dårlig inneklime på grunn av strålingsassymetri og lav toleranse for varmestråling mot hodet, vist i Figur 17. Jan Vilhelm Bakke Phd, overlege i Arbeidstilsynet og Førsteamanuensis ved NTNU Institutt for energi og prosesssteknikk, skriver i en kommentar [39] at han er svært kritisk til en oppvarmingsløsning lik den som skal bli benyttet i bygget som denne rapporten omhandler. Plassering og overflatetemperatur er derfor svært viktig å ta stilling til ved installasjon av takvarme. Lav overflatetemperatur minimerer risiko for misfornøyde brukere og har samtidig en positiv effekt på effektfaktoren til varmepumpa som leverer varme til systemet.



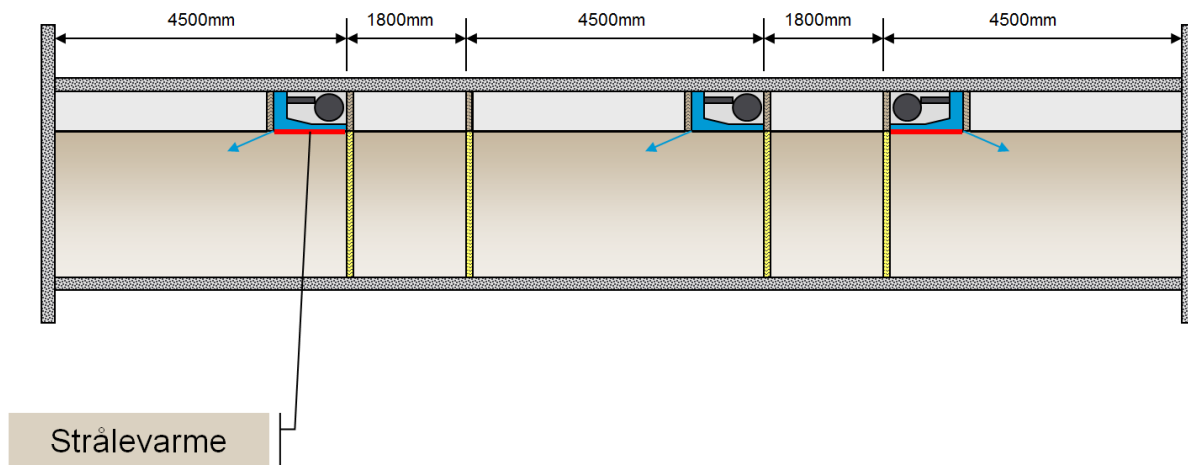
Figur 17 - Strålingsassymetri. Antall misfornøyde som funksjon av grad strålingsassymetri fra varmt tak og kaldt vindu

Takvarmepanel har en lett konstruksjon og kan dermed raskt reguleres. Panelet bør ha konstant mengde sirkulert varmtvann når det er i drift [40] for å sikre turbulent strømning og dermed lav varmeovergangsmotstand i rør. Ved lav tidskonstant kan anlegget benytte enkel regulering. Selve panelet er laget av en plate med aluminiumprofil som har påmonterte rør for sirkulering av varmtvann. Energien fra varmtvannet vil overføres til aluminiumsplaten og varmen vil avgis som stråling fra platen til omgivelsene.

Monteringen av takvarmepaneller er illustrert i Figur 18 som en rød horisontal strek nederst på KlimaTak som ligger oppunder himling. I Figur 18 er det montert takvarme på høyre og venstre KlimaTak, mens midtre KlimaTak er uten takvarme. Takvarmeløsningen kan være diskret og

¹ Omtalt i kapittel 1.2

estetisk pent utført. Et eksempel på montering av takvarme er vist i Figur 20 der strålingsplatene er montert side om side i en rekke over hele takets lengde. Kostnadene ved bruk av takvarmeløsningen fra YIT skal være lavere enn andre distribusjonssystem på grunn av enkel tilkøpling, fleksibilitet og enkel konstruksjon [40].



Figur 18 - Skisse av KlimaTak i himling med og uten montert takvarme



Figur 19 - Takvarmepanelet skal være enkelt å kople til, være fleksibelt og ha en enkel konstruksjon



Figur 20 - Takvarmepaneller montert i himling kan gjøres estetisk og lite synlig

4.3 Forklaring av begreper om energibehov

Nødvendig tilført varmeenergi fra byggets oppvarmingssystem er avhengig av en rekke faktorer. Varmetapet fra bygningen til omgivelsene er tilnærmet lineært avhengig av temperaturdifferansen inne i bygget og omgivelsestemperaturen, og vil av denne grunn følgelig ha store variasjoner over året. Ved utregning og analyse av byggets energibehov er det noen begreper som er nødvendig å være klar over. De viktigste begrep og uttrykk vil bli kort forklart i dette kapittelet, og er illustrert grafisk i Figur 21. For nærmere forklaring henvises det til litteratur om energibruk i bygg.

Brutto varmetap er det varmetapet bygget har uten noen internlast, solinnstråling og lignende. Det kan fysisk forstås som den energien du må tilføre bygget for å opprettholde en bestemt innetemperatur hvis bygningen befinner seg i skygge, har ingen personbelastning, elektriske apparater eller andre varmekilder.

Intern last er varmetilskudd fra personer, elektrisk utstyr, lys og andre ting og aktiviteter som tilfører varmeenergi til bygget

Soltilskudd er den varmeenergien solen bidrar med til bygget. Dette er skilt i to ulike kategorier; direkte og diffus stråling. Direkte stråling er som navnet antyder varmestråling direkte fra solen, mens diffus stråling er reflektert eller brutt stråling fra skyer og omgivelser. Den diffuse strålingen kommer fra alle himmelretninger, og i motsetning til direkte ikke kun kommer fra den himmelretning der solen står. Ved utregning av energibehovet til bygget antas den energien som kommer fra diffus stråling å være konstant over året, mens energien fra direkte stråling øker lineært med utetemperaturen fra 3 °C og oppover.

Netto varmetap, illustrert ved netto effektbehov P_N i Figur 21, er det nødvendige varmetilskuddet som bygningen må tilføres ved bruk. Det er da tatt høyde for at bygget har intern last, og at det er plassert på gjeldende lokasjon med den solinnstråling som er på stedet. Netto varmetap kan finnes ved følgende utregning:

$$\text{Netto varmetap} = \text{Brutto varmetap} - \text{Intern last} - \text{Soltilskudd}$$

DUT, eller dimensjonerende utetemperatur, er årets laveste middeltemperatur over 3 døgn. Oftest brukes normalperioder som 1961–1990 for dette.

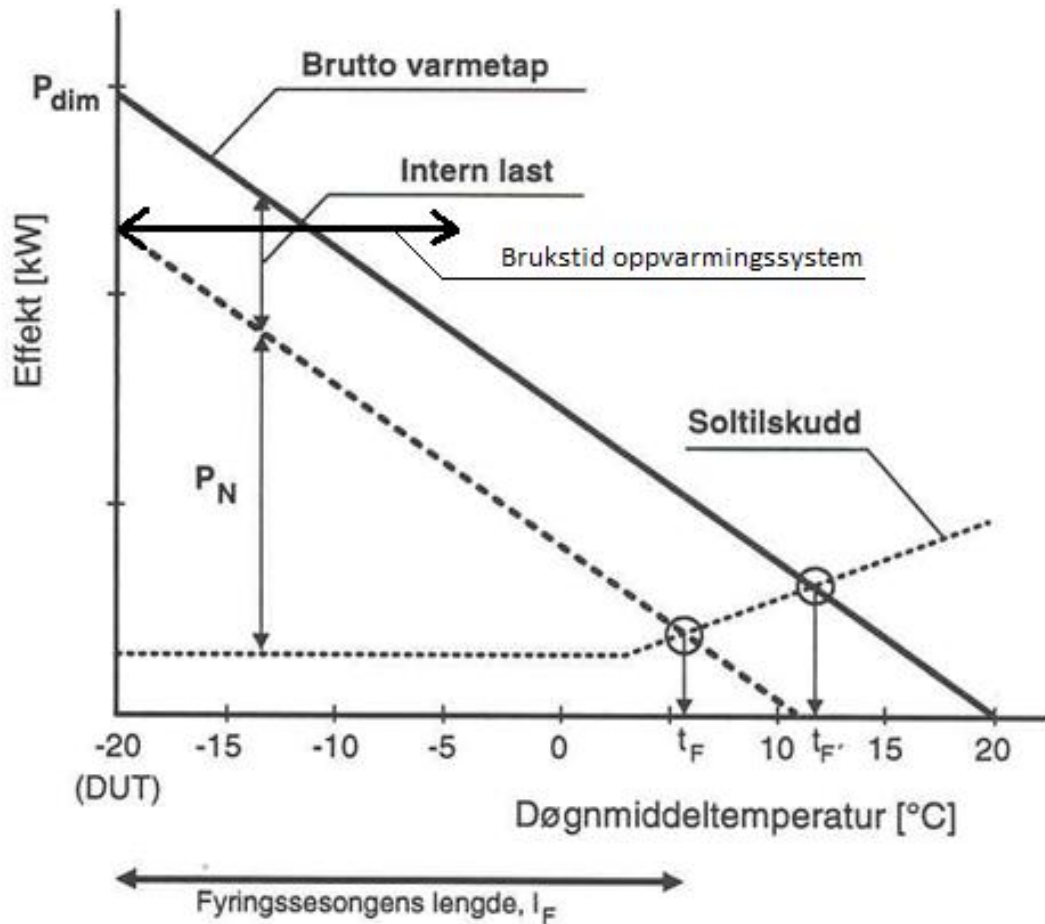
t_F er utetemperatur der netto varmetap er null, altså der internlast og soltilskudd tilfører all nødvendig oppvarming til bygningen.

I_F er fyringssesongens lengde og er lik differansen mellom DUT og t_F , vist ved nedre pil i Figur 21

Brukstiden til oppvarmingssystemet, betegnet ved symbolet τ , angir den tiden oppvarmingssystemet må kjøre på maksimal last for å levere lik energimengde som netto varmetap. Brukstiden er et tall som sier noe om hvor mye delast systemet kjører på, og for grunnlasten til systemet er det ønskelig at dette tallet er så høyt som mulig.

$$T \text{ [h]} = \frac{\text{Maksimal installert effekt [kW]}}{\text{Total netto varmebehov [kWh]}}$$

Brukstiden kan angis til systemet som helhet, eller for grunnlast og topplast separat. Det er da maksimal installert effekt for aktuell kilde som settes inn for teller. For varmepumper er det anbefalt en minimum brukstid på 3 000 – 5 000 timer [41].



Figur 21 - Viktige begreper av byggets energibehov

5 EnergyPlus

EnergyPlus er et dataprogram for energianalyse og termisk simulering [42]. Det er utviklet av det amerikanske energidepartement som et verktøy for å minimere energibruken til bygninger. Programmet lar brukeren beskrive et bygg på et høyt detaljnivå. Byggets konstruksjon, oppvarmingssystem, ventilasjonssystem, bruksmønster og mye mer kan detaljert beskrives. På dette grunnlaget kalkulerer så programmet hvilket energibruk som er nødvendig for å opprettholde de verdier som er satt, hvilke lufttemperaturer det er i de ulike soner eller andre verdier som er av interesse for brukeren. Programmet har et svært høyt detaljeringsnivå, og brukeren kan hente ut verdier på enkeltkomponenter i konstruksjon eller system i bygget, som for eksempel hvilken posisjon en ventil befinner seg i, hvilken temperatur som er på isolasjon i yttervegg eller luftmengden igjennom en kanal.

Nøkkelegenskapene til EnergyPlus som er benyttet i simuleringen i denne rapporten er følgende:

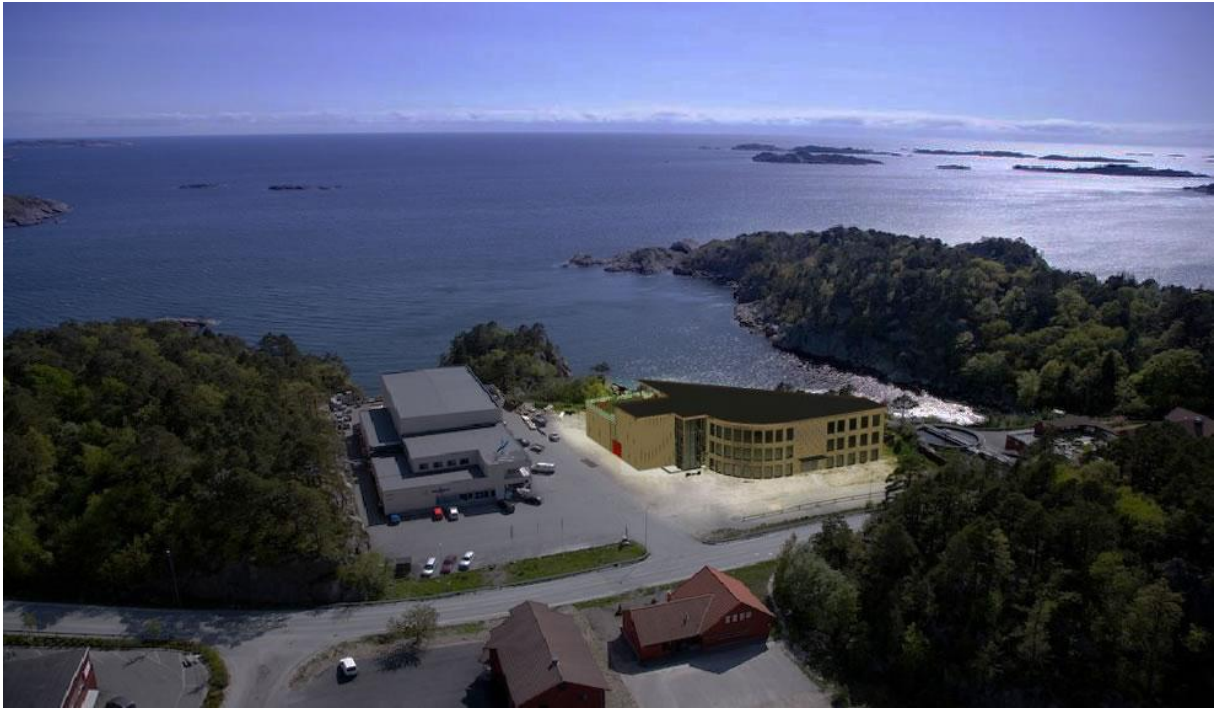
- En integrert, samtidig løsning der bygningens respons og de primære og sekundære systemer er tett koblet;
- Høy tidsoppløsning for samspillet mellom de termiske soner, ventilasjonssystem, oppvarmingssystem og ytre miljø;
- ASCII tekst baserte værdata. Det ble laget en fil med værdata for året 2011 som inneholder timesverdier av miljømessige forhold, som solinnstråling, lufttrykk, lufttemperatur, luftfuktighet, vindretning og vindhastighet. Denne data ble hentet fra Bioforsk sin nettside [43] og ble så behandlet for å få rett syntaks;
- En teknikk for varmebalanse for byggets termiske last som muliggjør samtidig beregning av strålende og konvektiv effekt både i interiør- og eksteriøroverflaten;
- Kalkulasjon av transient varmeledning gjennom bygningsdeler som vegger, tak, gulv og lignende ved transferfunksjoner;
- Utregning av varmeoverføring fra grunn ved modellering gjennom tredimensjonale endelige differensielle bakkemodeller og forenklede analytiske teknikker;
- Anisotrop¹ himmelmodell for bedre beregning av diffus solinnstråling på skrå flater [44];
- Avanserte beregninger av styrbare persienner.

EnergyPlus leser inndata og skriver utdata som tekstfiler, men en rekke grafiske grensesnitt er tilgjengelige for å gjøre simulering mer brukervennlig [45]. I denne rapporten er det blitt benyttet SketchUp [46] sammen med OpenStudio [47] til å lage byggets konstruksjon. Utdata ble videre importert til Microsoft Excel for behandling og bearbeiding.

¹ Anisotrop filtrering en metode for å forbedre bildekvaliteten til teksturer på overflater av 3D-modeller som er på en skrå innsynsvinkel i forhold til kameraet

6 Bygningsbeskrivelse

Bygningen som simuleres i denne oppgaven er et kontorbygg som skal bygges på kysten i Mandal kommune. Når denne oppgaven ble påbegynt var fundamentet i ferd med og støpes, og ferdigstillelsen av bygget er planlagt å være etter sommeren 2012. Kontorbygget har fått navnet Havutsikt, og informasjon om bygget kan hentes på hjemmesiden www.havutsikt.no. Illustrasjon av hvordan det ferdige bygget vil se ut på lokasjonen er hentet fra hjemmeside til bygget, og er vist i Figur 22 og Figur 23.



Figur 22 - Illustrasjon av ferdig bygg på rett lokasjon (foto: www.havutsikt.no)



Figur 23 - Nord på bygget (foto: www.havutsikt.no)

Som utgangspunkt for simuleringen og rapporten for øvrig er det benyttet materiale oversendt fra Jens Petter Burud hos YIT den 2. mars og informasjon fra hjemmesiden www.havutsikt.no. Materialene fra YIT var detaljerte plantegninger av alle etasjene til bygget (vedlegg 4), en rapport fra simuleringsprogrammet SIMIEN¹ som allerede var gjort av et konsultentselskap (vedlegg 5), skisse av fasader og snitt (vedlegg 6) og skisse av hvor montering av KlimaTak og takvarme er tenkt (vedlegg 7).

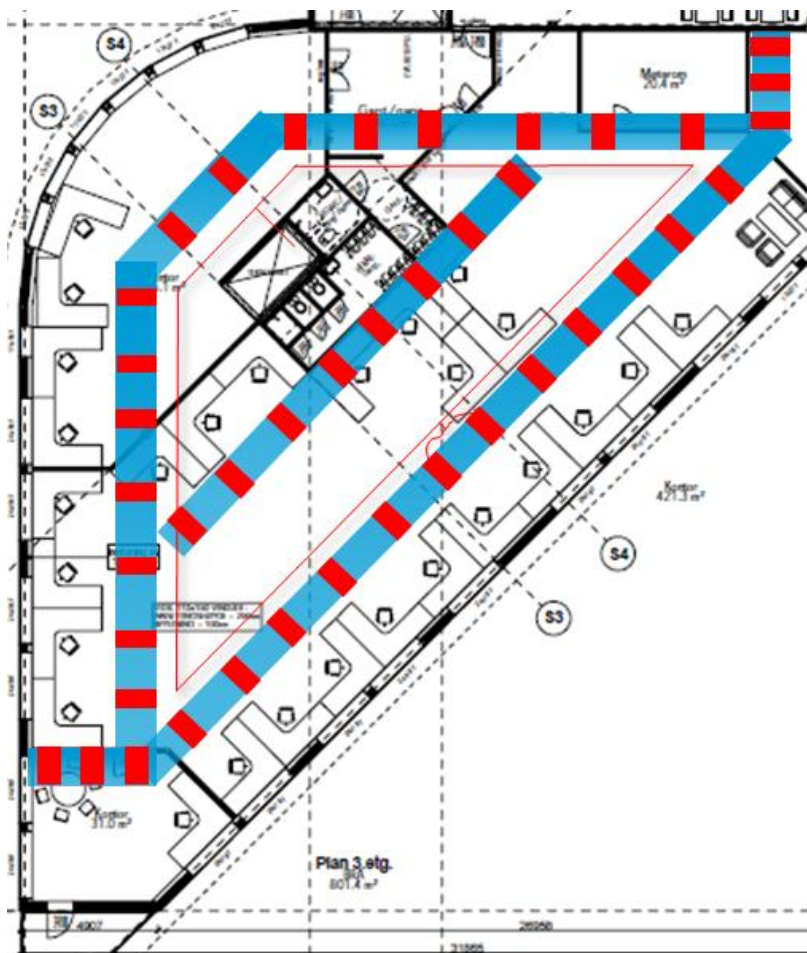
Plantegningene for de ulike etasjene var detaljerte og bød ikke på problemer for oppbygning av bygningen i simuleringsprogrammet. Arealet på vinduene ble derimot gjenstand for antakelse. Bredden på vinduene kunne nøyaktig måles fra plantegningene, men høyden på vinduene måtte antas på grunnlag av grafiske tegninger på byggets hjemmeside i sammenheng med skissene av fasader og snitt. Det vil dermed kunne være noe avvik på arealet til vinduene, men dette antas å være omtrentlig korrekte tall. U-verdier og tekniske data var gitt i SIMIEN-rapporten, og der data manglet ble Prosjektrapport 42^{II} benyttet. Dette er omtalt nærmere i kapittel 7.1.

6.1 Byggets klimaanlegg

Klimaanlegget til bygningen skal være basert på YIT sitt KlimaTakTM [38] med innebygget takvarme til oppvarming, omtalt i kapittel 4.2. KlimaTak skal sørge for god ventilasjon av bygget, mens takvarmen med vannbåren varme skal tilføre nødvendig oppvarming. Plassering av KlimaTak og takvarme er vist i Figur 24. Her er KlimaTak vist som blå stripe, mens røde firkanter viser tenkt plassering av 300 W paneler for takvarme. I simuleringen av bygningen ble de enkelte takplatene ikke begrenset til 300 W, men ble derimot angitt som ubegrenset effekt for å avdekke oppvarmingsbehovet i de ulike sonene og på denne måten ble også reelt oppvarmingsbehov simulert og ikke begrenset av effekten til takplatene.

¹ SIMIEN (SIMulering av Inneklima og ENergibruk i bygninger) er et mye brukt simuleringsprogram som utfører simuleringer av tilstanden i bygninger. Bruksområdet er evaluering mot byggeforskrifter, energimerking, beregning av energibehov, validering av inneklima og dimensjonering av oppvarmingsanlegg, ventilasjonsanlegg og romkjøling.

^{II} Se kapittel 4 for beskrivelse av Prosjektrapport 42



Figur 24 - Skisse for plassering av KlimaTak og takvarme (tegning av Odd Drage – februar 2012)

KlimaTak er en patentert løsning fra YIT for klimatisering av rom. Prinsipp og virkemåte er vist i Figur 25 og viser et snitt av KlimaTak som er montert oppunder tak. KlimaTak kan for øvrig også integreres i himling, som er vist i monteringsfasen i Figur 26 og er synlig kun som en perforert takplate når det er ferdig montert.

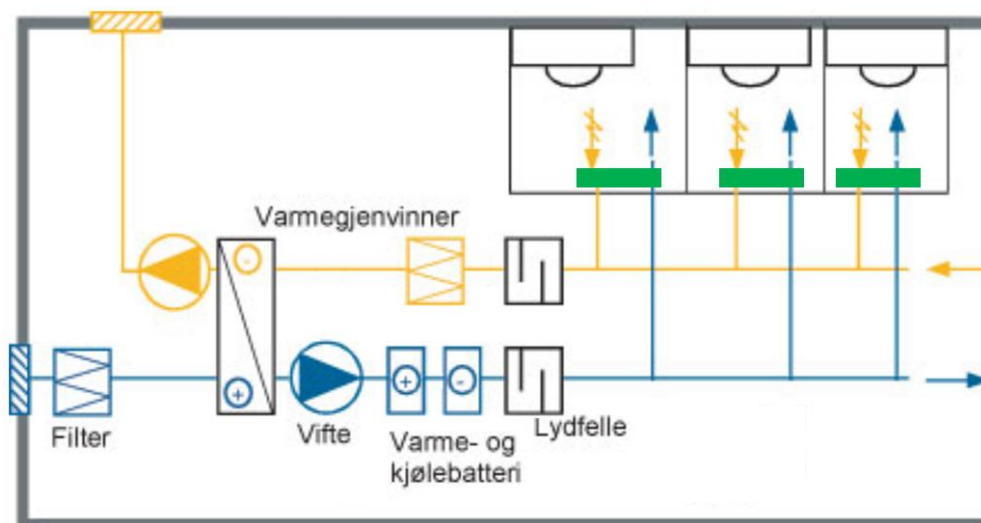


Figur 25 - KlimaTakets prinsipp og virkemåte



Figur 26 - KlimaTak monteres integrert i himling

Ventilasjonssystemet er basert på kompaktaggregat med roterende varmegjenvinner med en årsvirkningsgrad på 83 %. Prinsipiell virkemåte for ventilasjonssystemet er vist i Figur 27. Her er tilluftskanaler vist med blå streker, og avkastluft vist med gult. Tilluft hentes fra utsiden av bygget via en grovrist, for å filtrere bort løv og lignende, og er montert på bygningens fasade. Luften filtreres i et filter og varmevekslet med avkastluften i den roterende varmegjenvinneren dersom det er behov for oppvarming. Luften får drivtrykk fra tilluftsvifte montert etter varmegjenvinner. Etter viften blåses luften så gjennom et varmebatteri og senere et kjølebatteri. Ved oppvarmingsbehov eller kjølebehov vil luften henholdsvis enten varmes eller kjøles i et av batteriene. Lydfellen har til hensikt å absorbere lydstry fra aggregatet. Deretter sendes luften via et kanalnett til de ulike oppholdssoner i bygningen som i Figur 27 er indikert ved tre rom øverst til høyre og flere rom ved piler for tilluft og avtrekk til høyre. I rommene som skal klimatiseres vil luftmengden reguleres med spjeld og vil bli fordelt i rommet av KlimaTaket, som er indikert ved grønn boks i Figur 27. Avtrekksluften samles opp av klimasystemets avtrekkskanaler, og føres ut av bygningen ved hjelp av avtrekksviften etter å ha blitt filtrert før varmegjenvinneren der overskuddsvarme overføres til tilluften ved oppvarmingsbehov.



Figur 27 - Prinsippskisse av ventilasjonssystemet til bygningen

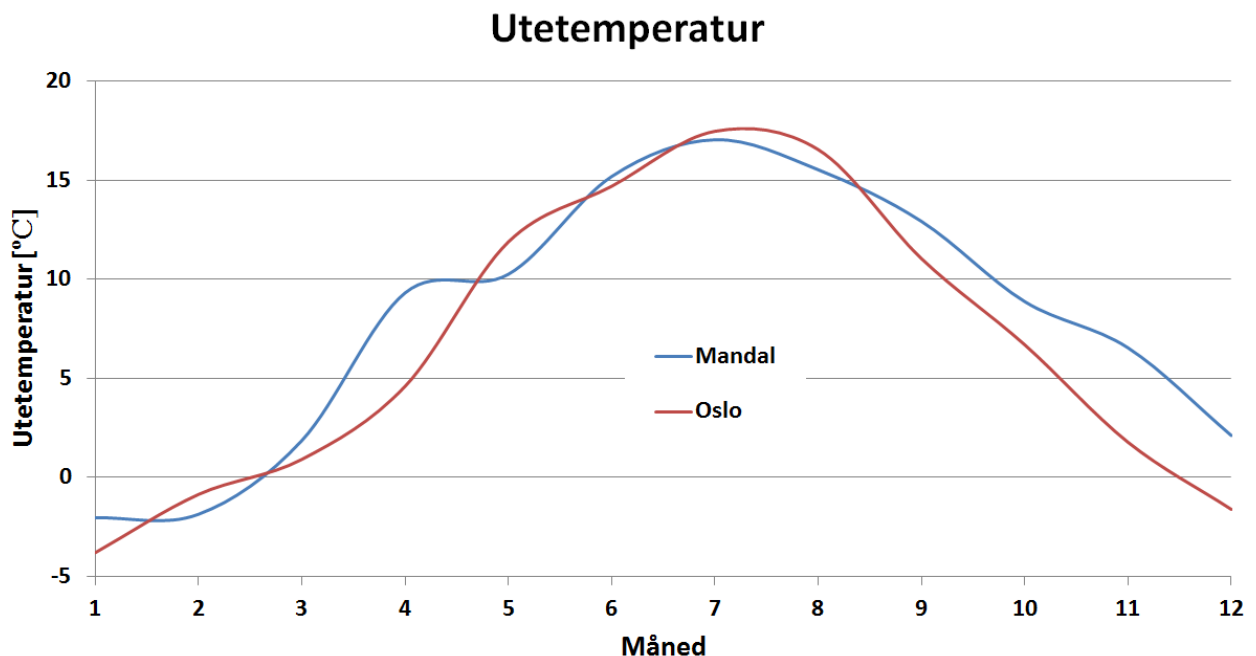
6.2 Værforhold i Mandal

Bygningen ble simulert med Oslo som utgangspunkt, hovedsakelig siden det var værdata herifra som var tilgjengelig i EnergyPlus. Det ble imidlertid senere hentet værdata fra Bioforsk [43], og denne data ble brukt til å lage en værfil som EnergyPlus benyttet i simuleringene. Alle tidligere simuleringer ble så gjentatt for alle de tidligere simuleringene. Data som ble hentet fra Bioforsk var lufttemperatur, lufttrykk, solinnstråling, luftfuktighet, lufthastighet og relativ fuktighet. Året 2011 ble valgt som grunnlag for værdata, og alle målinger er gjort på timesbasis.

Noen målinger manglet innimellom, og der disse målingene manglet ble data fra forhenværende time kopiert inn. Dette bør imidlertid ikke være en feilkilde av større betydning, da det dreier seg om i underkant av 20 manglende timesverdier i løpet av et år.

Årsmiddeltemperatur for stedet ble regnet ut til 8,0 °C for 2011, noe som vil tilsvare klimasone D (vedlegg 2). Dette ble benyttet som grunnlag til varmeberegning i grunn for dimensjonering av energibrønn, omtalt i kapittel 2.2.2.

Forskjellen på utetemperaturen i Mandal og Oslo er lettest å se grafisk ved en månedsmidlere temperatur, vist for de to stedene i Figur 28. Her det kan en se at Mandal har en mer stabil utetemperatur som dessuten ligger med en høyere midlere verdi enn for Oslo. Dette gjør Mandal til et mer egnet sted for varmepumpe enn Oslo fordi temperaturforholdene resulterer i lengre brukstid, som forklart i kapittel 4.3.

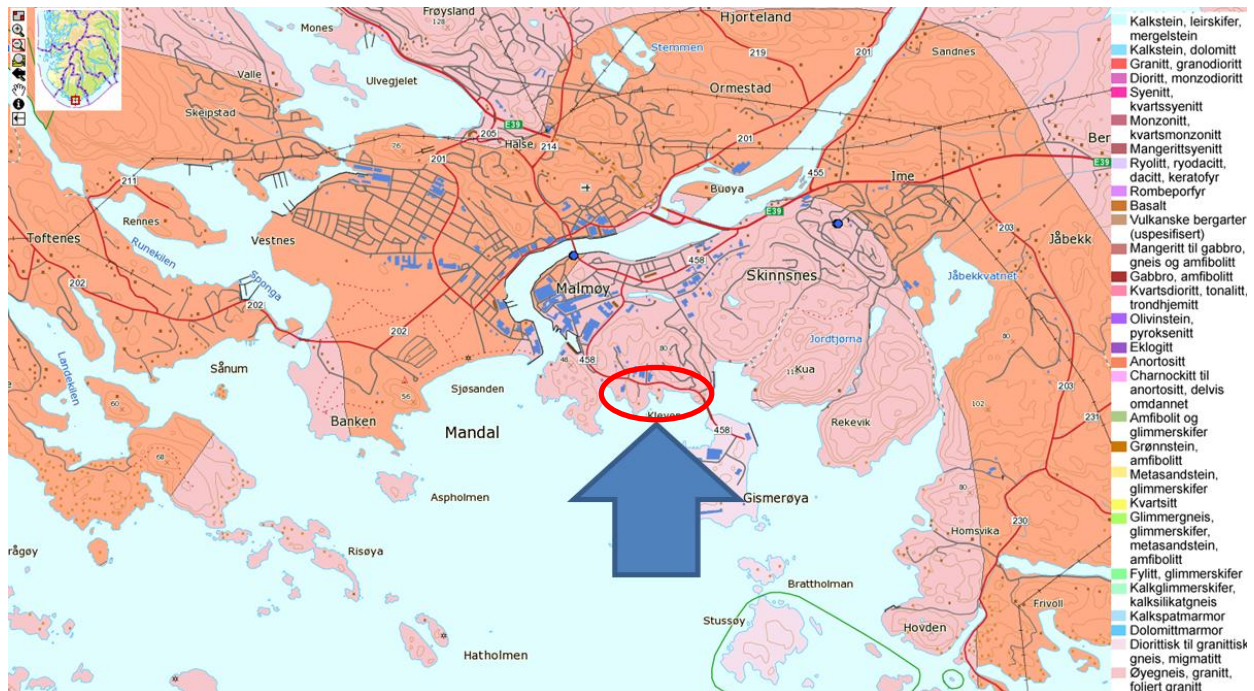


Figur 28 - Månedsmidlere utetemperatur for Mandal og Oslo

6.3 Grunnforhold på stedet til bygningen

Grunnforhold er en viktig faktor ved dimensjonering av energibrønn, og relevant informasjon om lokasjonen ble hentet fra NGU sin kartdatabase på internett [48]. Andre aktuelle kart fra NGU

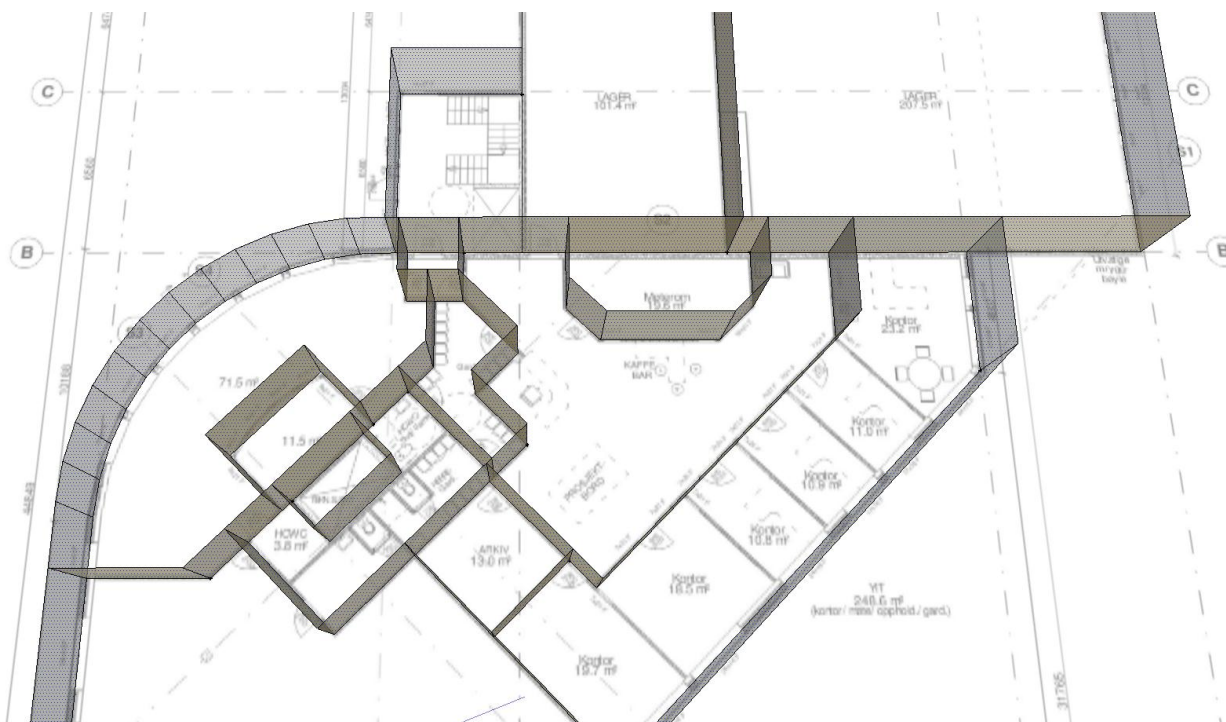
som ble benyttet er vist i vedlegg 3. Et kart som viser berggrunnen i området er vist i Figur 29, der aktuell lokasjon for bygningen er indikert med blå pil. I følge NGU sin grunnvannsdatabase er det ikke grunnvannsressurser i dette området. Løsmassen er tykk morene. Berggrunnen er sammensatt av øyegneis, granitt, foliert granitt. Varmeledningsevnen til granitt varierer mellom 2-4 W/Km [49], og antas i denne rapporten til middelverdien 3 W/Km. Granitt har en varmekapasitet på 0,790 J/gK [50] og en tetthet på 2,65 g/cm [51], som tilsvarer 2 571 kJ/m³K.



Figur 29 - Berggrunnskart over Mandal, hentet fra NGU

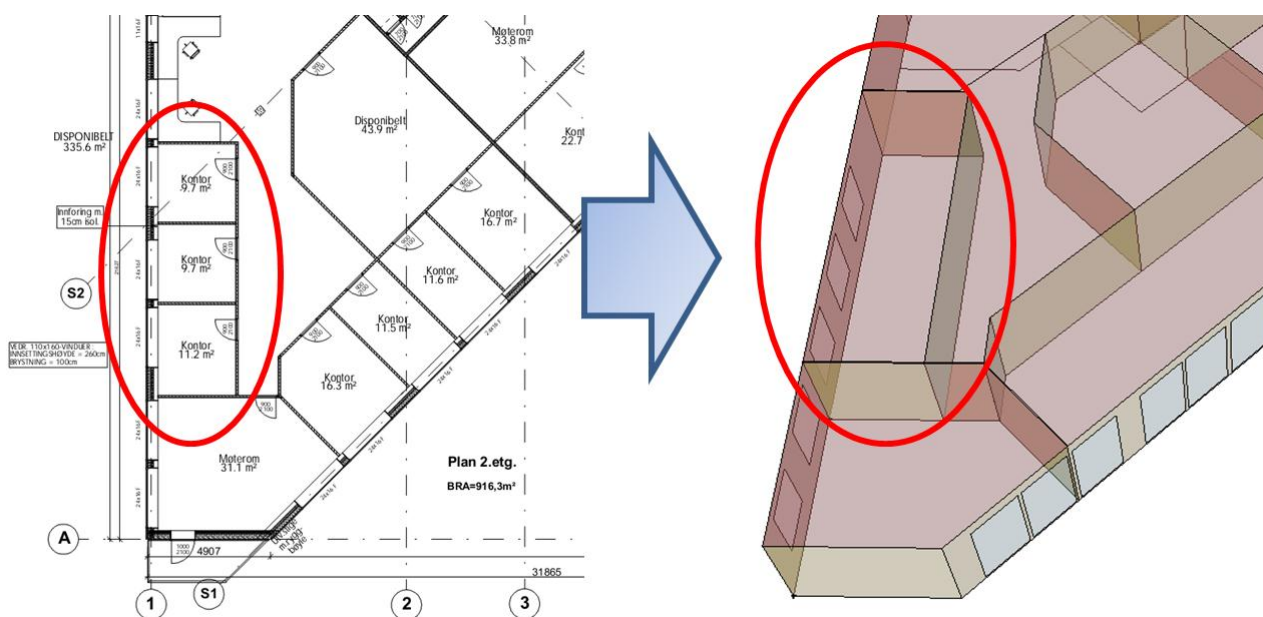
7 Simulering av bygningen i EnergyPlus

Som grunnlag til simuleringmodellen av Havutsikt, er plantegninger datert 30.12.2011 benyttet, og lagt som vedlegg 4. Plantegningene ble lastet inn i programmet SketchUp, som vist i Figur 30, og ble brukt slavisk til å bygge opp simuleringmodellen med stor presisjon. Etasjehøyden ble satt til 3,3 meter, som er høyden til rom og himling samlet, vist i vedlegg 5.



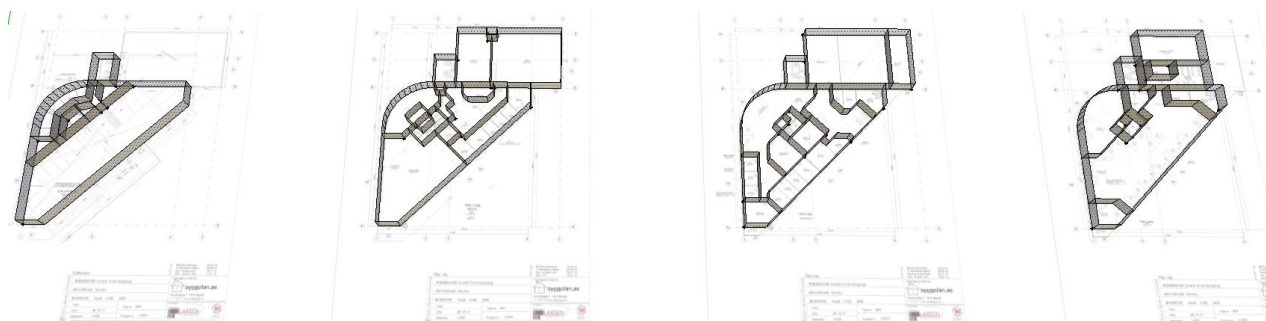
Figur 30 - Simuleringmodellen ble bygget slavisk ut i fra plantegningene til Havutsikt.

Nærliggende rom av samme kategori ble tegnet som et rom, uten innervegger som avgrenset dem. Et eksempel på dette er vist i Figur 31. De tre kontorene til venstre i Figur 31 er separert fra hverandre med innervegger, men når simuleringmodellen ble laget ble disse avgrensende innerveggene ignorert. Denne rapporten vil se på nærliggende like rom som en sone, med likt bruksmønster og termiske egenskaper. Nærliggende rom av ulik kategori blir derimot separert i modellen. Grunnen til at dette ble gjort, er at det ikke er som formål i denne oppgaven å se på effekten av individuelle personers bruksmønster. Å se på effekten av ulik belastning og varierende bruk av rom er et svært interessant tema, men det er ikke fokus i denne rapporten og vil derfor ikke bli sett nærmere på her. Å slå sammen like rom letter dessuten simuleringmodellen betraktelig. Med alle rom separert ville den allerede store modellen blitt mye tyngre å regne på, og dette ville føre til at simuleringen av bygget ville tatt betraktelig lengre tid, uten større innvirkning på de resultatene som vurderes i denne rapporten.



Figur 31 - Utsnitt fra plantegning (venstre) og simuleringsmodell (høyre) av plan 2

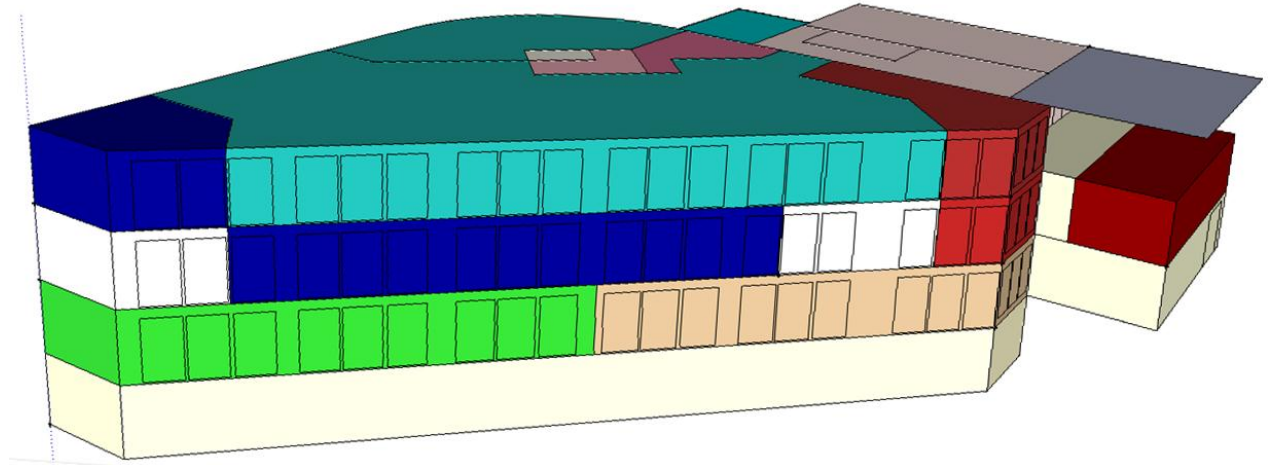
Etasjene ble tegnet i SketchUp hver for seg oppå plantegningene og justert for målestokk, vist i Figur 32. Etter dette ble etasjene flyttet oppå hverandre, underetasjen flyttet under positiv z-akse som indikerer jordsmonn, og etasjene ble koplet sammen slik at tak og gulv i mellomliggende etasjer ble satt til innervegger med grensede flater. Figur 32 viser dessuten de termiske sonene i de ulike etasjene, fra kjelleretasjen til venstre til tredje etasje til høyre.



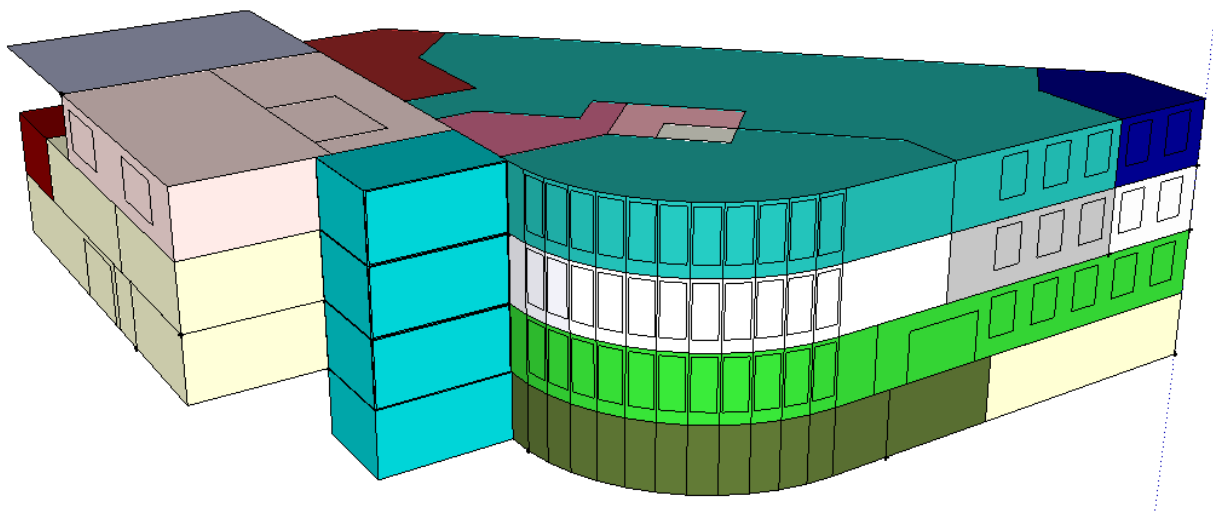
Figur 32 - Etasjene ble bygget hver for seg ut i fra plantegningene. Etterpå ble det satt sammen til et bygg

Bygget ble delt inn i ulike termiske soner. Dette ble gjort ut i fra romkategorien, slik at nærliggende rom med likt bruksmønster og termiske krav ble lagt inn som en sone. Eksempel på dette er at alle bad som var plassert rett ovenfor hverandre ble angitt som en enkelt termisk sone. Møterom og kontor som grenset intill hverandre ble derimot separert som ulike termiske soner, da disse kan ha ulike bruksmønstre. Totalt ble bygget delt inn i 24 ulike termiske soner, navngitt i Tabell 4. Figur 33 og Figur 34 gir en indikasjon på hvordan de ulike sonene er fordelt i bygningen. Fargene blir gitt tilfeldig av SketchUp for ulike termiske soner. Det gjøres oppmerksom på at disse fargene kan være like som andre soner, men soner av lik farge som ikke grenser til hverandre er ulike.

Alle flater i modellen ble systematisk gitt unike navn slik at disse enkelt kan gjenkjennes senere. I tillegg ble alle rom gitt egne gjenkjennbare navn, samt de ulike termiske sonene. Totalt ble 665 flater, 47 rom og 24 termiske soner gitt forskjellige gjenkjennbare navn.



Figur 33 - Byggets ulike termiske soner sett fra havet



Figur 34 - Byggets termiske soner sett fra land

Tabell 4 - Liste over termiske soner i bygningsmodellen

Navn på termisk sone	Oppvarmet og ventilert	Areal [m ²]
TZ3KONTORLANDSKAP	Ja	473
TZHCWC	Ja	28
TZ0GANGOGANNET	Nei	120
TZ3GANG	Ja	32
TZ0PARKERING	Nei	455
TZ3KANTINEMM	Ja	190
TZ2KONTOR2	Ja	34
TZ0SERVER	Nei	18
TZ1KAFFEMM	Ja	122
TZ2RESEPSJONMM	Ja	225
TZ2MOTE	Ja	35
TZ1DISP	Ja	333
TZ2KONTOR3	Ja	61
TZ1LAGER	Nei	301
TZ2TRIMROM	Ja	63
TZ3MOTE	Ja	55
TZ2MOTE2	Ja	39
TZ3KONTOR	Ja	35
TZ0GARDEROBE	Ja	19
TZ1KONTOR	Ja	118
TZ2VRIMLE	Ja	98
TZ2KONTOR1	Ja	99
TZTEKNSJAKT	Nei	7
TZTRAPPEROM	Nei	35
Totalt areal		2992
Totalt areal klimatisert		2055

Navnet til de termiske sonene er bygget opp etter følgende struktur: Alle termiske soner begynner med bokstavene TZ, som er en forkortelse for *Thermal Zone*. Etter dette er et tall som forteller hvilken etasje den termiske sonen er i. Er det ikke angitt noe tall, strekker denne termiske sonen seg over alle etasjene. Dette gjelder for eksempel trapperommet, som strekker seg over alle etasjene i bygget. Til slutt i beskrivelsen er navnet til den termiske sonen. Navnet er angitt slik at

det skal være lett å skjønne ut i fra plantegningene hvilke områder det omfatter, og har ofte samme navn som rommet det gjelder.

7.1 Inndata for simulering i EnergyPlus

7.1.1 Temperaturkrav

Ved simulering av behovet til kontorbygget ble det lagt til grunn en bruk av bygget på 12 timer fra klokka 06:00-18:00 alle hverdager igjennom hele året. Utenfor denne arbeidstiden gjelder andre settpunkter for bruken av bygget. Dette er bruksmønsteret som var oppgitt fra YIT og som var blitt brukt i simulering i SIMIEN.

I arbeidstiden ble temperaturen i bygget ble satt til å være mellom 21-25 °C, utenom arbeidstiden ble denne satt til å kunne variere mellom 16-29 °C.

På bad og toalett ble temperaturkravet satt til å kunne variere mellom 23-27 °C.

7.1.2 Varmekilder

Som grunnlag for behovsimuleringen ble SINTEF Byggforsk sin Prosjektrapport 42 brukt, som tidligere forklart i kapittel 4. Det ble derfor lagt inn installert belysningseffekt på 5 W/m² for hele bygget. Det ble simulert med all installert effekt på i arbeidstiden, og alt avskrudd utenfor arbeidstid.

Annet elektrisk utstyr ble lagt inn med 6 W/m². Det ble simulert med all installert effekt på i arbeidstiden, og utenfor arbeidstiden ble dette redusert til 15 %.

Personlasten til bygget ble i arbeidstiden satt til å være totalt 100 personer fordelt jevnt over byggets arealer. Hver av disse personene bidrar med en gjennomsnittlig varmeeffekt på 90 W.

Det er som forklart i kapittel 7 side 35 ikke til hensikt i denne rapporten å se på ulike bruksmønstre og varierende belastning. Det er derfor benyttet Prosjektrapport 42 sine standardverdier for å kunne sammenlikne med simuleringen gjort i SIMIEN og for å benytte et standardisert, sammenliknbart grunnlag.

7.1.3 Luft

Infiltrasjonsmengden av bygget ble satt til 0,5 luftskifte per time ved 50 Pascal trykkdifferanse. Ventilasjonsmengden ble, som anbefalt av Prosjektrapport 42, angitt til å være 6 m³/hm² i bygget i arbeidstiden og 1 m³/hm² utenfor arbeidstiden.

7.1.4 Temperatur i grunn

Temperatur i grunnen på bygningens lokasjon ble angitt på tre ulike dybdenivå i EnergyPlus. Grunntemperaturen i umiddelbar nærhet av bygget, grunntemperaturen i øvre lag og en dypere grunntemperatur fra 3-4 m.

Grunntemperaturen i umiddelbar nærhet av bygget er den temperaturen som ytterflatene til gulv og kjellervegger varmeveksler med, og antas å være omtrent 2 °C under innendørs romtemperatur,

som beskrevet i EnergyPlus sin hjelpefil. Da kjeller og parkering har noe lavere temperaturkrav enn resten av bygget, ble denne grunntemperaturen satt til 17 °C.

Grunntemperatur i øvre lag settes til midlere månedlig utelufttemperatur, med en forsinkelse på 3 måneder. Dette vil si at grunntemperaturen i mars settes lik midlere lufttemperatur for januar, som er 1,4 °C.

Dypere grunntemperatur regnes ut til å være midlere årlig lufttemperatur pluss en grad [52]. Årlig gjennomsnittlig lufttemperatur ble regnet ut fra værdata hentet fra YR [53] til å være 8,7 °C. Grunntemperaturen ble dermed satt i EnergyPlus til 9,7 °C.

7.2 Avvik i simulering

Simuleringen av energibehovet til Havutsikt viser store avvik fra simuleringen i SIMIEN som er gjort den 14/02-12 og ligger som vedlegg 5. Det er mange grunner til dette avviket, og i dette underkapittelet skal noen av disse årsakene drøftes.

7.2.1 Byggets utforming

Lagerdelen av bygningen er også utelatt fra simuleringen i SIMIEN. I EnergyPlus er hele bygget simulert, selv om lagerdelen og noen andre soner er satt som uoppvarmet rom, vist i Tabell 4.

I SIMIEN blir bygningen simulert som et kvadratisk bygg og dermed med minimal overflate i forhold til bygningsvolum. Bygningen som er simulert i EnergyPlus er derimot korrekt tegnet opp i SketchUp ut ifra byggets arkitektoniske plantegninger. Dette fører til et betydelig større utvendig areal, og dermed et høyere varmetap fra bygget.

Totalt areal av alle ytterflater i SIMIEN er 2 442 m² som er summert areal av yttervegger, tak og gulv. I EnergyPlus er derimot arealet av ytterflatene summert 3 742 m², som tilsvarer 53 % økning av ytterflatene i forhold til SIMIEN. Også arealet av vinduer og ytterdører er betydelig lavere i SIMIEN enn i EnergyPlus. I SIMIEN er det lagt til grunn 372 m² med vinduer og ytterdører samlet, mens det i EnergyPlus er totalt 528 m² vinduer og 38 m² ytterdører. Dette tilsvarer en arealøkning på 52 %. Arealet til vinduer i EnergyPlus er basert på plantegninger og bildene på bygningens hjemmeside, som nevnt i kapittel 6. Det er sannsynlig å anta at betraktet geometri i EnergyPlus er mer nøyaktig enn arealene oppgitt i rapporten fra SIMIEN.

En annen viktig forskjell på behovsanalysen i SIMIEN og EnergyPlus, er ventilasjonssystemet. SIMIEN simulerer med gjeldende SFP-faktor og varmegjenvinner, mens EnergyPlus for denne typen simulering regner ventilasjonssystemet som ideelt, som tilsvarer en SFP-faktor lik null. EnergyPlus simulerer dessuten rent energibehov uten noen energireducerende tiltak. Dette gjelder også ventilasjonsaggregatets varmegjenvinner. EnergyPlus benytter altså en varmegjenvinnerverdi lik null i motsetning til SIMIEN som simulerer med en varmegjenvinning på 83 %. Dette gjelder imidlertid kun behovsanalysen. Når ventilasjonssystemet blir laget i EnergyPlus fra og med kapittel 8.3, vil reell SFP-faktor, varmegjenvinner og alle andre utslagsgivende faktorer inngå i simuleringsresultatene.

Også på solskjermingen er det forskjeller på SIMIEN og EnergyPlus sin behovsanalyse. SIMIEN simulerer bygget med en solskjermingsfaktor på 0,97 og en solfaktor for vindu og solskjerming på 0,33. EnergyPlus simulerer bygningsbehovet uten noen installert solskjerming. Etter den rene behovsanalysen av bygningen ble det imidlertid også simulert med solskjerming i EnergyPlus.

Etter de rene behovsimuleringene av bygningen ble det så laget et fullstendig ventilasjonssystem og vannbårent oppvarmingssystem med takvarme som varmeavgiver i alle de klimatiserte sonene i bygget, videre omtalt samlet som klimasystem. Takvarme, ventilasjonssystemet, og de klimatiserte sonene er beskrevet i hhv. kapittel 4.2, 6.1 og 7. Resultatene fra SIMIEN viser energibehovet til bygget, og det er derfor naturlig å sammenlikne disse resultatene behovsimuleringen i EnergyPlus. De videre simuleringene med klimasystem som ble gjort i EnergyPlus beregner imidlertid den leverte energien til bygget, og denne vil kunne variere betraktelig med ulike energikilder. Deretter ble bygningen simulert over et år med ulike typer energikilder til oppvarmingssystemet, med værdata fra 2011 som beskrevet i kapittel 6.2. Det ble utført simuleringer med følgende fem ulike energikildesystemer:

1. Direktevirkende elektrisitet
2. Luft-veske varmepumpe og direktevirkende elektrisitet som spisslast
3. Vann-veske varmepumpe med energibrønn og direktevirkende elektrisitet som spisslast
4. Solfanger og luft-veske varmepumpe og direktevirkende elektrisitet som spisslast
5. Solfanger og vann-veske varmepumpe med energibrønn og direktevirkende elektrisitet som spisslast

Etter en analyse av energisystemets korttidsdynamikk ble det også sett på de ulike energisystemene uten nattsinking av innetemperaturen i bygningen. Dette vil bli forklart og illustrert nærmere i kapittel 8.3.3.

En annen forutsetning som er gjort i simuleringen i EnergyPlus, og som er viktig å være klar over ved vurdering av resultatene, er at bygget er simulert uten noe forbruk av varmt tappevann. Dette er gjort siden det i plantegningene av bygningen ikke er indikert noen dusjer eller andre tappevannssteder enn servanter på toalettene. Siden det kun er servanter som forbruker varmt tappevann er det antatt at forbruket er svært lite, og det ble derfor valgt å se bort i fra varmtvannsforbruk i sin helhet da dette ville være av ubetydelig betydning, og dessuten ville være gjenstand for stor usikkerhet i både forbruk og oppvarmingskilde.

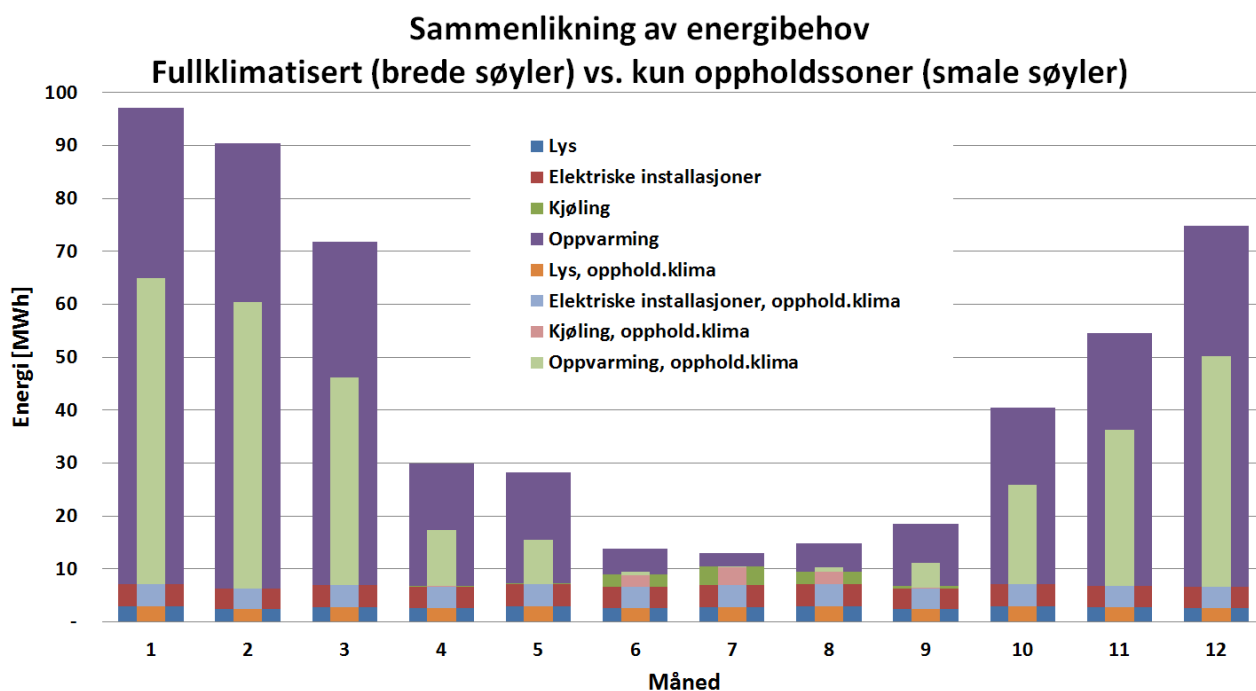
8 Resultater

I dette kapittelet vil resultatene fra simuleringene i EnergyPlus presenteres. De ulike simuleringene som vil bli presentert er:

- **8.1 - Behovsimulering.** Her vil det bli presentert to ulike simuleringer av bygningens energibehov uten energibegrensende tiltak, og ideelle luft- og oppvarmingssystemer benyttes
 - **8.1.1 – Behovsimulering med solavskjerming.** Det vil her presenteres en simulering som delkapittel over, men med utvendig solavskjerming installert ved bygningens vinduer.
- **8.2 - Kjølebehov.** Det blir i dette kapittelet sett nærmere på kjølebehovet til bygget.
- **8.3 - Sammenlikning med ulike energikilder.** Det blir i dette kapittelet presentert resultater der simuleringssmodellen har fått takvarme og klimaanlegg i alle rom, som beskrevet i kapittel 4.2. I underkapitlene vil bygningen bli simulert med ulike energikilder knyttet til ventilasjons- og oppvarmingssystemet.
 - **8.3.1 – Direktevirkende elektrisk oppvarming.** Det vil her bli presentert energibruken til bygget med kun direktevirkende elektrisitet som oppvarmingskilde. Dette vil være prinsipielt likt som ved bruk av fjernvarme.
 - **8.3.2 - Luft-veske varmpumpe.** Det vil her bli presentert energibruken med luft-veske varmpumpe som grunnlast og elektrisitet som spisslast
 - **8.3.4 - Vann-veske varmpumpe.** Det vil her presenteres energibruken med vann-veske varmpumpe som grunnlast, der energibrønn benyttes som varmekilde, og elektrisitet som spisslast.
 - **8.3.7 - Solfanger.** Det vil her presenteres energibruken med solfanger i samme oppvarmingssystem som varmpumpe og elektrisitet.

8.1 Behovsimulering

Det ble foretatt to ulike simuleringer i EnergyPlus for å finne energibehovet til bygningen. Det ble i begge tilfellene simulert med et ideelt luftsystem med verdier fra simuleringen i SIMIEN og Prosjektrapport 42, forklart i kapittel 4. I første simulering ble alle rom i bygget tilført friskluft fra ventilasjonssystem og luft fra infiltrasjon tilsvarende kravspesifikasjoner, mens det i den andre simuleringen kun var rom beregnet for varig opphold som hadde ventilasjonssystem. Dette førte naturlig nok til en senkning av årlig energibehov for bygget, fordi varmetap fra ventilasjonsluft ble unngått i uventilerte rom. Det er verken krav eller nødvendig å fullklimatisere hele bygget, siden utskifting av luft på lagerrom og lignende rom kan løses ved bruk av overstrømningsventiler og skapt trykkdifferanse fra rom med tilluft. Forskjellen i energibehov fra fullklimatisert bygg og der kun oppholdssoner ble klimatisert er allikevel interessant å være klar over, og kan være nyttig informasjon ved prosjekteringsfasen. I Figur 35 er denne forskjellen fremstilt grafisk, og det er her svært tydelig at det er stor forskjell i energibehov dette tiltaket utgjør. Fra å ventilere alle rom i bygget til kun de rom som er beregnet for varig opphold reduseres energibehovet fra 547 494 kWh til 358 246 kWh, altså en differanse på hele 189 247 kWh årlig.



Figur 35 - Sammenlikning av energibehovet til Havutsikt med alle rom klimatisert (brede søyler) og kun oppholdsrom klimatisert (smale søyler)

8.1.1 Solavskjerming

Neste simulering etter den rene behovsanalysen omtalt i kapittel 8.1 var å kartlegge hvilken effekt utvendige persienner på alle vinduene i bygget kunne ha. Som et utgangspunkt for sammenlikning ble det først simulert årlig energibehov for bygget med persienne nede hele året. Dette førte til et energibehov på 390 185 kWh/år, en årlig økning i energibehov på 31 939 kWh i forhold til tilsvarende simulering med klimatiserte oppholdsrom.

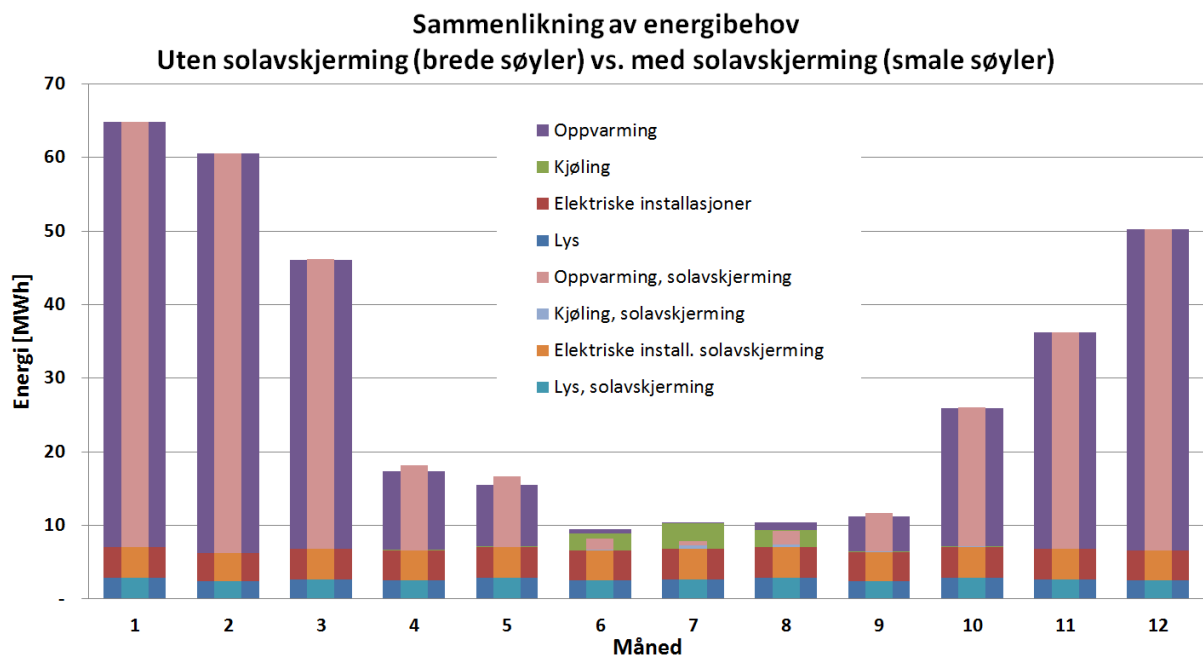
Det ble gjort simuleringer med ulike reguleringssystemer til persiennene, og det ble så valgt et styringssystem på grunnlag av disse simuleringene. Det styringssystemet som var mest gunstig i et energibehovsperspektiv, var en behovsstyrt regulering på både innetemperatur og belysningsstyrke fra sola på vindusflaten. Når innvendig romtemperatur er over 23 °C og sola stråler med over 5 W/m² mot vinduet, senkes persiennene utenfor vinduene på bygget. Med denne styringen ble totalt energibruk for bygget over året 356 026 kWh, en årlig reduksjon på energibehovet til bygget på 2 221 kWh¹ i forhold til energibehovet uten solavskjerming. Denne reguleringsmetoden for persiennene sikrer maksimalt innstrålt effekt fra sola når det er oppvarmingsbehov i bygget, men sørger for solavskjerming når dette ikke er nødvendig. Resultatene er vist grafisk i Figur 36.

Det er dessuten interessant å se at i forhold til kontinuerlig solavskjerming øker energibehovet til kjøling av bygget fra 1 270 til 1 469 kWh/år fordi det kommer noe innstrålt effekt fra sola når det er kjølebehov. Energien til oppvarming minker derimot fra 369 979 til 331 407 kWh/år, som er

¹ Det ble også gjort tilsvarende simulering med Oslo-klima, og effekten av solavskjerming ble da i størrelsesorden 10 ganger større enn når det ble gjort simulering der bygget var i Mandal

betraktelig større differanse enn økningen i kjølebehovet, og bidrar dermed til en netto energigevinst.

Det valgte styringssystemet for solavskjermingen er reguleringsmessig fullt mulig, og synes dessuten å være fornuftig. Når det er oppvarmingsbehov i bygningen og solinnstråling virker sjenerende, vil brukere kunne skjerme seg ved innvendig solavskjerming istedenfor det utvendige, som er mer energimessig gunstig.



Figur 36 - Sammenlikning av energibehovet til Havutsikt uten solavskjerming (brede søyler) og med solavskjerming med styringssystem (smale søyler)

8.1.2 Diskusjon energibehov

Samtlige simuleringer senere i rapporten er gjort med utvendig solavskjerming som forklart i kapittel 8.1.1. Energiforbruket til bygningen i simuleringen med solavskjerming vil derfor bli brukt som sammenlikningsgrunnlag for energibruk med installert klimasystem.

Tabell 5 - Tabell over energibehov for ulike simuleringer

	Totalt energibehov [kWh/år]	Energibehov per m ² totalt bygningsareal [kWh/m ² år]	Energibehov per m ² klimatisert areal [kWh/m ² år]
Energibehov fullklimatisert bygg	547 494	183,0	183,0
Energibehov kun oppholdssoner klimatisert	358 246	119,8	174,3
Energibehov kun oppholdssoner klimatisert og installert utvendig solavskjerming med styring på innetemperatur og solinnstråling	356 026	119,0	173,2

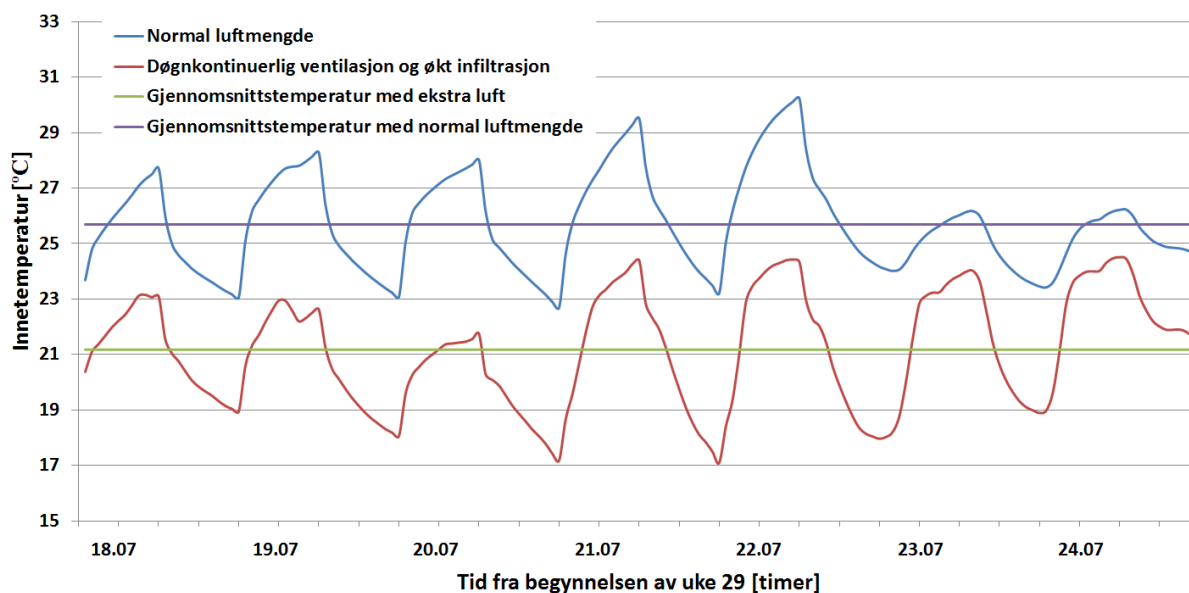
8.2 Kjølebehov

Behovsimulering med installert solavskjerming viser at bygget har et kjølebehov på 1 469 kWh i året for å innfri de komfortkravene til lufttemperatur som er satt. Dette er et svært lavt behov, størrelsen til bygget tatt i betraktning, og det ble derfor forsøkt simuleringer med passive tiltak for å eliminere kjølebehovet. Figur 37 viser temperaturforløpet i uke 29 for et rom i 2. etasje med og uten ekstra lufting. Den blå kurven viser temperaturforløpet uten ekstra tiltak som simulert tidligere, mens den røde kurven viser temperaturforløpet over uken der det er gjort to samtidige tiltak:

- 1) Døgnkontinuerlig ventilasjon
- 2) Noe økt infiltrasjon

Punkt nummer to vil i praksis være naturlig ventilering av bygget, enten ved bruk av lufteventiler eller åpning av vinduer. Denne simuleringen indikerer godt den effekten slike tiltak vil ha. Temperaturen senkes omtrent 4,5 °C, og det er derfor svært sannsynlig at dette bygget vil klare seg helt uten kjøleaggregat installert.

Lufttemperatur uke 29 for sone TZ3Kontorlandskap



Figur 37 - Temperaturforløp med og uten ekstra luftmengder i uke 29 (16.-22. juli)

Gjennomsnittstemperaturen med normalstyrt klimaanlegg er 25,7 °C, mens den med ekstra tiltak er 21,2 °C. Tilsvarende forløp gjelder også for andre rom i bygget.

Det er imidlertid viktig å merke seg at disse simuleringene er gjort med standardverdier for blant annet lys og elektriske installasjoner, og den bruken av bygget som vil gjelde i virkeligheten kan være svært ulik. Det bør derfor gjøres tilsvarende simuleringer der det blir fokusert på realistiske verdier og ulik brukeratferd. Belastningen fra IT-rom er heller ikke simulert, men siden dette ligger i utkanten av oppholdssonene er det antatt at dette vil ha minimal betydning.

På grunnlag av resultatene ovenfor vil de videre simuleringene bli gjort uten kjøleaggregat installert i bygget.

8.3 Sammenlikning med ulike energikilder

Simuleringsmodellen av kontorbygget har heretter blitt utvidet i forhold til behovsanalysen i kapittel 8.1. Alle klimatiserte soner i bygget¹ har fått installert tekniske installasjoner som takvarme, forklart nærmere i kapittel 4.2, og ventilasjonssystem med variabel luftmengde. Energien til ventilasjonssystemet vil reduseres betraktelig i forhold til behovsanalysen fordi ventilasjonssystemet nå har en roterende varmegjenvinner, mens energibruken vil øke noe fordi systemet ikke lenger er ideelt, men ha tap i blant annet kanalnett og enkeltkomponenter.

¹ Oversikt over klimatiserte soner er gitt i Tabell 4

I simuleringsprogrammet EnergyPlus er bygget simulert med følgende ulike energikilder til oppvarming av bygget:

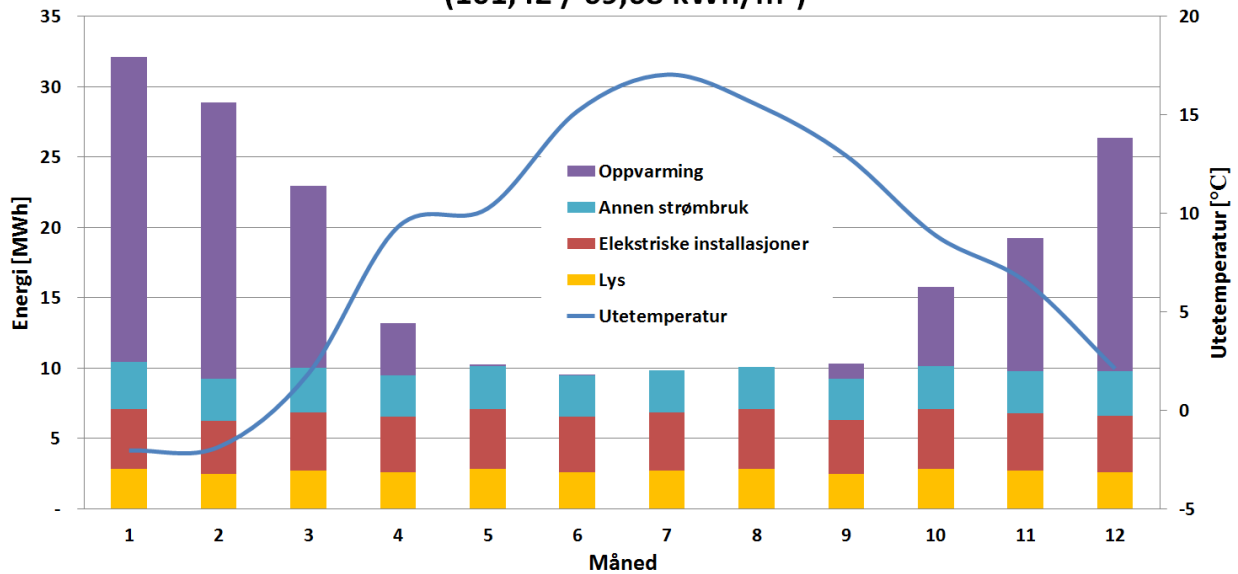
1. Direktevirkende elektrisitet
2. Luft-veske varmepumpe + elektrisitet som spisslast
3. Vann-veske varmepumpe med energibrønn + elektrisitet som spisslast
4. Solfanger + luft-veske varmepumpe + elektrisitet som spisslast
5. Solfanger + vann-veske varmepumpe med energibrønn + elektrisitet som spisslast

Direktevirkende elektrisitet er ikke lenger tillatt som eneste energikilde til oppvarming av bygg etter byggeforskrift TEK10. Direktevirkende elektrisitet og fjernvarme har ingen betydningsfulle forskjeller i systemvirkningsgrad, effektkostnad og regulerbarhet, og anses derfor som sidestilt i vurdering av energibruken til bygget. Følgelig kan resultater for energibruken til direktevirkende elektrisitet til oppvarming overføres tilsvarende for fjernvarme. Energibruken til EL-spesifikt utstyr er separert fra energibruk til ren oppvarming, slik at den energien som er brukt til oppvarming direkte kan overføres til energi til fjernvarme. EL-spesifikt utstyr er utstyr som må ha elektrisitet for å fungere, og dette kan ikke erstattes av andre energikilder som for eksempel varmepumpe, olje eller gass. Eksempel på EL-spesifikt utstyr er datamaskiner, kopimaskiner, kaffetraktere, vifter, pumper og lignende. I figurer og tekst videre i rapporten omtales den energi og effekt som knyttes til direktevirkende elektrisitet kun som EL.

EL-spesifikk energibruk er vist i Figur 38 som *Lys, Elektriske installasjoner og Annen strømbruk*¹. Annen strømbruk er all annen strøm til bygget utenom lys og elektriske installasjoner, og er blant annet energi brukt til drift av vifter, pumper, ohmske tap og lignende. All EL-spesifikk energibruk er lik uavhengig av varmekilde for oppvarming av bygget og disse er derfor ikke diskutert videre ved sammenlikning av de ulike energikildene til bygget.

¹ Lys og elektriske installasjoner er separert ut fordi effekten til disse er angitt som standardverdier fra Prosjektrapport 42 og bør vurderes deretter

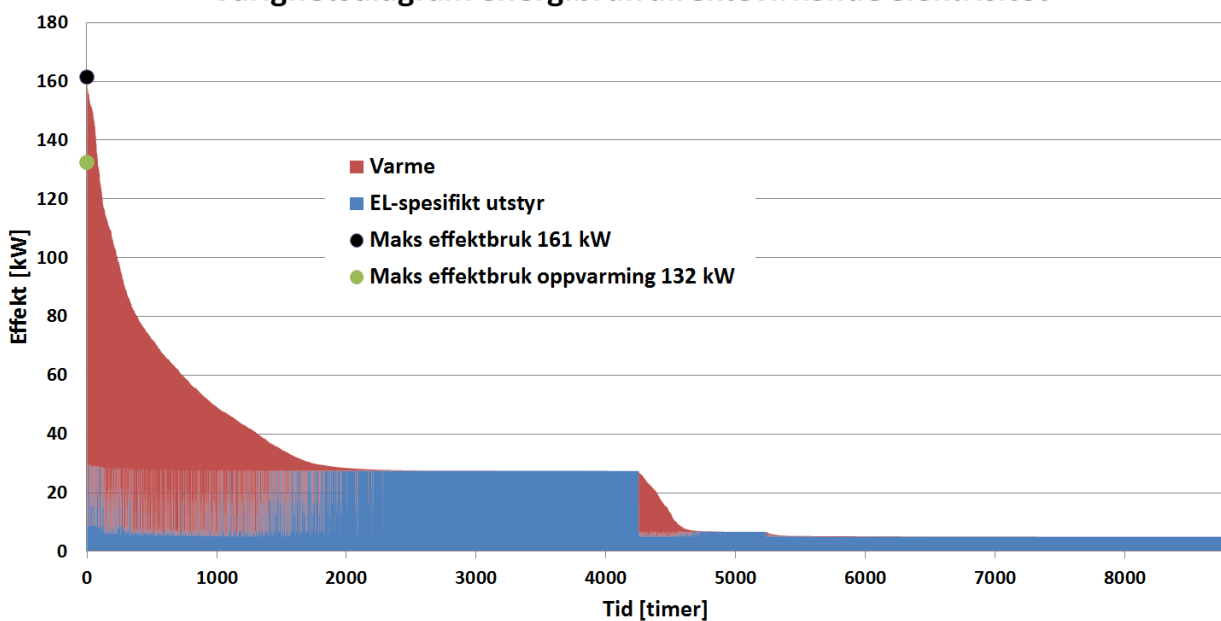
Energibruk med klimasystem (101,42 / 69,68 kWh/m²)



Figur 38 - Totalt energibruk med elektrisitet som energikilde

Figur 39 viser et varighetsdiagram for både oppvarming og EL-spesifikk energibruk. Her kan en se at samtidighet mellom EL-spesifikt utstyr og effekt til oppvarming utgjør en differanse på 29 kW som må tas hensyn til ved kabeldimensjonering. Denne rapporten vil ikke gå nærmere inn på dette, og videre i rapporten vil kun behovet til oppvarming bli vurdert. Arealet av det blå feltet på Figur 39 er altså energien brukt til lys, pumper, vifter og annet EL-spesifikt utsyr. I varighetsdiagrammene senere i rapporten er EL-spesifikk energibruk tatt vekk, siden dette ikke er interessant for vurderingene gjort i denne sammenheng. Dette kan imidlertid være interessant for andre vurderinger, for eksempel ved dimensjonering av elektriske kabler til bygget.

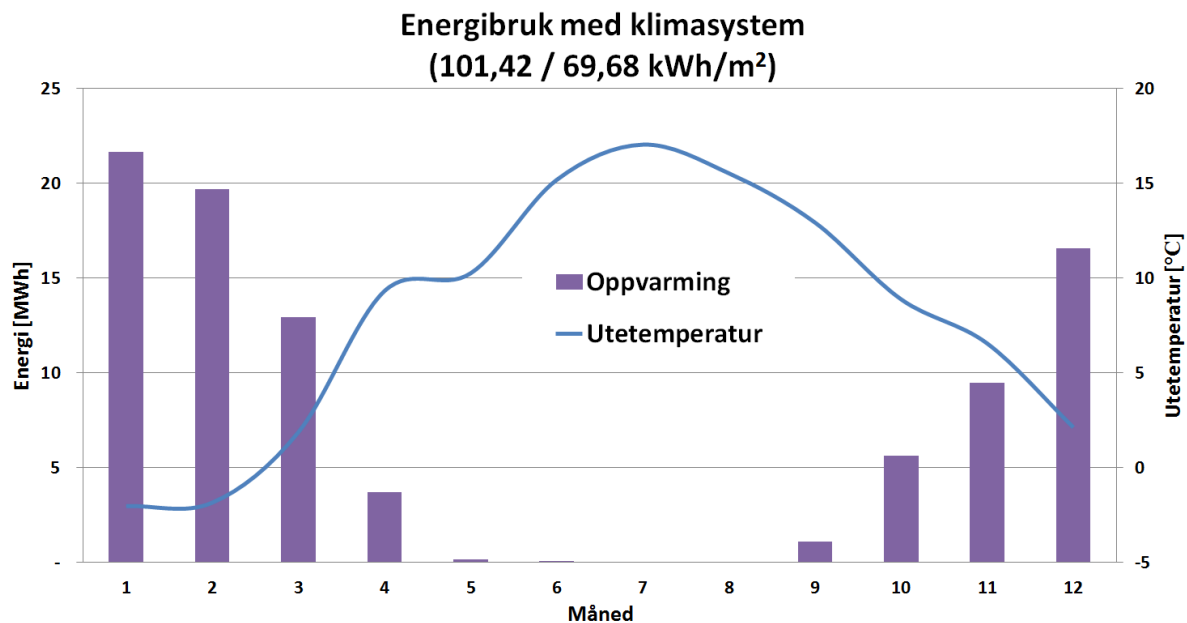
Varighetsdiagram energibruk direktevirkende elektrisitet



Figur 39 - Varighetsdiagram for total energibruk til bygget med direktevirkende elektrisitet som energikilde. Rødt indikerer energien fra elektrisitet brukt til oppvarming, mens blått indikerer energi brukt til EL-spesifikt utstyr

8.3.1 Direktevirkende elektrisk oppvarming

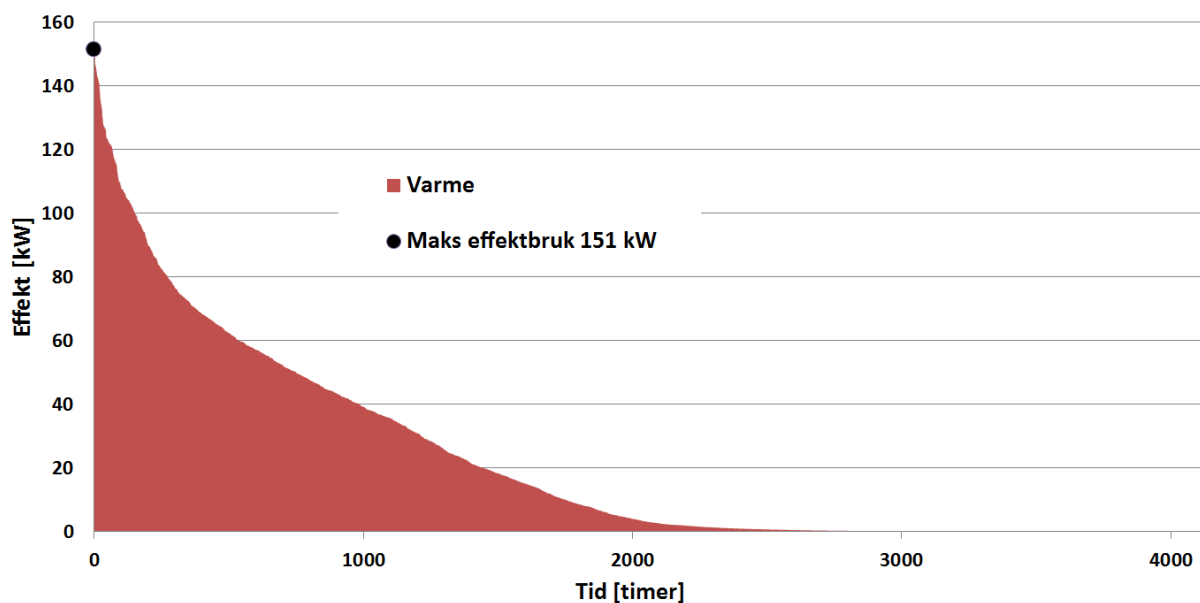
Som utgangspunkt for analyse av energibruken til kontorbygget ble det gjort simulering med kun direktevirkende elektrisitet som energikilde til oppvarming av det vannbårne oppvarmings-systemet. Dette vil være prinsipielt helt likt som ved bruk av fjernvarme, som tidligere forklart i diskusjonen i kapittel 8.3. I Figur 40 er energibruken til oppvarming av bygget fra takvarme og ventilasjonssystem vist for hver måned i et søylediagram sammen med midlere utetemperatur for stedet. Energibruken ble simulert til å være 101,42 kWh/m²år for de klimatiserte sonene, eller 69,68 kWh/m²år hvis energibruken deles på hele bygningens areal.



Figur 40 - Energibruk til oppvarming av takvarme og ventilasjonsluft med elektrisitet som energikilde

Varighetsdiagrammet for oppvarming er vist i Figur 41. Maksimal effektbruk er 151 kW, men det gjøres oppmerksom på at dette ikke er maksimal effektbruk for DUT, forklart i kapittel 4.3, som det er vanlig å dimensjonere installert effekt for. Dette er simulert maksimalt effektbruk med en oppløsning på timenivå, og er følgelig høyere enn effektbruk ved DUT.

Varighetsdiagram oppvarming direktevirkende EL



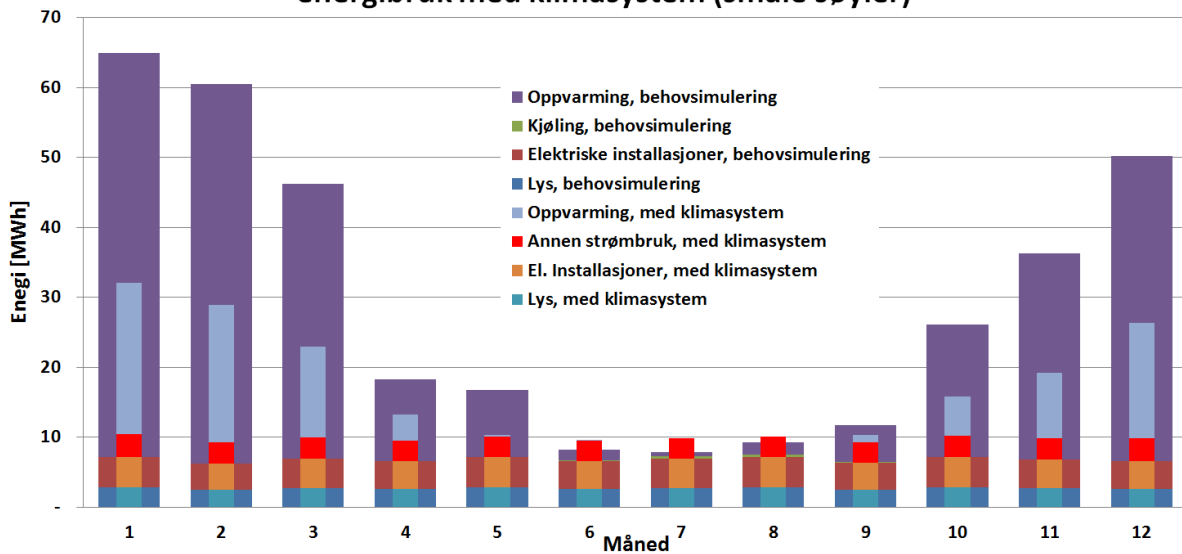
Figur 41 - Varighetsdiagram for oppvarming med elektrisitet som energikilde

8.3.1.1 Diskusjon direktevirkende elektrisitet

Som vist i Figur 42 er det svært stor forskjell på energibehovet beskrevet i 8.1.1 og energibruken der simuleringmodellen har fått takvarme og ventilasjonssystem. Varmegjenvinner, systemtap, vifter og pumper er eksempler på elementer som utgjør disse forskjellene. Energibruken i månedene uten oppvarmingsbehov øker grunnet posten *Annen strømbruk*, men for samtlige andre måneder er energibruken sterkt redusert. Lys og elektriske installasjoner er like for behovsimuleringen og for simuleringen med klimasystem, og er synlig som de to nederste søylene for både de brede og smale søylene. De røde smale søylene over er den EL-spesifikke energibruken¹ med klimasystem. Den lilla øverste brede søylen er energibehovet til oppvarming, mens den lyseblå øverste smale søylen er energibruken til oppvarming med klimasystem i bygget. Denne simuleringen vil bli benyttet som referanse ved sammenlikning senere i rapporten.

¹ Forklart i kapittel 8.3

Sammenlikning av energibehov (brede søyler) vs. energibruk med klimasystem (smale søyler)



Figur 42 - Sammenlikning av energibehov og energibruk

8.3.2 Luft-veske varmpumpe

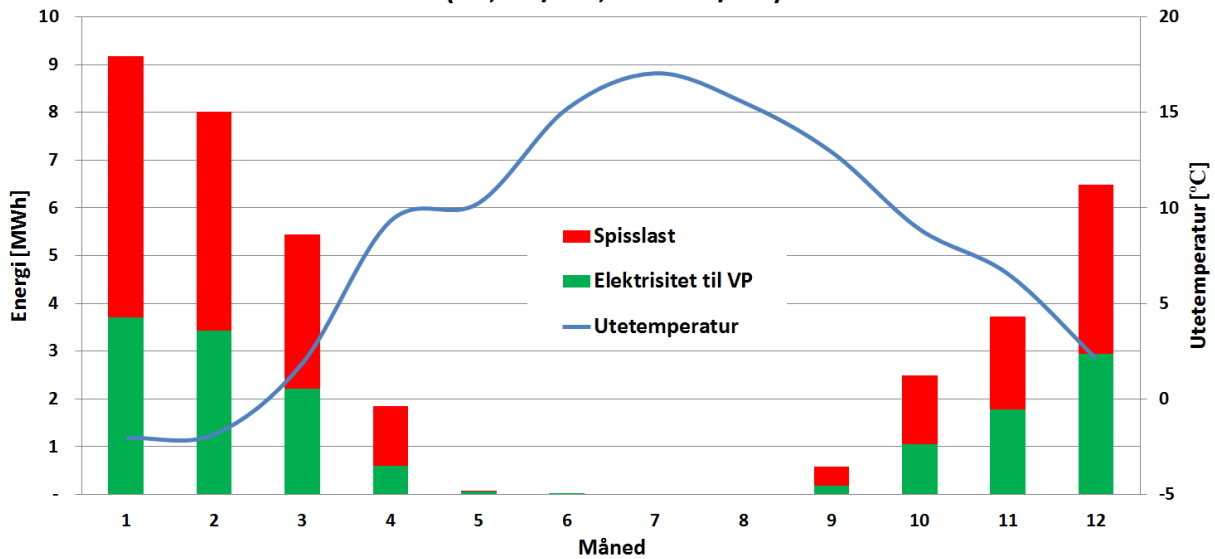
Til simulering for luft-veske varmpumpe ble det tatt utgangspunkt i et varmpumpesystem av typen HPS 81 BL [29] med en nominell COP på 3,9 og varmekapasitet på 57,41 kW, levert av SGP. Grunnen til at denne ble valgt er at dette var varmpumpen som passet best til det effekt- og energibehovet bygningen har i de katalogene som ble gjennomlest. Bygget ble nå simulert med lik temperaturstyring som tidligere, der temperaturen ble senket utenfor arbeidstid med opptil 5 °C. Etter denne simuleringen ble det så gjort en simulering til, der innnetemperaturen i bygget ble holdt på et konstant nivå over hele døgnet.

8.3.2.1 Med nattsenkning

Simulering av bygningen med nattsenkning av innnetemperaturen resulterte i en energibruk per måned som vist i Figur 43 og et varighetsdiagram som vist i Figur 44. En ser her at varighetskurven er svært bratt, med et maksimalt effektbehov på 151 kW, og totalt energibruk på 90 960 kWh/år. Varmepumpen leverer totalt 69 072 kWh/år, som tilsvarer en dekningsgrad på 76 %. Brukstiden¹ til varmpumpen blir 1 203 timer, noe som er svært lavt i forhold til anbefalt verdi på 3 000-5 000 timer for varmpumper som angitt i kapittel 4.3.

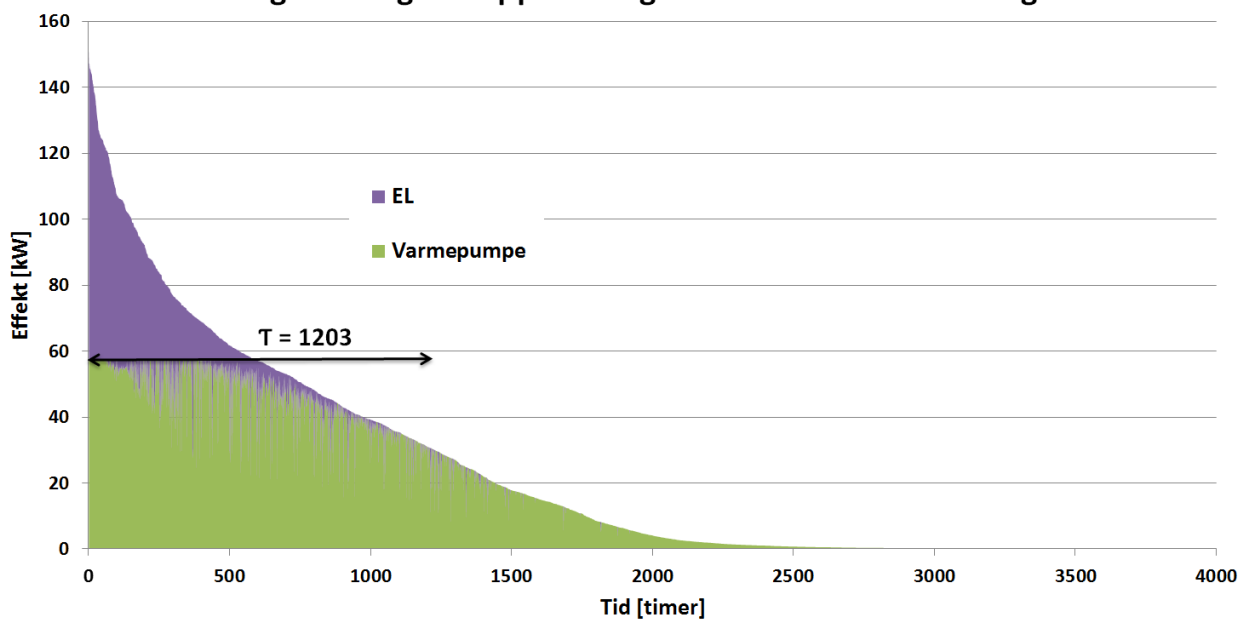
¹ Brukstiden er definert i kapittel 4.3

Energibruk med luft-veske VP, nattsenking av innetemperatur (80,72 / 55,46 kWh/m²)



Figur 43 - Energibruk til oppvarming med luft-veske varmepumpe og elektrisitet til spisslast

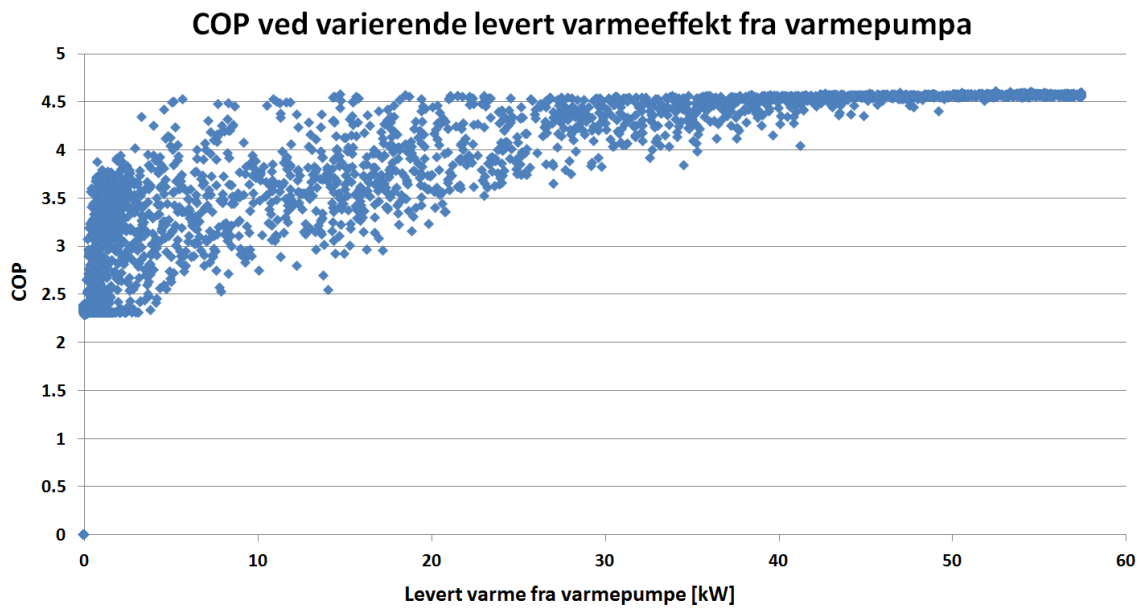
Varighetsdiagram oppvarming luft-veske VP nattsenking



Figur 44 - Varighetsdiagram for luft-veske varmepumpe med nattsenking av innetemperatur. Installert nominell effekt 57,41 kW, brukstid 1203 timer

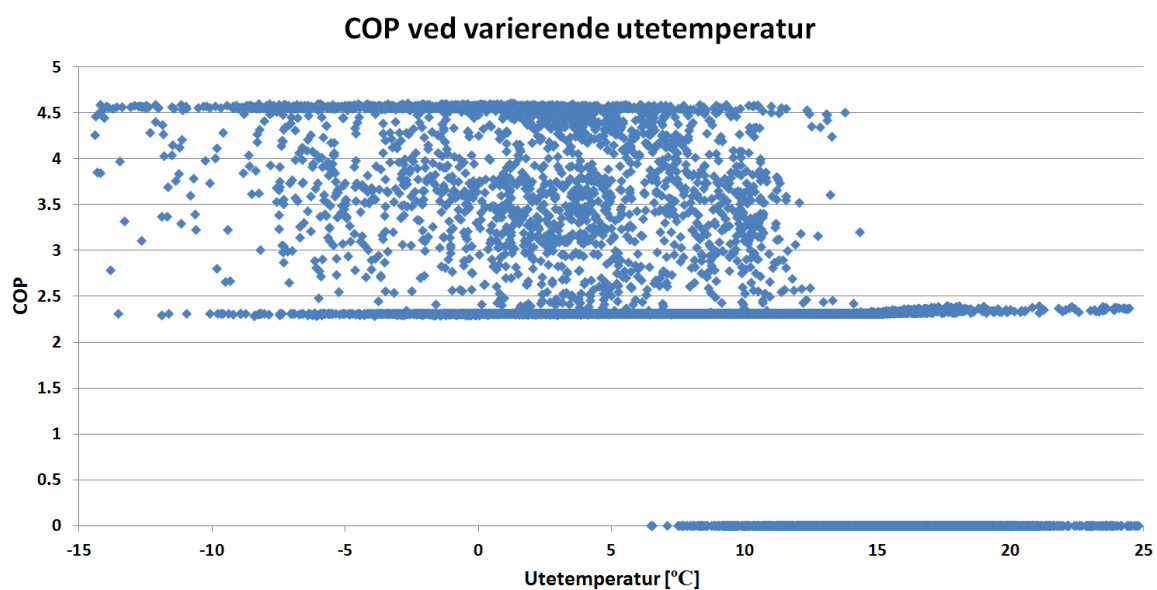
I Figur 45 er COP til varmepumpa tegnet opp som funksjon av levert varme fra varmepumpa. Det er her vist at varmepumpa oppnår maksimal verdi på COP lik 4,6 ved høy belastning opp til maksimal verdi. Ved dellast varierer verdien for COP mellom 4,6 og 2,3. Grunnen til lavere COP når varmepumpa kjører på dellast er flere, der blant annet styring og type kompressor er avgjørende faktorer. Det er også verdt å merke seg at maksimal COP på 4,6 er høyere enn den nominelle verdien på 3,9 som er oppgitt i databladet for varmepumpa. Grunnen til dette er at den nominelle verdien er for en gitt tilstand for utelufts temperatur, og temperaturen på avgitt varme

fra kondensator. Det vannbårne systemet i bygningen benytter en maksimaltemperatur på 55 °C, og dette i sammenheng med en høy midlere utetemperatur resulterer i at varmepumpa får gode betingelser og dermed ofte opererer med høyere verdi på COP enn den nominelle.



Figur 45 - COP ved varierende levert varme fra varmepumpa

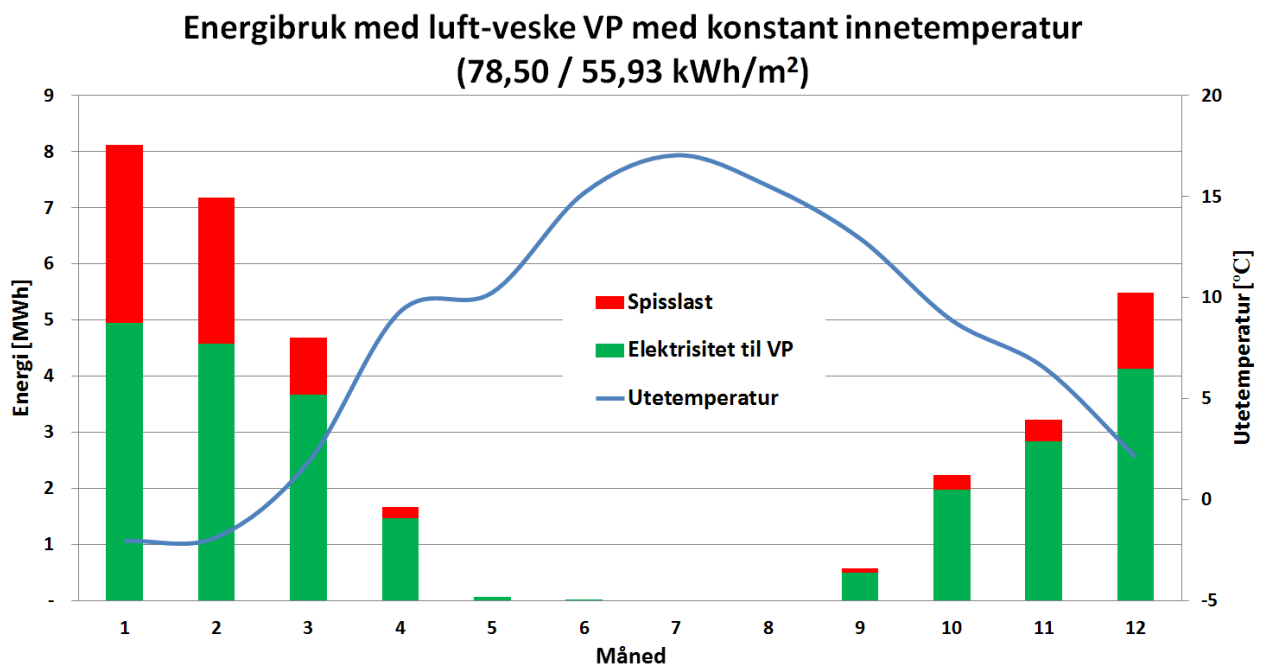
Figur 46 som viser COP til varmepumpa som en funksjon av utetemperaturen viser at det ikke er en lineær sammenheng mellom utetemperaturen og COP på varmepumpa. Grunnen til dette er at innnetemperaturen i bygningen har nattsinking utenfor arbeidstid, og dette fører til at det er nødvendig med maksimalt effektbehov selv ved relativt høye utetemperaturer når bygningen skal varmes opp ved begynnelsen av arbeidsdagen. Dette vil bli forklart nærmere i diskusjonen i kapittel 8.3.3.



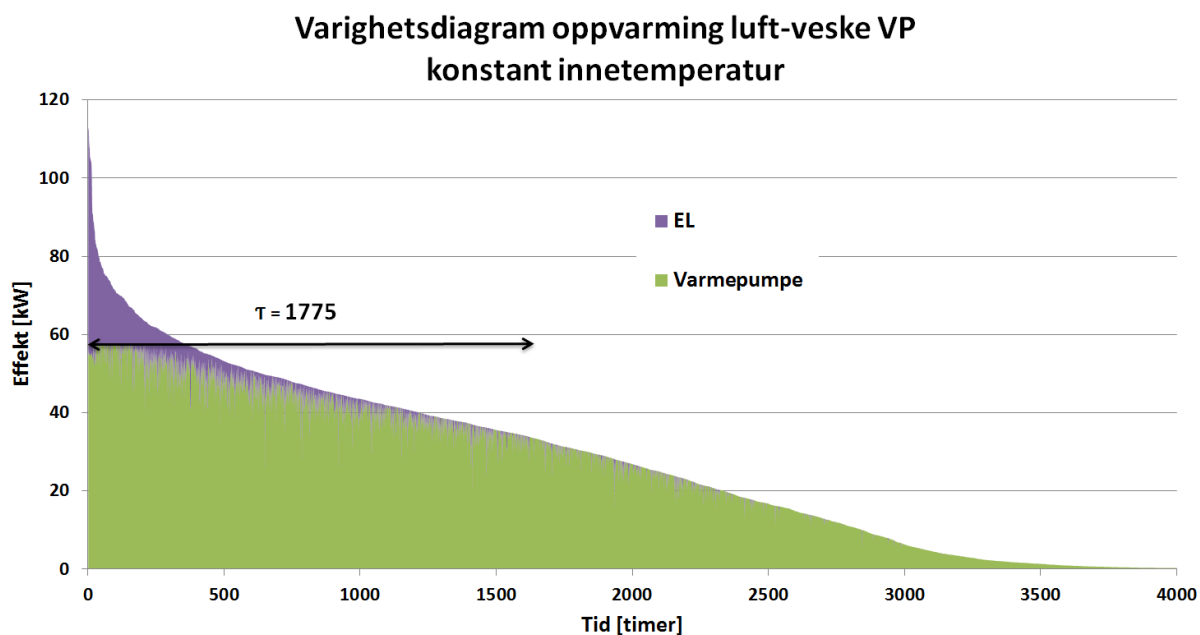
Figur 46 - COP ved varierende utetemperatur

8.3.2.2 Konstant innetemperatur

Det ble så gjort tilsvarende simulering som i kapittel 8.3.2.1, med den forskjellen at innetemperaturen i bygningen ble holdt konstant over hele døgnet. At innetemperaturen i de klimatiserte sonene ble holdt konstant til 21 °C hele døgnet fører naturlig nok til en endring i energibehovet til bygget, siden temperaturdifferansen mellom innetemperatur og utetemperatur nå vil være større utenom arbeidstiden, da innetemperaturen i forrige simulering var inntil 5 °C lavere. Energibruken per måned er vist i Figur 47 og varighetsdiagrammet er vist i Figur 48. Det er her brukt helt lik varmepumpe som i kapittel 8.3.2.1 ovenfor, dette er gjort for å kunne se hvilken effekt nattsenkning av innetemperaturen i bygget har. Resultatene av denne simuleringen blir et maksimalt effektbehov på 113 kW, og totalt energibruk på 110 933 kWh/år. Varmepumpen leverer totalt 101 880 kWh/år, som tilsvarer en dekningsgrad på hele 92 %. Brukstiden til varmepumpen blir nå 1 775 timer. En brukstid på 1 775 timer er lavere en anbefalt verdi i kapittel 4.3, som viser at varmepumpen går mye på dellast.

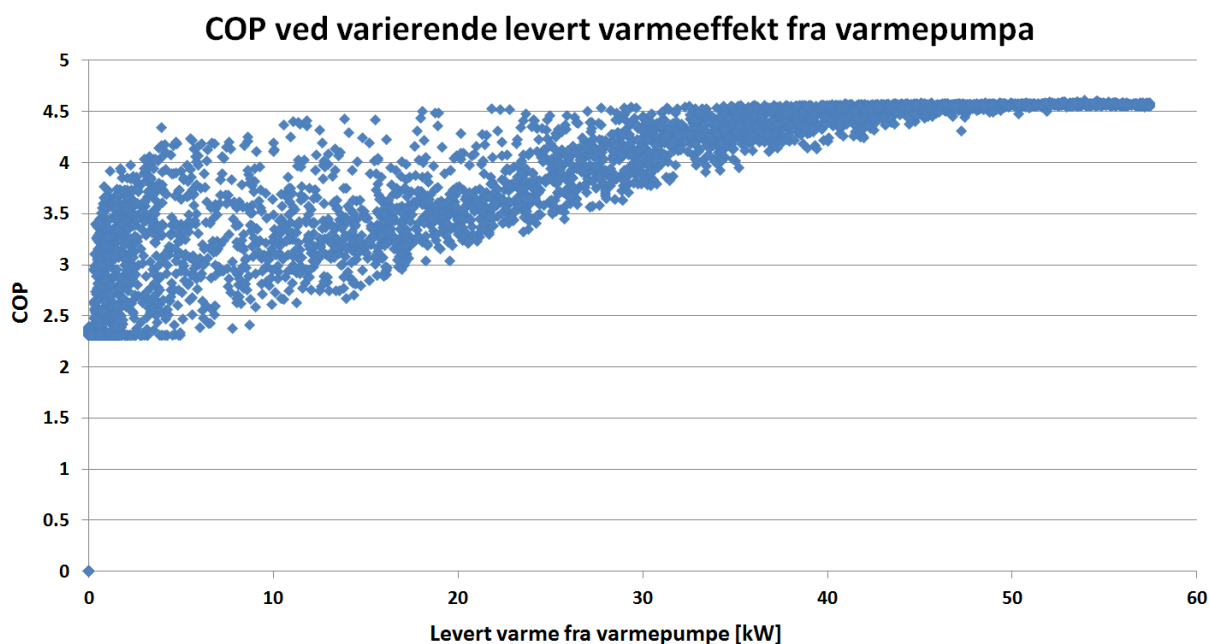


Figur 47 - Energibruk til oppvarming med luft-veske varmepumpe og konstant innetemperatur over døgnet

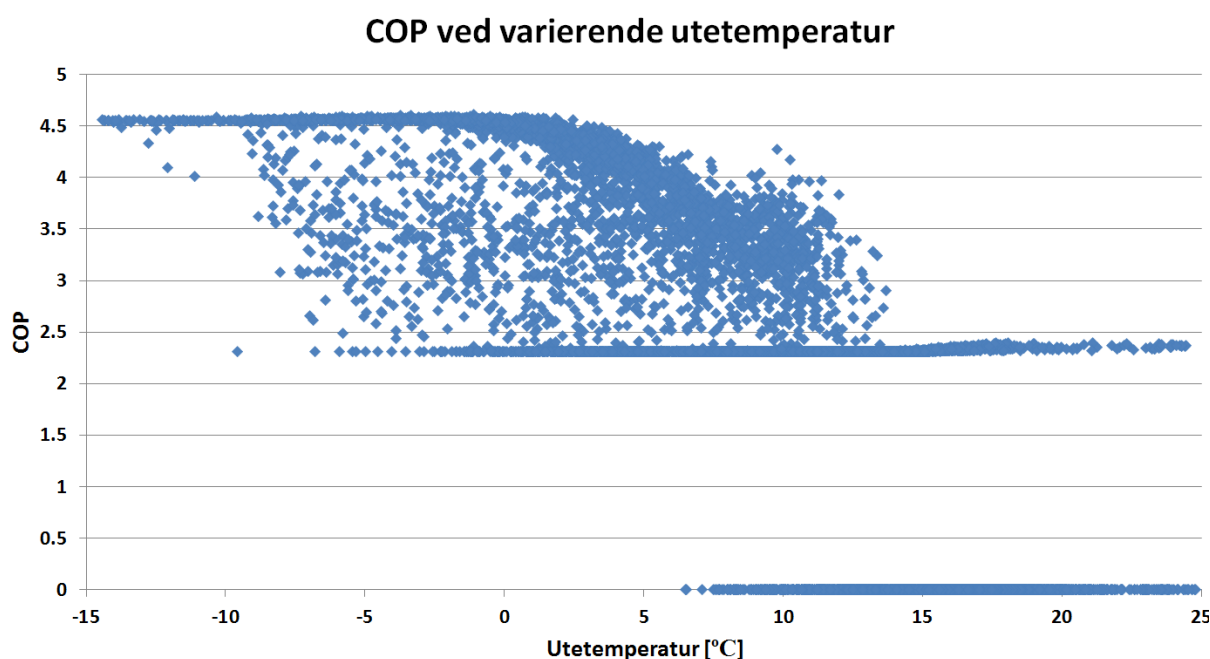


Figur 48 - Varighetsdiagram for luft-veske varmepumpe uten nattsenking av innetemperatur. Installert nominell effekt 57,41 kW, brukstid 1775 timer

Figur 49 som viser COP for varmepumpa som en funksjon av levert varmeeffekt, skiller seg ikke vesentlig fra den tilsvarende figuren da bygningens innetemperatur ble styrt med nattsenking, som tidligere vist i Figur 45. Det er imidlertid en høyere konsentrasjon i nedre region av plottet når varmepumpa kjører på dellast. At det forholder seg slik kan forklares ved å se på Figur 50 som viser COP som en funksjon av utetemperaturen. Her er det vesentlig forskjell fra tilsvarende figur der innetemperaturen ble styrt med nattsenking, vist i Figur 46. Den nedre horisontale linjen i plottet som markerer den minste effekten varmepumpa kan levere, gjør seg nå gjeldende i vesentlig grad fra omtrent $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, mens den i tidligere simulering med nattsenking gjorde seg gjeldende ved omtrent $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. I Figur 50 er også en mye mindre spredning av plottene, og en mer markert trend for hvilken belastning varmepumpa har ved de ulike utetemperaturer. Grunnen til dette er at varmepumpa nå har en mer stabil drift, som vil bli forklart nærmere i 8.3.3. Varmepumpa har nå en høyere brukstid, men vil samtidig nettopp av denne grunn gå mer på dellast siden oppvarmingsbehovet med konstant innetemperatur oftere er moderat i forhold til de ekstremverdier bygningen vil ha med nattsenking av innetemperaturen.



Figur 49 - COP ved varierende levert varmeeffekt fra varmepumpa

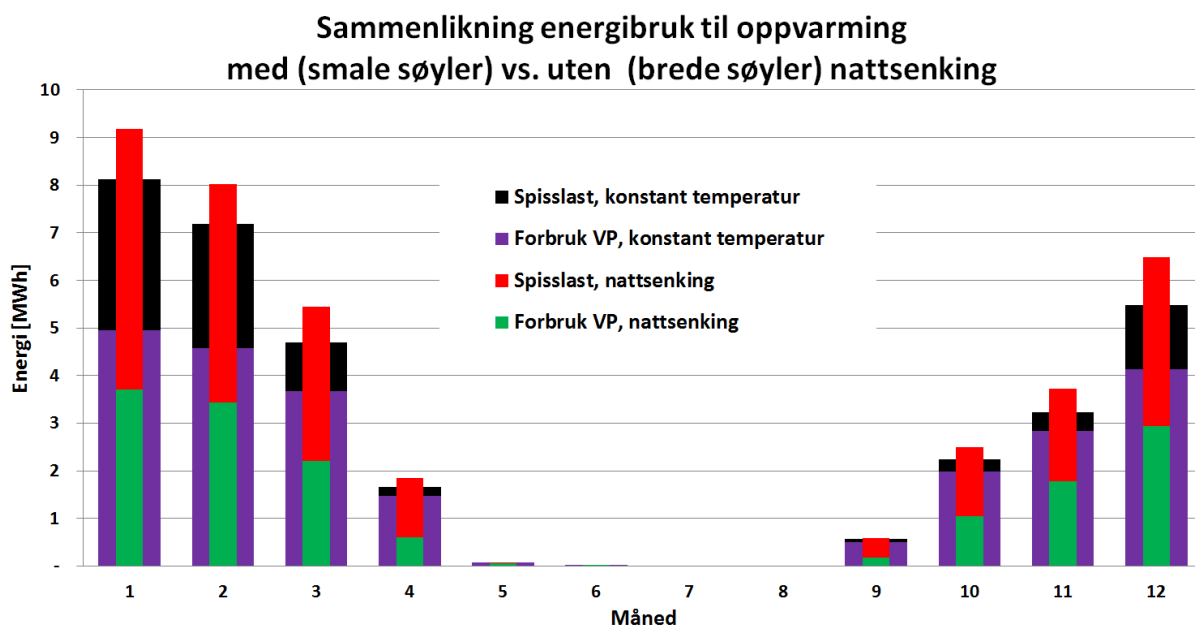


Figur 50 - COP ved varierende utetemperatur

8.3.3 Diskusjon luft-veske VP

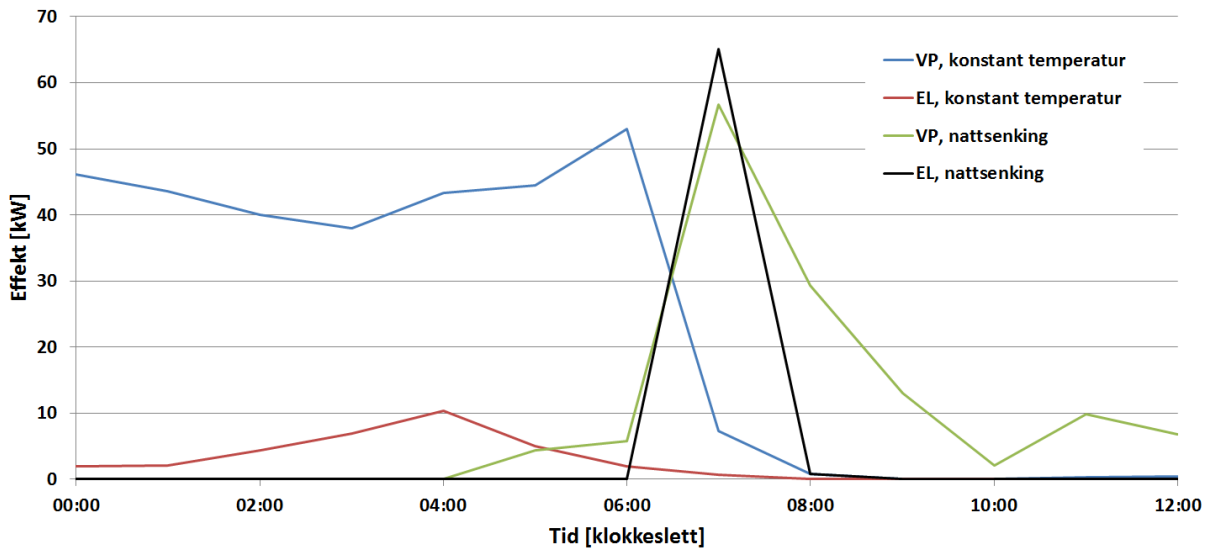
Figur 51 viser energibruken til oppvarmingssystemet der luft-veske varmepumpe benyttes som grunnlast og direktevirkende elektrisitet benyttes som spisslast. I Figur 51 er det benyttet likt oppvarmingssystem i de to ulike simuleringene, men styringen er ulik. De brede søylene viser energibruken der innetemperaturen tillates å synke med opptil 5 °C utenom arbeidstiden, mens de smale søylene viser energibruken i simuleringen der innetemperaturen blir holdt på konstant 21 °C over hele døgnet. Det kan sees i Figur 51 at det å ha konstant innetemperatur fører til en økning i

brukt varmeenergi i bygget. Økningen er på 19 973 kWh, noe som er en naturlig konsekvens av at temperaturdifferansen mellom innnetemperaturen i bygget og utetemperaturen øker for store deler av døgnet. En annen konsekvens er at dynamikken til oppvarmingssystemet blir dempet. I første simulering etter nattsenkingsperioden var over og varmepumpen enten hadde vært avskrudd eller gått på lav last, måtte systemet deretter kjøre på maksimal last for å klare å øke temperaturen med 5 °C. Siden varmepumpen har begrenset effekt var det direktevirkende elektrisitet som måtte stå for mesteparten av denne effekten, og dette førte derfor til høyere effekttopp og økt energilevering fra elektrisitet. I Figur 52 er denne dynamikken vist. For systemet som har nattsenking er både den elektriske oppvarmingen og varmepumpa avskrudd frem til klokken 04:00, da varmepumpa begynner å produsere en liten mengde varme. Klokken 06:00 er nattsenkingen over, og systemet skal nå løfte temperaturen i bygget fra 16 til 21 °C. Varmepumpen starter opp for fullt, men siden denne har begrenset effekt må topplasten også levere energi. Klokken 07:00 er det registrert at varmepumpen leverer en effekt på 56,6 kW, mens effekten til direkte elektrisitet er 65,1 kW. For systemet med konstant innnetemperatur er forbruket av elektrisitet lite mens varmepumpen går hele tiden frem til klokken 07:00, da internlastene vil være nok til å holde innnetemperaturen på et tilfredsstillende nivå. Siden varmepumpen kan levere mer energi i systemet som holder konstant temperatur i forhold til energi fra direktevirkende elektrisitet, blir dette et mer energieffektivt system til tross for økt varmetap fra bygget.



Figur 51 - Sammenlikning av energibruken til oppvarmingssystem med luft-veske varmepumpe med og uten nattsenking av innnetemperatur

Timesdynamikk oppvarmingssystem med og uten nattsenking av innetemperatur



Figur 52 - Forskjell i dynamikken til oppvarmingssystemet med og uten nattsenking av innetemperatur morgenen 9. januar

De faktorer som er diskutert ovenfor fører til at varighetsdiagrammet flater ut ved å benytte styringen med konstant innetemperatur, siden bygningen da får et mindre effektbehov og større energibehov til oppvarming. Å dimensjonere varmpumpen til å dekke 92 % av energibehovet fører til liten brukstid, mye dellast og dermed dårlig utnyttelse av varmpumpen og dessuten unødvendig stor investeringskostnad. Det vil av denne grunn kunne være en mer riktig løsning å ha en varmpumpe med mindre effekt installert, som vil få en lengre brukstid over året.

SPF-faktoren for varmpumpa, forklart og definert i kapittel 2, er lavere for simuleringen der innetemperaturen i bygningen er konstant i forhold til tilsvarende simulering der innetemperaturen har nattsenking. Grunnen til at SPF går ned fra hhv. 4,3 til 4,2 er allerede diskutert i kapittel 8.3.2.2, og er at varmpumpa går mer på dellast grunnet generelt lavere effektbehov til oppvarming av bygningen. En prosentvis nedgang i SPF-faktor på i underkant av 2,4 % er ingen dramatisk nedgang, og det er til tross for denne nedgangen lønnsomt å styre innetemperaturen til å være på et konstant nivå. En nedgang i SPF-faktor vil imidlertid kunne la seg forhindre ved å velge en mindre varmpumpe enn det som virker nødvendig for å dekke behovet når bygningen hadde nattsenking av innetemperaturen.

En kan dermed konkludere med at det for luft-veske varmpumpe vil være lønnsomt å styre oppvarmingssystemet med en konstant innetemperatur som vil resultere i høyere brukstid for varmpumpa og økt økonomisk lønnsomhet.

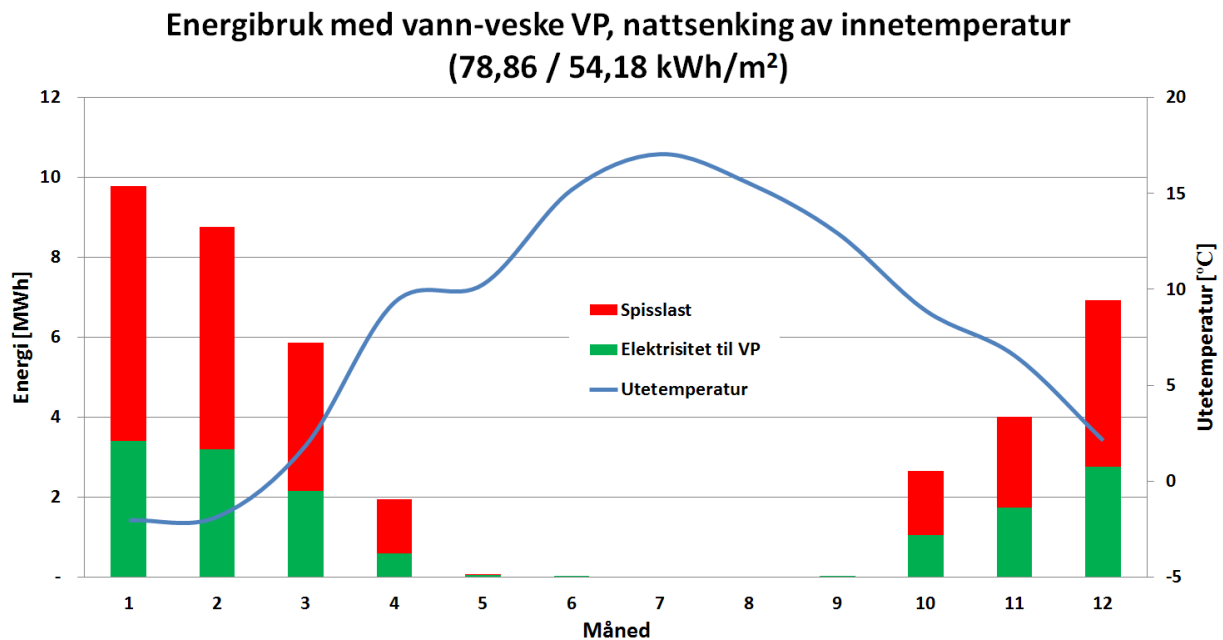
8.3.4 Vann-veske varmpumpe

Som grunnlag til å simulere vann-veske varmpumpen er det valgt en varmpumpe av typen CTA Optiheat DUO OH- /R-410A [30]. Denne har en varmekapasitet på 50,8 kW med nominell COP på 5,6. Ved valg av vann-veske varmpumpe ble det lett igjennom flere leverandørkataloger for

vann-veske varmpumper og valget ble tatt på grunnlag av at arbeidsmediet skulle være R410A, som omtalt i kapittel 2.1, og at maksimaleffekten skulle være nærmest mulig luft-veske varmpumpen som det tidligere var gjort simuleringer med for å kunne få et mest mulig korrekt sammenlikningsgrunnlag. Energibrønn ble valgt som energikilde for varmpumpa, som tidligere omtalt i kapittel 2.2.2.

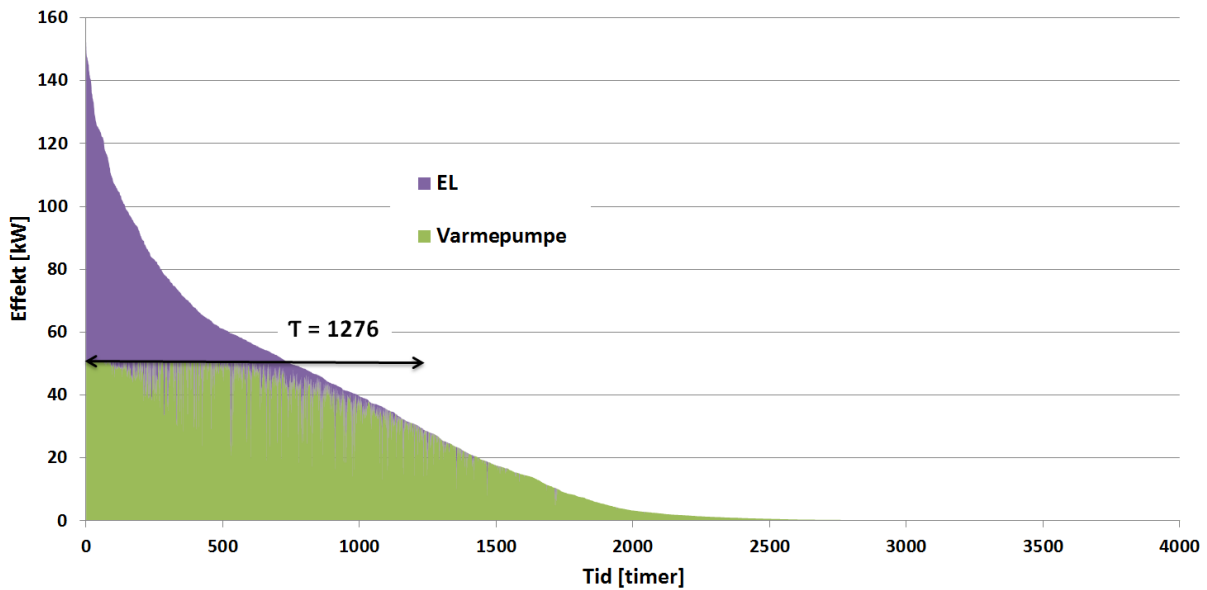
8.3.4.1 Med nattsenking

Simulering av bygningen med vann-veske varmpumpe og energibrønn som varmekilde resulterte i en energibruk per måned som vist i Figur 53 og et varighetsdiagram som vist i Figur 54. En ser her at kurven er svært bratt, med et maksimalt effektbehov på 151 kW og totalt energibruk på 89 905 kWh/år. Varmepumpen leverer totalt 64 825 kWh/år, som tilsvarer en dekningsgrad på 72 %. Brukstiden til varmpumpen blir 1 276 timer, noe som er svært lavt i forhold til anbefalt verdi for varmpumper angitt i kapittel 4.3.



Figur 53 - Energibruk til oppvarming med vann-veske varmpumpe og direktevirkende elektrisitet til spisslast med nattsenking av innetemperatur

Varighetsdiagram oppvarming vann-veskeVP nattsenking



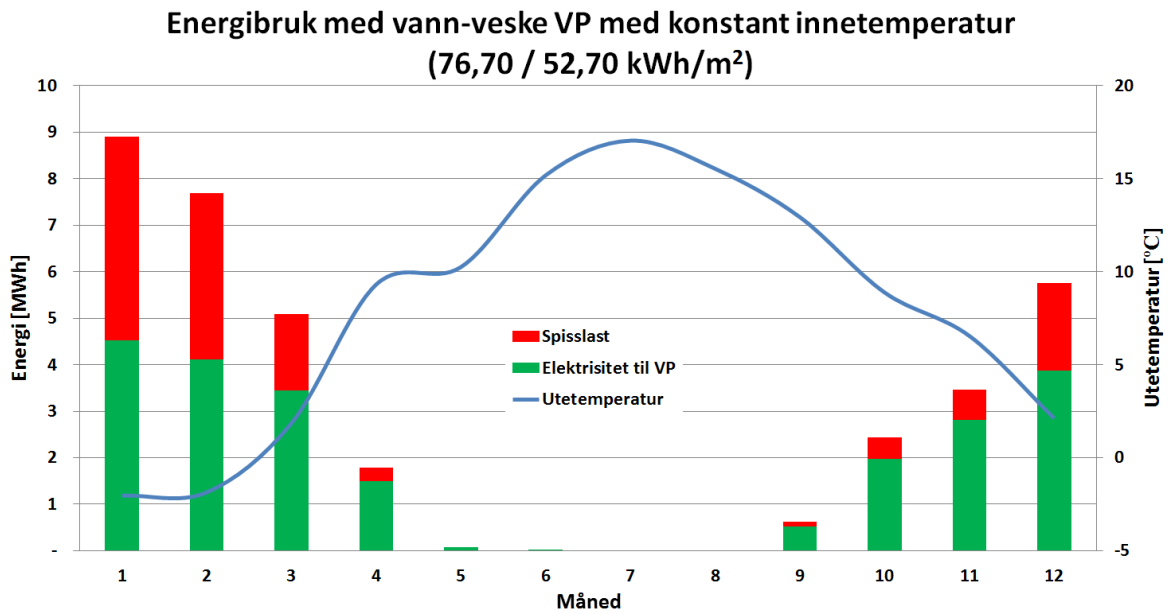
Figur 54 - Varighetsdiagram for vann-veske varmpumpe med nattsenking av innetemperatur. Installert nominell effekt 50,8 kW, brukstid 1276 timer

Varighetskurven i Figur 54 er naturlig nok svært lik den tilsvarende kurven for luft-veske varmpumpe som tidligere vist i Figur 44. Totalt areal av grafen er tilnærmet identisk fordi det er lik belastning og lik styring av innetemperatur. Dermed blir energibehovet til bygningen likt fordi behovet til oppvarming er uavhengig av energikilden. Det som imidlertid varierer mellom de to figurene er fordelingen mellom levert energi fra varmpumpe og spisslast, som vil variere med type varmpumpe.

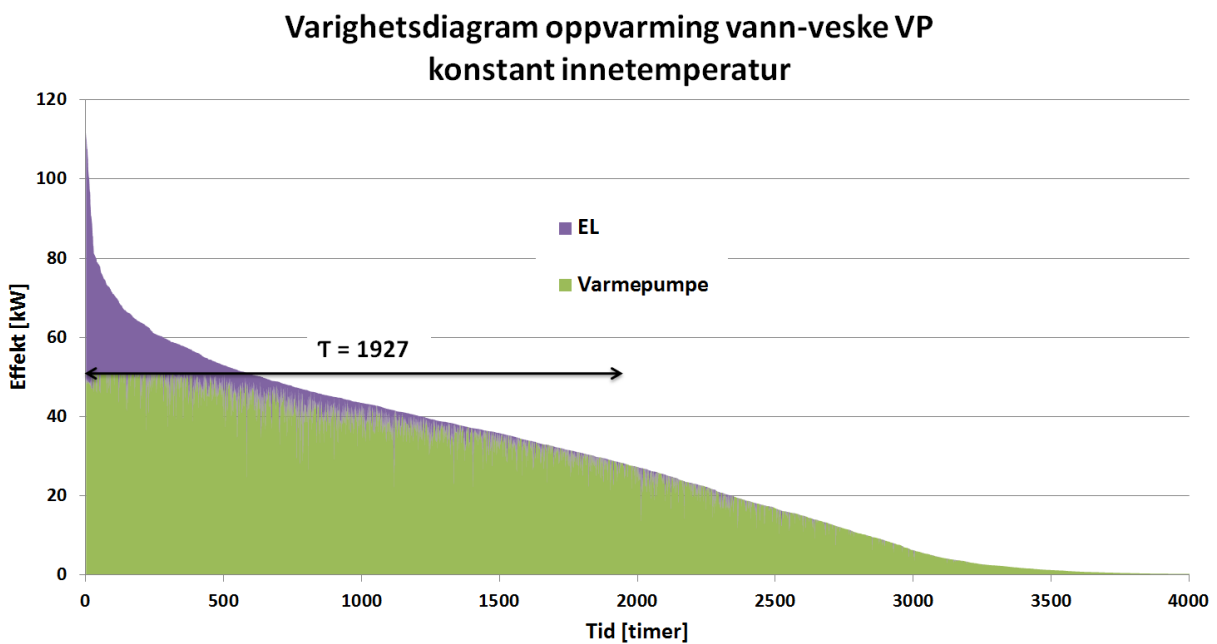
Figur som viser COP ved varierende levert varmeeffekt og varierende utetemperatur tilsvarende som for luft-veske varmpumpe er vist i diskusjonen i kapittel 8.3.5.

8.3.4.2 Konstant innetemperatur

Etter simuleringen med vann-veske varmpumpe med nattsenking av innetemperaturen ble det gjort en tilsvarende simulering, med den forskjellen at innetemperaturen i denne simuleringen ble holdt på konstant 21 °C over hele døgnet på samme måte som i kapittel 8.3.2.2. Energibruken per måned er vist i Figur 55 og varighetsdiagrammet er vist i Figur 56. Det er her brukt helt lik varmpumpe som i kapittel 8.3.4.1 ovenfor, for å kunne se hvilken effekt nattsenking av innetemperaturen i bygget har med vann-veske varmpumpe. Resultatene av denne simuleringen ble et maksimalt effektbehov på 113 kW, og totalt energibruk til oppvarming på 110 882 kWh/år. Varmepumpen leverer totalt 97 897 kWh/år, som tilsvarer en dekningsgrad på hele 88 %. Brukstiden til varmpumpen blir nå 1 927 timer.



Figur 55 - Energibruk til oppvarming med vann-veske varmepumpe og direktevirkende elektrisitet til spisslast med konstant innetemperatur



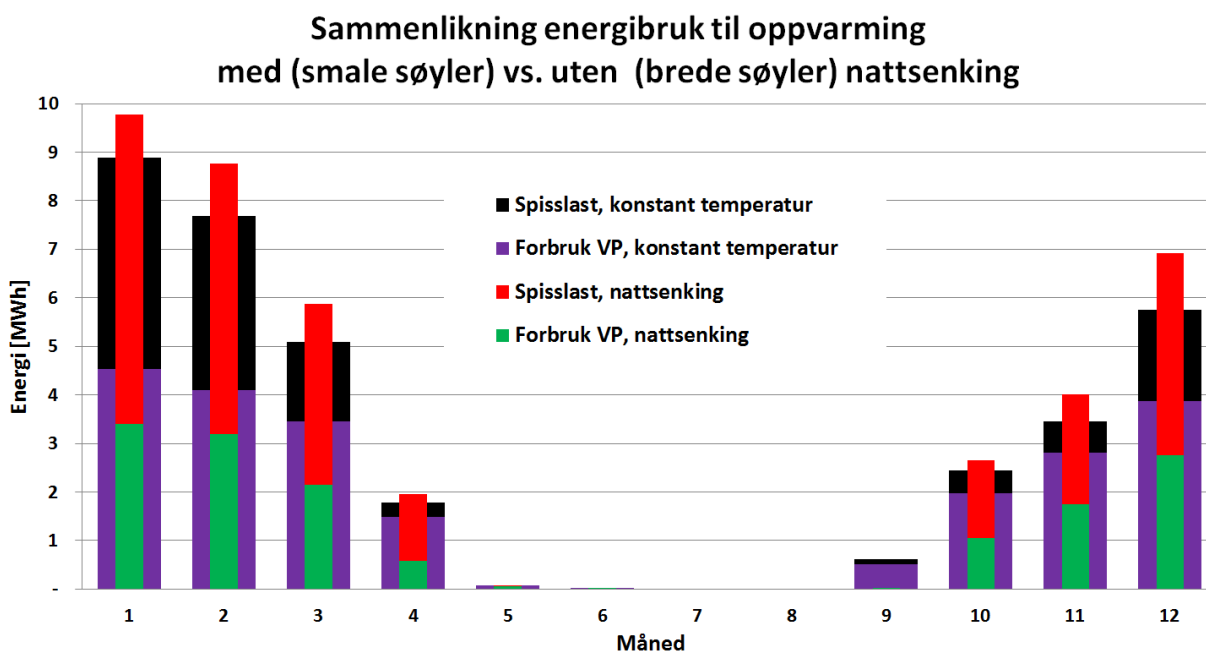
Figur 56 - Varighetsdiagram for vann-veske varmepumpe med konstant innetemperatur. Installert nominell effekt 50,8 kW, brukstid 1927 timer

Figur som viser COP ved varierende levert varmeeffekt og varierende utetemperatur tilsvarende som for luft-veske varmepumpe er vist i diskusjonen i kapittel 8.3.5.

8.3.5 Diskusjon vann-veske varmepumpe

Det kommer frem i Figur 57 at det å ha konstant innetemperatur fører til en økning i brukt varmeenergi i bygget, men reduksjon i levert energi til bygget tilsvarende som for luft-veske varmepumpe. Fordi vann-veske varmepumpen, som benytter energibrønn som varmekilde, har noe mindre installert effekt enn luft-veske varmepumpen blir dekningsgraden noe lavere, mens

brukstiden øker fra 1 775 til 1 927. Den positive effekten ved å gå fra nattsenkning til konstant innetemperatur gjelder imidlertid på lik måte for vann-veske varmepumpen som for luft-veske varmepumpen omtalt i kapittel 8.3.3.



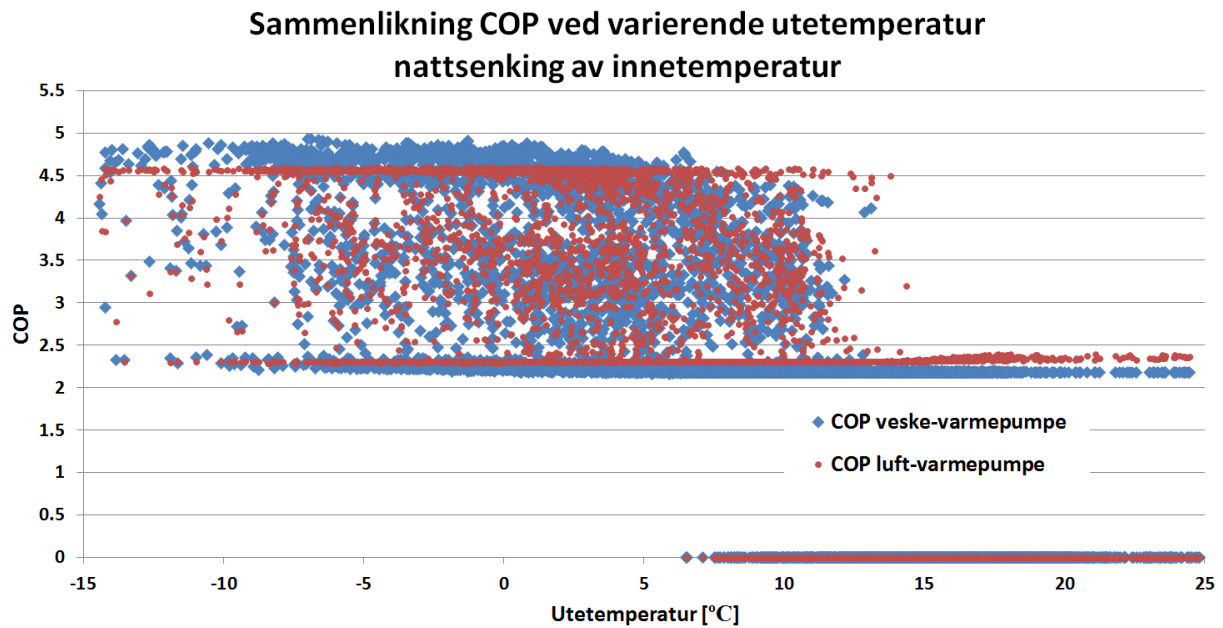
Figur 57 - Sammenlikning av energibruken til oppvarmingssystem vann-veske varmepumpe med nattsenkning av innetemperatur og med konstant innetemperatur

I Figur 58 og Figur 59 er COP ved varierende utetemperatur sammenliknet for luft-veske varmepumpe og vann-veske varmepumpe for henholdsvis med og uten nattsenkning av innetemperaturen i bygningen. Fra de to figurene fremkommer det at vann-veske varmepumpa opererer generelt med en høyere COP ved lave temperaturer og maksimal belastning, mens den ligger marginalt lavere enn luft-veske varmepumpa når den opererer på laveste delast, som tilsvarer det horisontale grenseskillet ved omtrent COP lik 2,2.

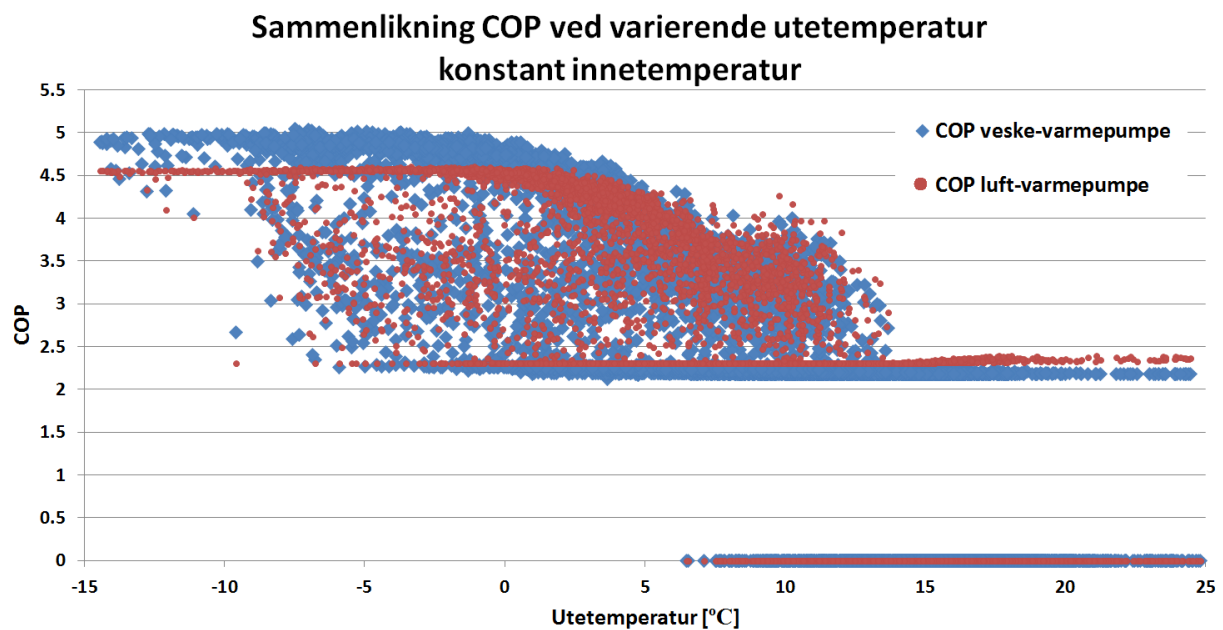
At COP er høyere ved maksimal levert varmeeffekt og lavere utetemperaturer kan forklares med at vann-veske varmepumpa har en høyere nominell COP enn luft-veske varmepumpa. I tillegg er temperaturforløpet til energibrønnen forholdsvis konstant over hele året i forhold til utetemperaturen, som har store svingninger. Når utetemperaturen er lav vil temperaturdifferansen mellom energibrønnen og utetemperaturen være i energibrønnens favør, og det er dermed naturlig at dette varmepumpesystemet vil oppnå høyere COP, som kan sees fra formel 1 i kapittel 2.

Ved laveste delast vil derimot den ekstra energibruken til sekundærkretsen i vann-veske varmepumpa gjøre seg gjeldene. Energibrønnen krever ekstra elektrisitetsforbruk til pumpedrift av sekundærkretsen som sørger for varmeveksling mellom energibrønnen og fordampner i varmepumpa. Dette energiforbruket er tilnærmet konstant så lenge varmepumpa er i drift, uavhengig av belastningen. Ved lavere effektuttak av varmepumpa blir elektrisitetsforbruket til den ekstra pumpedriften relativt sett større, og ved laveste delast blir denne relativt sett stor i forhold til varmeuttaket, som dermed fører til lavere COP. Dette kan sees fra formel 2 i kapittel 2,

der nevneren i motsetning til luft-veske varmpumpe vil inneholde et konstant ledd som tilsvarer effektforbruket til sekundærkretsen sitt pumpeforbruk.



Figur 58 - Sammenlikning av COP for luft-veske varmpumpe og vann-veske varmpumpe ved varierende utetemperatur og nattsenking av innetemperatur i bygningen.

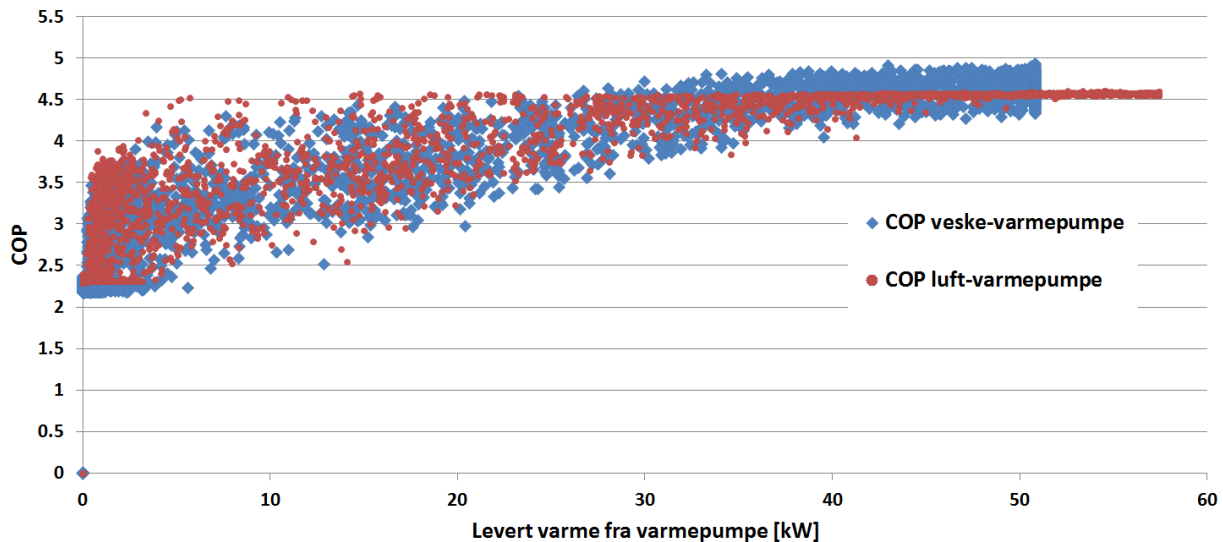


Figur 59 - Sammenlikning av COP for luft-veske varmpumpe og vann-veske varmpumpe ved varierende utetemperatur og konstant innetemperatur i bygningen.

Som forklart i kapittel 4.3 er det en sammenheng mellom utetemperatur og nødvendig varmeeffekt til bygget, og derfor kan samme tendens sees i Figur 60 og Figur 61. På disse figurene er det imidlertid lettere å se at COP er synkende med lavere delast, og COP vil nå sin

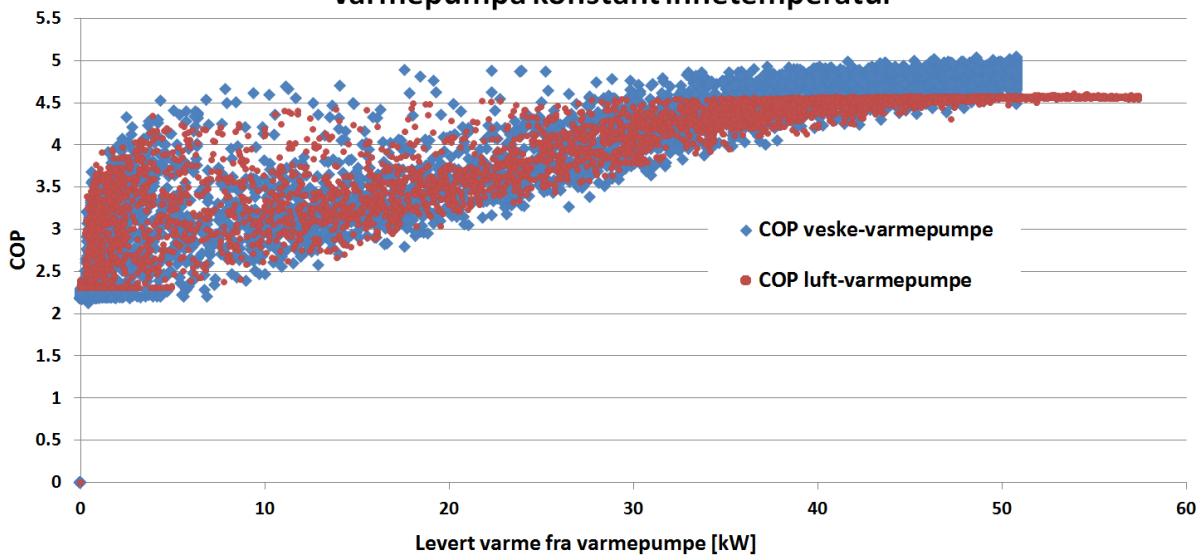
toppverdi når varmepumpa leverer maksimal effekt, noe som gjelder for både luft-veske og vann-veske varmepumpa.

Sammenlikning COP ved varierende levert varmeeffekt fra varmepumpa nattsenking av innetemperatur



Figur 60 - Sammenlikning av COP for luft-veske varmepumpe og vann-veske varmepumpe ved varierende levert varmeeffekt fra varmepumpa og nattsenking av innetemperatur i bygningen.

Sammenlikning COP ved varierende levert varmeeffekt fra varmepumpa konstant innetemperatur



Figur 61 - Sammenlikning av COP for luft-veske varmepumpe og vann-veske varmepumpe ved varierende levert varmeeffekt fra varmepumpa og konstant innetemperatur i bygningen.

I Tabell 6 er den totale energibruken til bygningen summert opp sammen med SPF og brukstiden til varmepumpa. Tabellen viser at vann-veske varmepumpa med energibrønn gir laveste energibruk både for nattsenking og konstant innetemperatur. For nattsenking er besparelsen på 3 816 kWh årlig ved bruk av vann-veske varmepumpa i forhold til luft-veske varmepumpa, mens

det med konstant innetemperatur er en årlig besparelse på 3 699 kWh ved å benytte vann-veske varmepumpa i forhold til luft-veske varmepumpa.

Tabell 6 - Sammenlikning av luft-veske og vann-veske varmepumpe

Type varmepumpe og innendørs temperaturstyring	Totalt energibruk bygg [kWh/år]	Totalt kjøpt energi [kWh/år]	SPF ¹ VP [-]	Brukstid VP [h]
Luft-veske med nattsinking	165 900	37 834	4,3	1 203
Luft-veske konstant temperatur	161 341	33 236	4,2	1 775
Vann-veske med nattsinking	162 084	40 053	4,3	1 276
Vann-veske konstant temperatur	157 642	35 802	4,3	1 927

8.3.6 Mindre installert varmepumpeeffekt

Etter simuleringene med de ulike varmepumpene ble det så forsøkt å simulere bygningen med tilsvarende varmepumper men med mindre installert effekt. Dette ble gjort med konstant innendørs temperaturnivå, siden dette gir laveste behov av levert energi til bygget. Luft-veske varmepumpa det tidligere har blitt simulert med hadde en maksimaleffekt på 57,41 kW, som tilsvarer 51 % av maksimalt effektbehov til oppvarming, mens det nå ble simulert med en effektdekning på 45,2 kW eller 40 % av maksimalt effektbehov. Vann-veske varmepumpen det tidligere har blitt simulert med hadde en maksimaleffekt på 50,8 kW, som tilsvarer 45 % av maksimalt effektbehov til oppvarming. Også denne ble det nå simulert med maksimal effektdekning på 45,2 kW eller 40 % av maksimalt effektbehov. Det eneste som ble forandret på varmepumpene var maksimal effekt, alle andre parametere ble holdt til samme verdier som tidligere. De simulerte varmepumpene på 40 % av maksimal effektbehov er dermed ikke virkelige varmepumper fra katalog, men det antas at verdiene ikke er vesentlig forskjellig. Resultatene av de to simuleringene med redusert maksimal effekt fra varmepumpene er vist i Tabell 7.

¹ SPF er definert i formel 3 kapittel 2

Tabell 7 - Sammenlikning av resultater for luft-veske varmepumpe og vann-veske varmepumpe mellom tidligere simuleringer og med varmepumper med mindre installert maksimaleffekt

	Tidligere simulert luft-veske varmepumpe	Ny simulering med 40 % effektdekning av maksimalt behov med luft-veske varmepumpe	Tidligere simulert vann-veske varmepumpe	Ny simulering med 40 % effektdekning av maksimalt behov med vann-veske varmepumpe
Leverert energi fra varmepumpa [kWh/år]	101 880	93 091	97 897	92 667
Leverert energi fra spisslast [kWh/år]	9 053	19 816	12 984	19 094
Brukstid varmepumpe [h]	1 775	2 060	1 927	2 050
Totalt leverert energi (elektrisitet til varmepumpe + spisslast) [kWh/år]	33 236	42 094	35 802	40 993

Leverert varmeenergi fra varmepumpesystemet blir naturligvis mindre siden det er en lavere maksimaleffekt på varmepumpene det nå sammenliknes mot. Tallene som i Tabell 7 er markert med rødt er verdier som har hatt en negativ utvikling på å gå fra en større til en mindre varmepumpe, mens tallene markert med grønt er verdier som har hatt en positiv utvikling. Det mest interessante tallet er det nederste i Tabell 7, som angir hvor mye elektrisitet bygningen må kjøpe utenfra i året for å dekke oppvarmingsbehovet. For luft-veske varmepumpe blir det en økning på 8 858 kWh/år, mens det for vann-veske varmepumpe blir en økning på 5 191 kWh/år. Reduksjonen i kWh/år for hver kW mindre installert maksimaleffekt blir for luft-veske varmepumpe 725 kWh/kW og for vann-veske varmepumpe 927 kWh/kW.

Det kan virke som at vann-veske varmepumpe leverer relativt mindre energi samlet over året i forhold til luft-veske varmepumpe ved en lavere installert effekt. Dette kan grunne ut i at vann-veske varmepumpesystemet har en stor sekundærkrets med energibrønn, som krever et konstant ekstra strømforbruk i forhold til luft-veske varmepumpesystemet. En mindre installert maksimal-effekt resulterer i en økt brukstid for varmepumpe, mens den totale energidekningen minker. Om dette er en totalt bedre eller dårligere løsning må vurderes i forhold til pris på en mindre varmepumpe.

8.3.7 Solfangersystem

Simuleringsprogrammet EnergyPlus hadde noen problemer med å simulere solfanger i samme system som varmpumpe og spisslast. Løsningen på dette ble å simulere bygget med solfanger, og ved regneark trekke denne energien fra oppvarmingssystemet når denne energien kunne nyttiggjøres. Solfangeren ble simulert med vann-veske varmpumpe på ulike sider av bygget, mot nord, sør, øst og vest for å finne den beste monteringsiden på bygget. Størrelsen på solfangeren ble valgt til 100 m² og den leverte energien fra solfangeren som kan nyttiggjøres av bygget fordi det har et samtidig energibehov, er vist i Tabell 8. På dette grunnlaget ble sørsiden av bygget valgt til å simulere solfanger i systemet med luft-veske varmpumpe og vann-veske varmpumpe med direktevirkende elektrisitet som spisslast.

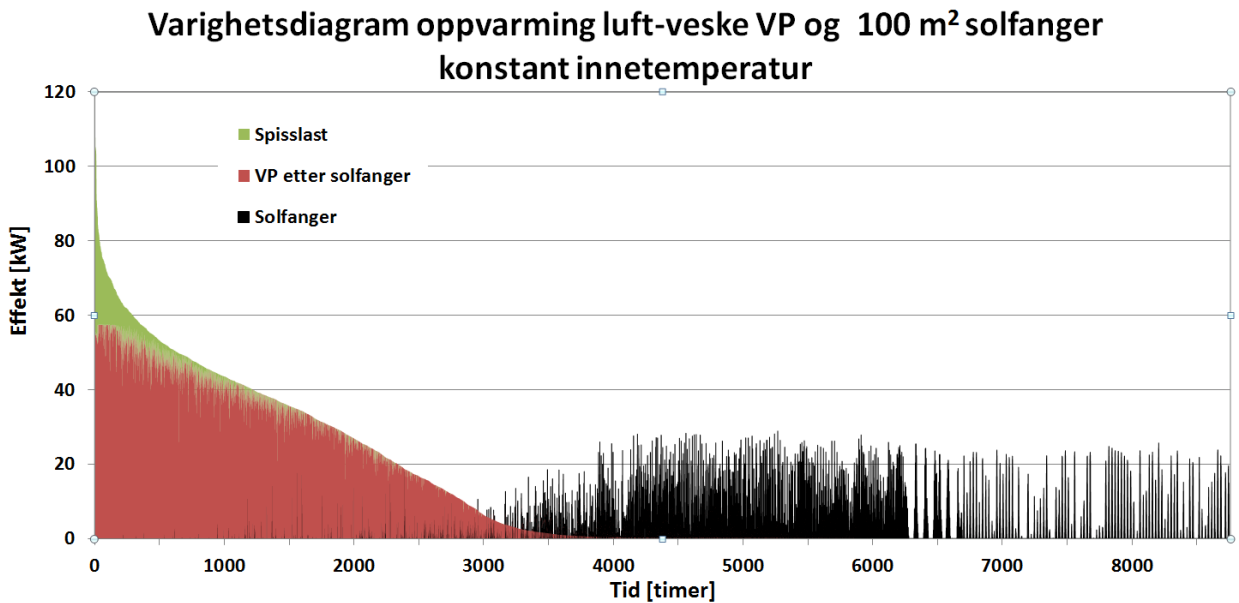
Tabell 8 - Nyttig energi levert fra solfanger montert i ulike himmelretninger

Monteringside på bygningen	Energi fra 100 m ² solfanger som kan nyttiggjøres der innnetemperaturen holdes konstant [kWh/100m ²]	Energi fra 100 m ² solfanger som kan nyttiggjøres der det benyttes nattsinking av innnetemperatur [kWh/100m ²]
Nord	310,6	332,9
Sør	1 279,7	1 809,1
Øst	617,6	691,8
Vest	573,4	700,5

Det er imidlertid viktig å merke seg at det, som tidligere nevnt i kapittel 7.2.1, ikke er simulert med noe varmt tappevannsbehov i bygningen. Dette gjelder alle simuleringene i denne rapporten.

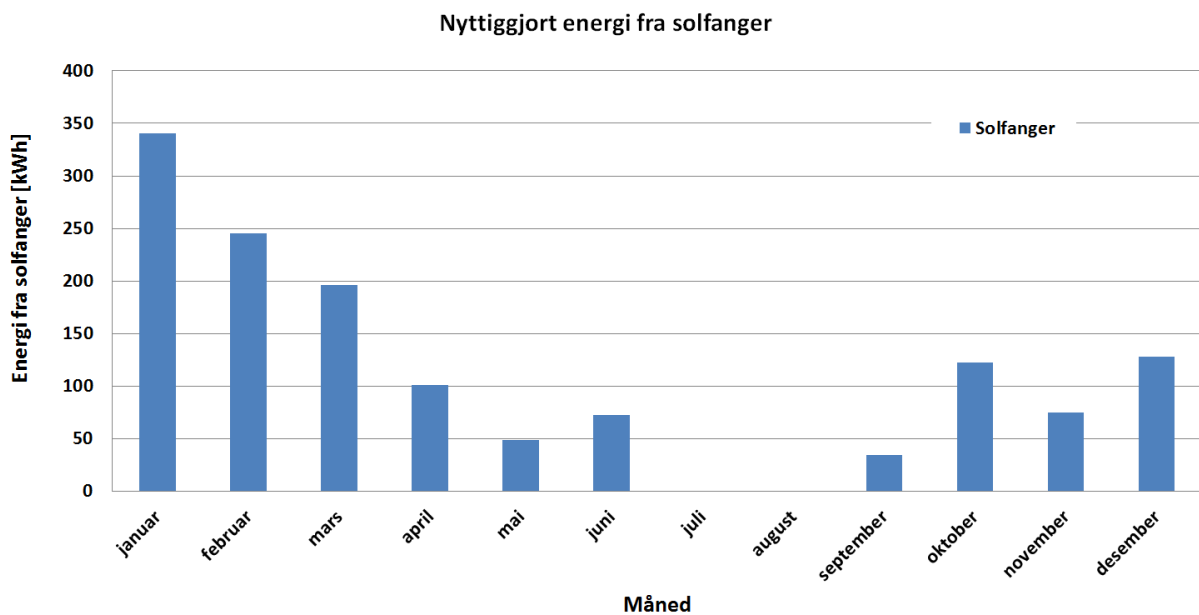
8.3.8 Luft-veske varmpumpe og solfanger

Med solfanger i system med luft-veske varmpumpe og spisslast, leverer solfangeren på 100 m² totalt 1 292 kWh årlig nyttiggjort energi. Dette tilsvarer en dekningsgrad på 1,16 % av levert energi fra oppvarmingssystemet. Det er derimot en stor energimengde solfangeren kan levere, men som energisystemet ikke kan nyttiggjøre seg fordi det ikke er noe samtidig oppvarmingsbehov. Total energi som solfangeren kan levere men som ikke blir nyttiggjort er 18 731 kWh/år. Dette er godt synlig på varighetsdiagrammet for oppvarming i Figur 62 der energien fra solfangersystemet knapt er synlig samtidig som varmpumpe og spisslast, men godt synlig til høyre i figuren, fra omtrent 3 700 timer og over, der mesteparten av energien er tilgjengelig.



Figur 62 - Varighetsdiagram for solfangersystem med luft-veske varmepumpe

Den nyttiggjorte energien fra solfangersystemet for hver måned er vist i Figur 63. Nyttiggjort energi er størst de første tre månedene av året, og holder seg lavt i de resterende månedene. I juli og august er oppvarmingsbehovet i bygningen lik null, og dermed er det heller ikke noe nyttiggjort energi fra solfangersystemet disse månedene.

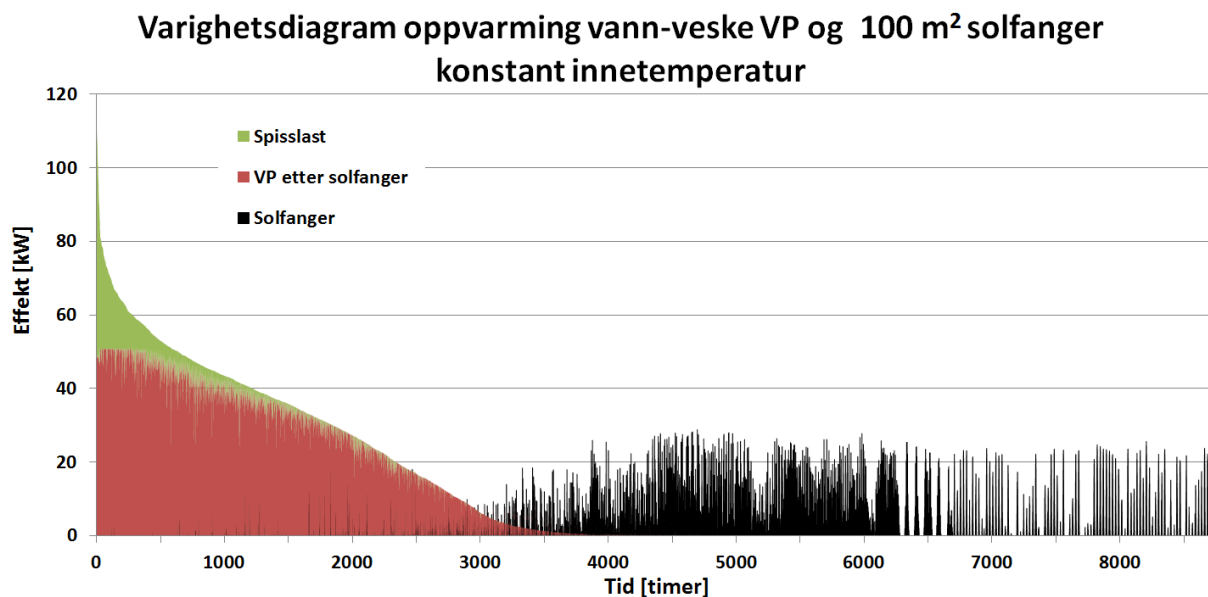


Figur 63 - Nyttiggjort energi fra solfangersystemet i kombinasjon med luft-veske varmepumpe og direktevirkende elektrisitet som spisslast

8.3.9 Vann-veske varmepumpe og solfanger

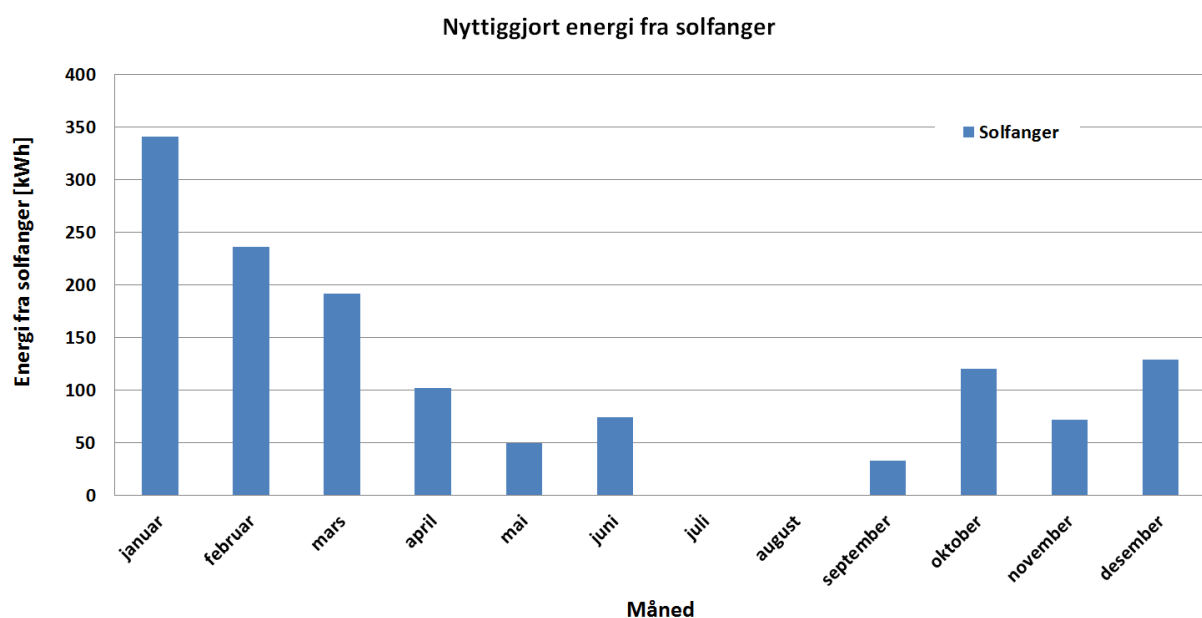
Med solfanger i system med luft-veske varmepumpe og spisslast, leverer solfangeren på 100 m² totalt 1 280 kWh årlig. Dette tilsvarer en dekningsgrad på 1,15 % av levert energi fra

oppvarmingssystemet. Det er også her som i kapittel 8.3.8 en stor energimengde fra solfangeren som ikke kan nyttiggjøres, en energimengde på 18 719 kWh/år som vist i Figur 64.



Figur 64 - Varighetsdiagram for solfangersystem med vann-veske varmpumpe

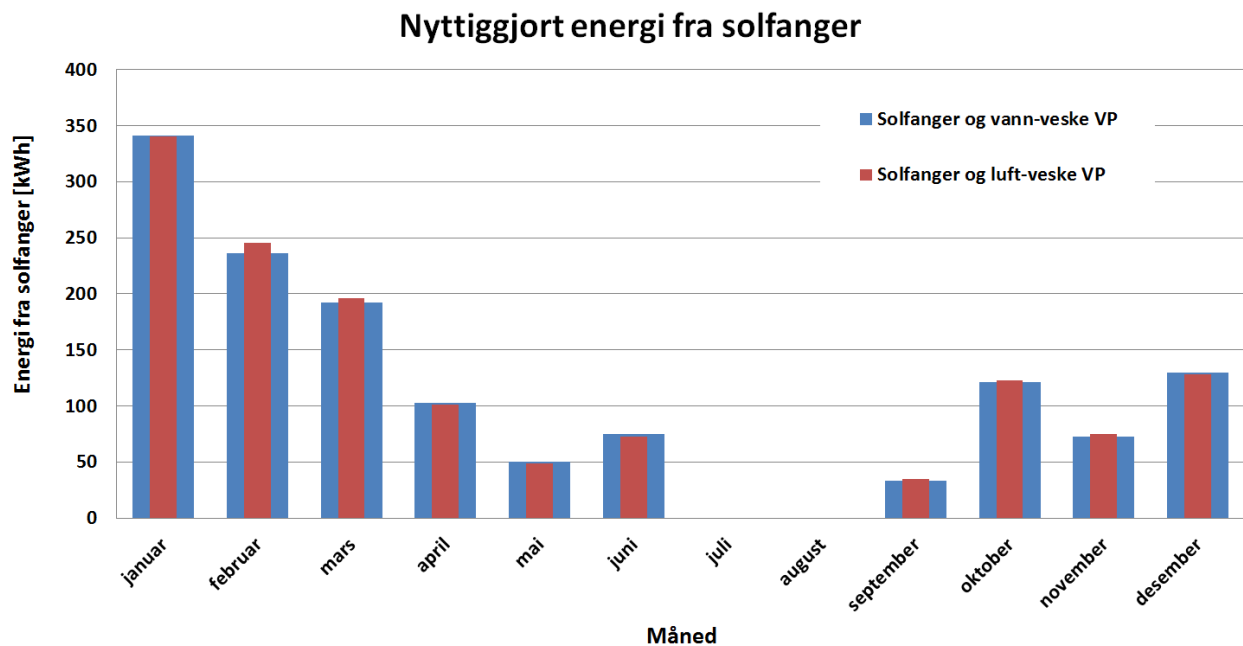
Den nyttiggjorte energien fra solfangersystemet for hver måned er vist Figur 65. Nyttiggjort energi er størst de første tre månedene av året, og holder seg lavt i de resterende månedene tilsvarende som for solfangersystemet i kombinasjon med luft-veske varmpumpe.



Figur 65 – Nyttiggjort energi fra solfangersystemet i kombinasjon med vann-veske varmpumpe og direktevirkende elektrisitet som spisslast

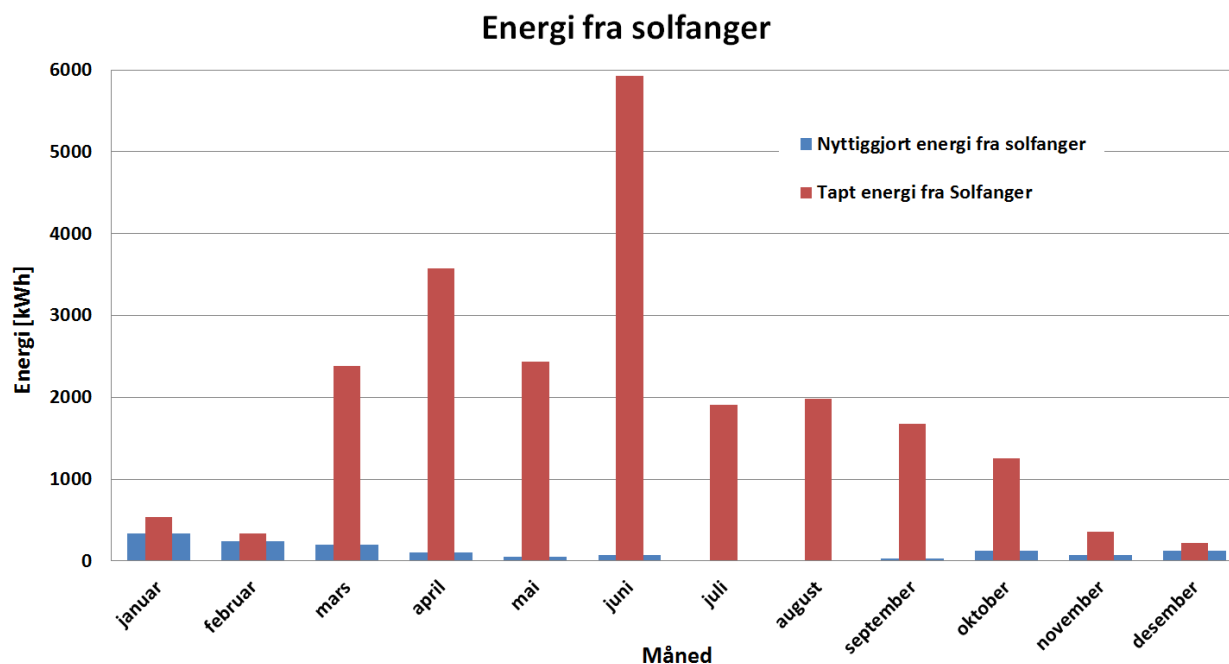
8.3.10 Diskusjon solfangersystem i kombinasjon med varmepumpe

De to simuleringene av solfangersystemet i kombinasjon med ulike typer varmepumpe viser at utnyttelsen av solfangersystemet er lite avhengig av valg av varmepumpe. Differansen mellom den nyttiggjorte energien fra solfangersystemet med luft-veske og vann-veske varmepumpe er bare 12 kWh årlig, som kommer av at de simulerte varmepumpene har litt ulik toppeffekt. En sammenlikning av månedlig utnyttet energi fra solfangersystemet i kombinasjon med både luft-veske og vann-veske varmepumpe er vist i Figur 66.



Figur 66 - Sammenlikning av nyttiggjort energi fra solfanger med luft-veske og vann-veske varmepumpe viser at nyttiggjort energi er tilnærmet likt som for de to systemene

Det er som tidligere nevnt en stor mengde tilgjengelig energi fra solfangersystemet som ikke nyttiggjøres, fordi det ikke er noe samtidig oppvarmingsbehov i bygget. Hvis denne energien kunne lagres over lengre tid for deretter å kunne nyttiggjøres ved behov, kunne altså den nyttiggjorte energien fra solfangersystemet mangedobles. En måte dette kunne gjøres på er ved å dumpe denne overskuddsvarmen ned i energibrønnen. Dette konkluderte Elisabeth Kjellsson med i sin doktorgradsavhandling ved Lund som en optimal løsning når bygningen ikke har varmtvannsbehov [54]. Figur 67 gir et svært godt bilde over den energien som ikke blir utnyttet av systemet som er simulert i EnergyPlus, men som kan nyttiggjøres helt eller delvis ved langtidslagring. I månedene mai til august er oppvarmingsbehovet av bygningen tilnærmet null, samtidig som det er disse månedene der mesteparten av energien fra solfangersystemet er tilgjengelig. Om den tapte energien fra solfangeren, som utgjør over 18 000 kWh årlig, kunne utnyttes helt eller delvis, kunne dette utgjøre store utslag på energibruken til oppvarmingssystemet.



Figur 67 - Energi fra solfangersystemet som blir nyttiggjort til bygningsoppvarming, og energi som ikke blir nyttiggjort

Den energien som hentes ut fra solfangersystemet kunne også vært større hvis bygningen hadde forbruk av varmt tappevann. Denne bygningen har ingen dusjer og kun et fåtall servanter, og det ble derfor simulert uten noe varmt tappevannsbehov av denne bygningen, som det ble konkludert med i kapittel 7.2.1

8.4 Ulikt effektbehov i bygningens soner

De skissene av oppvarmingssystemet som ble gitt som grunnlag til denne rapporten, viste en tilnærmet lik effektfordeling av takvarme over hele bygget, som vist tidligere i Figur 24. For å avdekke eventuelle ulikheter i effektbehovet til de forskjellige sonene ble det kjørt en simulering der det ble registrert levert effekt fra varmepanelene. Som nevnt tidligere ble det simulert med ubegrenset tilgjengelig effekt på takpanelene, slik at behovet til sonene her vil komme frem i simuleringen. Nødvendig effektbehov ble undersøkt for alle sonene i 2. etasje, i en simulering der det ble holdt konstant innetemperatur. Resultatene er vist i Tabell 9. En kan her se at nødvendig maksimaleffekt varierer fra 45 kW/m² for trimrommet, til det høyeste behovet i møterom 2 på 106 kW/m², markert med fet skrift i Tabell 9. Møterom 2 ligger på sørspissen av bygningen, med tre flater som grenser mot uteklima. At dette rommet krever mer installert effekt kommer av mye varmetap som følge av store veggarealer som grenser mot utvendig klima, og store vinduer. Denne store forskjellen på nødvendig maksimalt effektbehov viser at det er sterkt anbefalt å tilpasse nødvendig takvarme for hvert rom individuelt.

Tabell 9 - Maksimalt effektbehov for de ulike sonene i 2. etasje

Navn på sone	Totalt maksimalt effektbehov [kW]	Maksimalt effektbehov per m ² [kW/m ²]
TZ2KONTOR1	9 789	99
TZ2KONTOR2	3 544	103
TZ2KONTOR3	5 736	94
TZ2MOTE	3 093	88
TZ2MOTE2	3 707	106
TZ2VRIMLE	9 232	94
TZ2TRIMROM	2 874	45
TZ2RESEPSJONMM	11 632	52

9 Økonomisk betraktning

Ved valg av oppvarmingsystem er det ofte flere faktorer som spiller inn. Komfort, miljøforurensning, støy, regulerbarhet og økonomi er eksempler på slike faktorer. Økonomi er oftest den faktoren som veier tyngst i vurdering av de ulike alternative løsningene. I dette kapittelet skal de metodene som er benyttet i den økonomiske betraktningen forklares, og de faktorer som er benyttet i denne økonomiske analysen beskrives. På dette grunnlag vil så de økonomiske aspekter ved de ulike løsningene vurderes, og det blir så konkludert med en anbefalt løsning.

I følge SSB [55] var det for år 2009 en årlig gjennomsnittspris 71,5 øre/kWh og i 2010 en årlig gjennomsnittspris på 87,4 øre/kWh. Det er en tendens til økende strømpriser i markedet, og det er derfor i de økonomiske beregningene tatt utgangspunkt i en total strømpris på 1 kr/kWh, og en årlig positiv prosentvis økning.

Pris og levetid for varmepumpesystem og solfangersystem er gitt i deres respektive kapitler, henholdsvis kapittel 2.3 og 2.4 for varmepumper, og kapittel 3.2 og 3.3 for solfanger. Alle systemer antas å ha en levetid på 20 år, bortsett fra energibrønnen som er beregnet med en dobbelt så lang levetid som de øvrige systemene, altså en total levetid på 40 år. Investeringskostnader og årlig energibruk for de ulike systemene er gitt i deres respektive kapitler, men er her samlet under i Tabell 10. De kostnader som blir benyttet i den økonomiske analysen er merkostnader, det vil si at kostnader som er felles for de ulike installasjoner ikke er medberegnet. Kostnader for elektrisk tilkopleing og styringssystem i bygget er eksempler på kostnader som ikke er medberegnet.

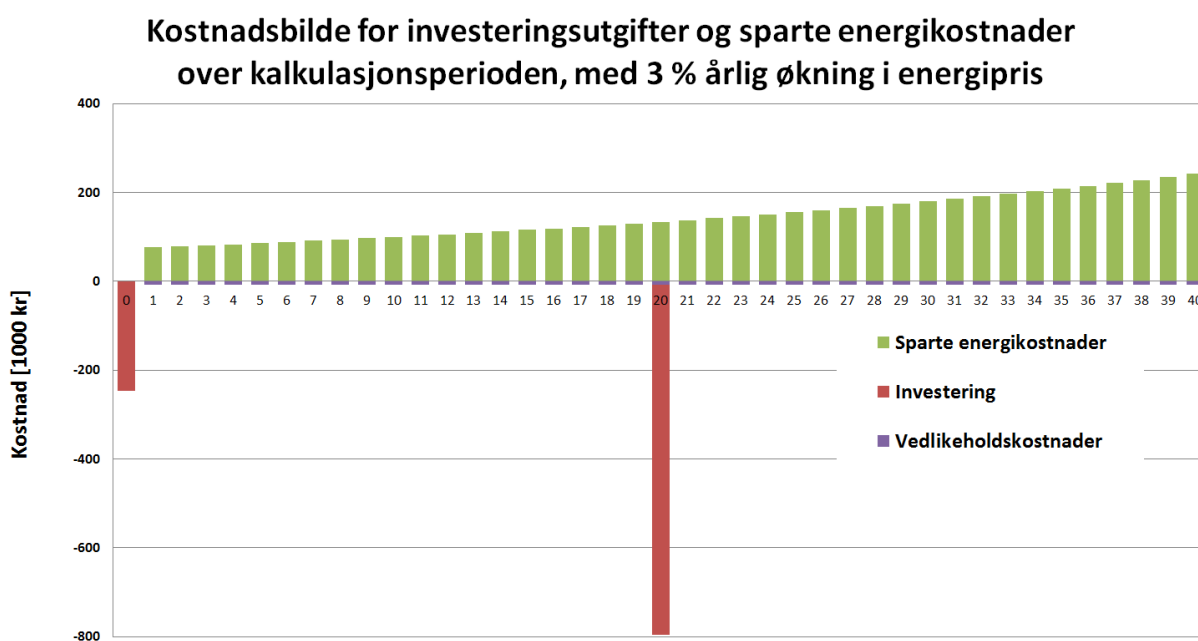
Tabell 10 - Oversikt over investeringskostnad og årlig spart energi i forhold til referansesystem

	Investeringskostnad [kr]	Årlig spart energi i forhold til referansesystem [kWh/år]
Luft-veske varmepumpesystem	246 000	57 579
Vann-veske varmepumpesystem	425 000 ¹	55 013
Luft-veske varmepumpesystem med solfanger	551 000	58 871
Vann-veske varmepumpesystem med solfanger	730 000	56 293

For de systemene som har 20 års levetid vil det bli nødvendig med en ny investering etter 20 år for å få en samlet brukstid på 40 år. Det blir antatt at prisendringen for investeringskostnaden øker i takt med realrenten i disse beregningene, med andre ord at nåverdien for en reinvestering i et anlegg om 20 år er lik dagens pris for tilsvarende anlegg. For vann-veske varmepumpesystemet

¹ Investeringskostnaden på 425 000 kr omfatter kjøp av varmepumpesystem og energibrønn. Etter 20 år er det antatt en reinvestering på varmepumpesystemet, som blir på 121 000 kr

med energibrønn er det kun energibrønnen som har en levetid på 40 år, en reinvestering av varmpumpa og tilhørende komponenter er antatt gjort etter 20 år. Et eksempel på hvordan kostnadene fordeler seg over de 40 årene som det kalkuleres med er vist i Figur 68. Her er 0-aksen kostnadene til referansesystemet, og negativ akse indikerer utgifter utover dette. Her er det regnet med investeringskostnad i år 0 av varmpumpesystemet, og en reinvestering etter endt levetid på 20 år. Kostnaden av investeringen etter 20 år er lik nåverdien av tilsvarende investering, med en realrente på 6 %. Positiv akse indikerer sparte kostnader i forhold til referansesystemet. Det ble laget et regneark i Microsoft Excel med utgangspunkt i formel 4 der nåverdiberegningene ble gjort.



Figur 68 - Kostnadsfordeling over kalkulasjonsperioden for luft-veske varmpumpesystem med reinvestering av varmpumpeanlegget etter 20 år

9.1 Nåverdiberegning

For å sammenligne de ulike oppvarmingsløsningene er i denne analysen vist besparelsen ved overgang fra kun direktevirkende elektrisitet som energikilde til det vannbårne oppvarmingssystemet i bygningen, som er gjort i kapittel 8.3.1. Dette gjøres ved en nåverdianalyse på de forskjellige oppvarmingssystemene. Utgangspunktet for nåverdiberegninger er at alle fremtidige inntekter og utgifter tilbakeføres til et gitt tidspunkt. Den formelen som brukes til disse kalkulasjonene er:

$$NV = -\frac{CF_0}{(1+i)^0} + \frac{CF_1}{(1+i)^1} + \frac{CF_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1+i)^n} = -CF_0 + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t} \quad (4)$$

Med følgende notasjon: CF_t er kontantoverskudd eller innbetalingsoverskuddet i år t . CF_0 er investeringskostnaden, n er levetiden og i er realrenten.

Realrente er den reelle avkastningen, som er avkastningen justert for inflasjon. I beregninger av realrente er det normalt å bruke konsumprisindeksen som justeringsfaktor for inflasjonen. Finansdepartementet legger til grunn en realrente i basisalternativet på 4 % i Norge og internasjonalt [56]. En lav realrente vil i de økonomiske analysene gi et mer gunstig resultat enn en høy realrente vil gi. Realrenten som er benyttet i denne analysen er av denne grunn satt noe høyere, til 6 %.

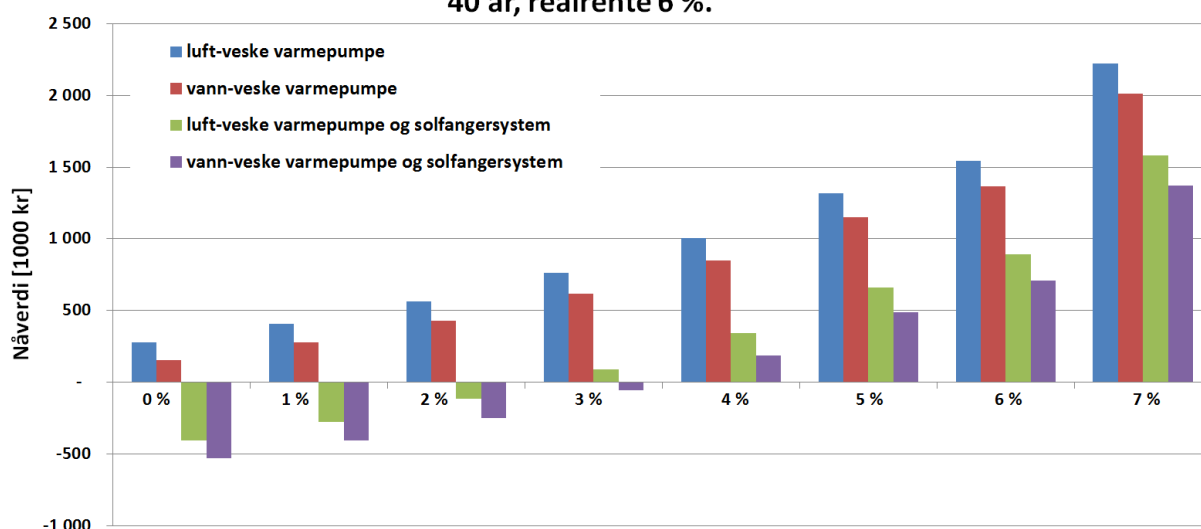
Vedlikeholdskostnadene for luft-veske varmepumpesystemet er satt til årlig å være 3 % av investeringskostnaden, samme verdi som vedlikeholdskostnadene til solfangersystemet. For vann-veske-varmepumpa er det derimot kalkulert med en årlig vedlikeholdskostnad på 2 % av investeringskostnaden til varmepumpesystemet. Grunnlag for nåverdiberegningene er samlet i Tabell 11.

Tabell 11 - Grunnlag for nåverdiberegningene

Energibehov til oppvarming	90 815 kWh/år
Netto strømpris i år 0	1 kr/kWh
Årlig prisøkning av netto strømpris	Varierende fra 0-7 %
Årlig vedlikeholdskostnader (Luft-veske varmepumpe, vann-veske varmepumpe, solfanger)	3 %, 2 %, 2 %
Levetid (energibrønn, øvrige systemer)	40 år, 20 år
Realrente	6 %

Det er vanskelig å spå fremtiden, og hvilken endring fremtidig energipris vil få er svært usikker. Figur 69 viser nåverdi til de fire ulike energisystemene med varierende årlig prosentvis økning i energipriser, fra 0 % til 7 %.

Nåverdianalyse med varierende prosentvis prisøkning på energi. 40 år, realrente 6 %.



Figur 69 - Nåverdi med varierende årlig økning av energipris fra 0 % - 7 %

Resultatene av nåverdianalysen som er illustrert i Figur 69 viser alle de ulike oppvarmings-systemene i forhold til referansesystemet med kun direktevirkende elektrisitet som oppvarmings-kilde. Det er stor forskjell på lønnsomheten til de ulike systemene, der luft-veske varmepumpe-systemet kommer best ut i samtlige scenarier av varierende årlig prisstigning. Ved lav prisstigning vil innsparte kostnader fra redusert energibruk være svært liten ved den lange tidshorizonten, og dette er grunnen til at nåverdi blir lav når det er lav eller ingen prisøkning i fremtidige energipriser. En fremtidig årlig prisstigning i det øvre sjiktet vil allikevel være å anta som det mest sannsynlige, siden dette vil tilsvare omtrentlig stabil pris hvis en tar hensyn til den reelle prisstigningen og inflasjon. Ved å sammenlikne nåverdi for sparte kostnader i år 1 til og med år 40, ble det funnet at en årlig prisstigning på 5,6 % var den verdien gjorde at årlig nåverdi av inntekt holdt seg konstant. En forventet prisvekst i energipris lik realrente eller mer er ikke usannsynlig etter hvert som strømoverføring til Europa for et felles strømmarked blir mer utbygd, og pris på fossile brenslere øker. Teknologiske nyvinninger kan imidlertid kunne bidra til reduserte energiprisene.

Uavhengig av fremtidig endring av energipriser er det luft-veske varmepumpesystemet som kommer best ut. Solfangersystemet vil kunne ha en dramatisk bedre økonomi hvis energien fra systemet kunne langtidslagres, som tidligere diskutert i kapittel 8.3.10. Også et tappevannsbehov i bygningen ville kunne bidra til en bedre lønnsomhet i nåverdianalysen for alle energisystemene.

Av de simuleringer som er gjort i denne rapporten må det dermed konkluderes med at oppvarmingssystemet som har en luft-veske varmepumpe og direktevirkende elektrisitet som spisslast er økonomisk det beste alternativet. Oppvarmingssystemet med veske-vann varmepumpe med energibrønn til varmekilde og direktevirkende elektrisitet som spisslast ligger på en andreplass. En større vann-veske varmepumpe kunne muligens blitt brukt med et bedre utfall i denne nåverdianalysen, men innkjøpspris ville da også vært tilsvarende større fordi det hadde vært nødvendig med større energibrønn.

10 Diskusjon og konklusjon

Passivhus er karakterisert som bygg med svært lite energibehov til oppvarming, oppvarmingsbehovet er redusert til en fjerdedel av eksisterende snitt for bygninger [32]. Det resterende oppvarmingsbehovet til bygget er for det meste i vintermånedene, den tiden det er minst solinnstråling. Dette gjelder i svært stor grad også for kontorbygget denne rapporten omhandler. Dette resulterer i at varmpumpe, som leverer energi til bygningens vannbårne oppvarmingsystem, får lav brukstid og dermed ikke bidrar til så store energibesparelser som tilsvarende system hadde gjort i en bygning med et høyere energibehov. Et annet resultat av dette er at solfangersystemet får en svært liten nytteverdi, da det aller meste av solinnstrålingen skjer når det ikke er oppvarmingsbehov i bygningen. Dette resulterer i at solfangersystemet med en 100 m² solfanger leverte under 1 300 kWh/år, og vil av den grunn ikke kunne rettferdiggjøre en innkjøpspris på 305 000 kr. Om den tapte energien fra solfangeren, som utgjør over 18 000 kWh årlig, kunne utnyttes helt eller delvis, kunne dette utgjøre store utslag på energibruken til oppvarmingsystemet. Dette vil for eksempel kunne gjøres ved å dumpe overskuddsvarme fra solfangersystemet ned i energibrønnen når det ikke er behov for den. Et behov for varmt tappevann i bygningen vil også kunne øke nytteverdien av både solfangersystem og varmpumper betraktelig.

Av de simuleringer som er gjort i denne rapporten konkluderes det med at oppvarmingsystemet som har en luft-veske varmpumpe og direktevirkende elektrisitet som spisslast er det økonomisk mest gunstige alternativet. Oppvarmingsystemet med vann-veske varmpumpe med energibrønn til varmekilde og direktevirkende elektrisitet som spisslast ligger på en andreplass. En større vann-veske varmpumpe kunne muligens blitt brukt med et bedre utfall i denne nåverdianalysen, men innkjøpspris ville da også vært tilsvarende større fordi det hadde vært nødvendig med større energibrønn.

Simuleringen som ble gjort for å avdekke effektbehovet til takvarmepanelene avdekket store forskjeller i de ulike rom. Det vil sterkt anbefales å tilpasse takvarme etter rommets maksimale effektbehov istedenfor en lik gjennomsnittlig effektdekning på hele byggets areal som er indikert i vedlagte skisser.

Behovsanalysen av bygningen der kun soner beregnet på varig opphold ble klimatisert og bygningen hadde utvendig solavskjerming med automatisk styring basert på innetemperatur og solinnstråling, endte med et totalt energibehov på 356 026 kWh/år. Dette tallet ble sammenlignet med tilsvarende simulering i SIMIEN, der det ble konstatert store variasjoner. Behovsimuleringen i EnergyPlus sier imidlertid ikke stort om det faktiske energibehovet med klimasystem og vannbårent oppvarmingsystem installert. Da denne simuleringen ble kjørt endte energibehovet opp med 208 461 kWh/år for simulering med nattsinking av innetemperaturen utenfor arbeidstid, og 227 476 kWh/år for tilsvarende simulering med konstant innetemperatur.

Ved å benytte konstant innetemperatur istedenfor nattsinking økte energibehovet med over 19 000 kWh/år, men denne økningen i varmebehov ble spart inn for energisystemene med varmepumpe ved at varmepumpesystemet fikk en større dekningsgrad på grunn av et mer stabilt effektbehov. Dermed kan oppvarmingssystemet hente mer "gratis" varme fra energikilden til varmepumpa, og slik få en mer økonomisk drift. Resultatet av energiforsyningsanalysen konkluderer dermed med at luft-veske varmepumpa med direktevirkende elektrisitet som spisslast kom best ut i simuleringene og den økonomiske analysen. Dette systemet har en merverdi investeringskostnad på 246 000 kr og et totalt energibruk til bygningen på 161 341 kWh/år.

SketchUp var et svært nyttig verktøy til å få korrekt geometri på bygningen, men programmet viste seg å bli svært ustabil når bygningen ble kompleks. Etter at simuleringene var ferdig hadde jeg tenkt å hente ut noen flere bilder av 3D-modellen av bygningen for illustrasjon, men etter omtrent 30-40 forsøk på å åpne de ulike modellene av bygningen måtte jeg gi det opp. Hver eneste gang SketchUp skulle hente opp modellen krasjet programmet.

Arbeidet med EnergyPlus var svært tidkrevende, og jeg brukte lang tid på å skjønne hvordan programmet var lagt opp og fungerte. Det å installere nye ting i bygningen, som for eksempel en relativt enkel ting som utvendig solavskjerming tok omtrent 20 timer å forstå hvordan skulle gjøres, og like lang tid å få til å fungere korrekt. Svært mye av tiden jeg har brukt på denne oppgaven har dermed vært brukt til å lære meg EnergyPlus, og lese eksempelfiler og prøve og feiling. EnergyPlus er svært komplekst, og en har utrolig mange valgmuligheter. Dette krever også svært mye input for komponentene som blir lagt inn, noe som igjen krever mye tid. EnergyPlus gir svært gode simuleringer og gir mange muligheter man ikke har i enklere programmer som for eksempel SIMIEN.

11 Videre arbeid

For å se på hvilket energibehov bygningen vil kunne ha under faktiske forhold, bør det gjøres simuleringer med ulik belastning av bygget. Belastninger som elektriske installasjoner bør for eksempel settes forskjellig for de ulike sonene som for eksempel kontorer, møterom etter hvilke elektriske apparater som kan tenkes å bli benyttet her. Dette bør gjøres i et "worst case scenario" der det også tas i betraktning at kontorbygninger ofte bygges om innvendig, slik at store arealer kan bli bygget om til små cellekontorer med stor belastning.

Simulering bør også gjøres der det blir benyttet langtidslagring av solenergien. Dette kan gjøres ved å dumpe overflødig varme i energibrønn.

Styring og optimalisering av styring mellom behov og varmepumpedrift er også noe som kunne vært undersøkt og analysert videre

Kilder

1. Senter for fornybar energi. *Energibruk og energieffektivisering*. [cited 2012 27.07]; Available from: http://www.sffe.no/?page_id=63
2. *Bygg for framtida*, Kommunal- og regionaldepartementet, Editor 2009.
3. *St.meld. nr. 34 Norsk klimapolitikk*, Det kongelige miljøverndepartement, Editor 2006-2007.
4. *Avtale om klimameldingen 2008*.
5. Lavenergiprogrammet. [cited 2012 14.06]; Available from: <http://lavenergiprogrammet.no/dette-er-passivhus/hvor-kan-man-faa-hjelp-til-aa-bygge-passivhus-article95-123.html>
6. Enova. *Om Enova*. [cited 2012 30.05]; Available from: <http://www.enova.no/om-enova/36/0/>
7. NVE. *Energimerking - Om regelverket*. [cited 2012 30.05]; Available from: <http://www.energimerking.no/no/Energimerking-Bygg/Om-energimerkesystemet-og-regelverket/Om-regelverket/>
8. McKinsey, *Climate Change Special Initiative*, 2007.
9. Fornybar.no. *Ordliste - fornybar energi*. [cited 2012 17.07]; Available from: <http://www.fornybar.no/sitepageview.aspx?sitePageID=1786>
10. Trond Hartvedt Nilsen, *Fornybar energi: Metoder og virkemidler*. Universitetet i Bergen.
11. Vindportalen. *Vindproduksjon i Verden*. [cited 2012 17.07]; Available from: <http://www.vindportalen.no/vind-i-verden-1.aspx>
12. Vindportalen. *Vind i Norge*. [cited 2012 17.07]; Available from: <http://www.vindportalen.no/vind-i-norge.aspx>
13. Sweco Grøner, *Potensialstudie på havenergi*, 2007.
14. Vindportalen. *Offshore vindkraft*. [cited 2012 17.07]; Available from: <http://www.vindportalen.no/vind-i-norge/offshore-vind.aspx>
15. Solenergi.no. *Teknologi*. [cited 2012 17.07]; Available from: <http://www.solenergi.no/om-solenergi/>
16. Fornybar.no. *Bioenergi*. [cited 2012 17.07]; Available from: <http://www.fornybar.no/sitepageview.aspx?sitePageID=1638>
17. Bellona. *Bioenergi*. [cited 2012 17.07]; Available from: <http://www.bellona.no/subjects/Bioenergi>
18. Jørn Stene, *Energi21 Innsatsgruppe for fornybar termisk energi Varmepumpe- og kulsesystemer*, 2011.
19. Jørn Stene, *Undervisningsmaterieell: 1_Termodynamikk*, 2011.
20. Jørn Stene, *Varmepumper Grunnleggende varmepumpeteknikk*. 4. ed1997.
21. Wikipedia. *R-410A*. [cited 2012 31.05]; Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/R-410A#cite_note-r410afaq-5
22. Trygve Magne Eikevik, *Undervisningsmaterieell: Working fluids in Refrigeration and Heat Pump Systems*.

23. Jørn Stene og Tore Hjerkin, *Høyeffektive CO₂-varmepumper for varmtvannsberedning*, 2008.
24. Yang Chen, Per Lundqvist, André Alves og Leonie Brachert, *CO₂heat pumps for the Swedish market*, in *Test and analysis of the SANYO ECO-CUTE heat pump modified for Swedish conditions*
25. Jørn Stene Arne Jakobsen, *Luft/luft-varmepumper. Teknologisk status, Erfaringer i Norge*, 2003.
26. Bjørn Halvorsen, *Energibrønner vs. uteluft som energikilde til varmepumper*, 2009.
27. SINTEF. *Kontorbygg - Bravidabygget (Fredrikstad)*. [cited 2012 11.07]; Available from: <http://www.sintef.no/Projectweb/Annex29/Installasjoner/Kontorbygg---Bravidabygget-Fredrikstad/>
28. Jostein Skree Norsk Teknologi, Geir Kvifte, *Varmepumper. Hefte nr. 9*, 2008.
29. SGP. *Luft-veske varmepumpe HPS 81 BL* [cited 2012 10.06]; Available from: http://www.sgp.no/bilder/SGP_katalog_2011_interaktiv_131600.pdf
30. Variant VVS. *Vann-veske varmepumpeCTA Optiheat DUO OH- /R-410A*. [cited 2012 05.06]; Available from: <http://www.variantvvs.no/index.php/varmepumpe/duovannvannvarmepumpe.html>
31. Per Stykket ABK, *Telefon og e-post*
32. Inger Andresen, *Prosjektrapport 22. Planlegging av solvarmeanlegg for lavenergiboliger og passivhus. En introduksjon*, 2008.
33. Vaillant. Telefonsamtale 12.06.2012.
34. Standard Norge. *Passivhus yrkesbygninger – høring avsluttet*. [cited 2012 31.05]; Available from: <http://www.standard.no/no/Nyheter-og-produkter/Nyhetsarkiv/Bygg-anlegg-og-eiendom/2012/Passivhus-yrkesbygninger--horing-pa-ny-standard-er-avsluttet/>
35. Michael Klinski Tor Helge Dokka, Matthias Haase og Mads Mysen, *Prosjektrapport 42 Kriterier for passivhus- og lavenergi bygg – Yrkesbygg*, 2009.
36. Norsk Standard, *Beregning av bygningers energiytelse. Metode og data*, 2011.
37. IEA Heat pump centre. *Heat pumps in residential and commercial buildings*. [cited 2012 13.05]; Available from: <http://www.heatpumpcentre.org/en/aboutheatpumps/heatpumpsinresidential/Sidor/default.aspx>
38. YIT. *KlimaTak*. [cited 2012 23.06]; Available from: http://www.yit.no/yit_no/fagomr%C3%A5der/klima/klimatak
39. Jan Vilhelm Bakke. *Dårlig erfaring med takvarme*. [cited 2012 20.06]; Available from: <http://www.vvsforum.no/artikkel/5897/daarlig-erfaring-med-takvarme.html>
40. Ole Smedegård, *Analyse av forenkla vassborne varmedistribusjonssystem for større bygninger*. 2012.
41. Jørn Stene, *Undervisningsmaterieill: Dimensjonering av varmepumpeanlegg i bygninger*. 2011.
42. U.S. Department of energy. *About EnergyPlus*. [cited 2012 15.06]; Available from: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_about.cfm

43. Bioforsk. *Klimadata - Landvik*. [cited 2012 12.05]; Available from: <http://lmt.bioforsk.no/lmt/index.php?type=&weatherstation=29&loginterval=1&tid=1336470674>
44. Wikipedia. *Anisotropic filtering*. [cited 2012 06.06]; Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Anisotropic_filtering
45. U.S. Department of Energy. *EnergyPlus Energy Simulation Software*. [cited 2012 15.06]; Available from: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_addons.cfm
46. Trimble SketchUp. *A new home for SketchUp*. [cited 2012 15.06]; Available from: <http://sketchup.google.com/>
47. National Renewable Energy Laboratory. *Commercial Buildings Research and Software Development*. [cited 2012 15.06]; Available from: <http://openstudio.nrel.gov/>
48. NGU. *Grunnforhold*. [cited 2012 14.05]; Available from: <http://www.ngu.no/kart/granada/>
49. Store Norske Leksikon. *Varmeledning*. [cited 2012 11.04]; Available from: <http://snl.no/varmeledning>
50. Wikipedia. *Spesifikk varmekapasitet*. [cited 2012 11.04]; Available from: http://nn.wikipedia.org/wiki/Spesifikk_varmekapasitet
51. Larry Stetler. *Basic Rock Mechanics*. [cited 2012 15.05]; Available from: http://webpages.sdsmt.edu/~lstetler/merlot/rock_mechanics.htm
52. NGU. *Jordvarme*. [cited 2012 20.03]; Available from: <http://www.ngu.no/no/tm/Vare-tjenester/Spor-en-geolog/Tidligere-stilte-sporsmal/Jordvarme/>
53. YR.no. *Været som var Mandal (Vest-Agder)*. [cited 2012 20.03]; Available from: <http://www.yr.no/sted/Norge/Vest-Agder/Mandal/Mandal/statistikk.html>
54. Elisabeth Kjellsson, *Doctoral Thesis, Solar Collectors Combined with Ground-Source Heat Pumps in Dwellings - Analyses of System Performance, Report TVBH-1018*, 2009.
55. Statistisk sentralbyrå. *Elektrisitetsstatistikk, 2010*. [cited 2012 16.07]; Available from: <http://www.ssb.no/elektrisitetaar/>
56. Finansdepartementet. *7.4.5 Lavere realrente*. [cited 2012 16.07]; Available from: <http://www.regjeringen.no/nb/dep/fin/dok/nouer/1998/nou-1998-10/8/4/5.html?id=348539>

Vedlegg 1 - Kostnad for energibrønn fra kommunikasjon ved telefon og e-post med Per Stykket

Mal for beregning av installasjonskostnader for bergvarme, for *klimasone D-* med en *årsmiddeltemperatur på over 7°C*.

Forutsetning for beregningene:

- OBS!! Bergets varmeledningsevne- lambda verdi er antatt til 3,0.
- Varmepumpen har en effektdekningsgrad på 60 %.
- Effekttuttaket er 40 Watt per meter.
- Vannbåren gulvvarme.

Byggets effektbehov ved DUT i kW	Varmepumpestørrelse	Aktivt borehullsdybde meter
30-40	22	405 (3 hull á 150m)
50-60	30	553 (3 hull á 190m)
60-70	40	698 (4 hull á 190m)
80-90	60	1028 (6 hull á 180m)

Antall borehull: Det er tatt høyde for 8 – 10m ned til stabilt grunnvannsnivå.

Installasjonskostnader:

Boring:

- Boring- Kr. 230,- per bormeter inklusive frostsikret kollektor og 3 meter stålrør.
- Ved ytterligere løsmasseboring tillegges Kr. 550,- bormeter for stålrørene.
- Kostnader for transport og tilrigging avhenger av avstanden og adkomst-normalt Kr.2000-4000,-
Tillegg for oppkobling av kollektoranlegget (isolerte rør, samlelum og sveisemateriell) til teknisk rom dekkes ved å legge til ca. kr. 100.- pr. bormeter (Kr. 230 +100)= Kr. 330.-
OBS!! Ikke med i kostnadene er graving og tilbakefylling av grøfter.

Arbeidstid - rørleggerarbeidet i teknisk rom:

90 arbeidstimer

Timepris: Kr. 600,-

VVS-deler, installasjonsmateriell (rør, bend, isolasjonsmateriell etc.):

Kr. 50 000,-

Elektrisk tilkobling:

40 arbeidstimer

Timepris: Kr. 600,-

Samlede installasjonskostnader:

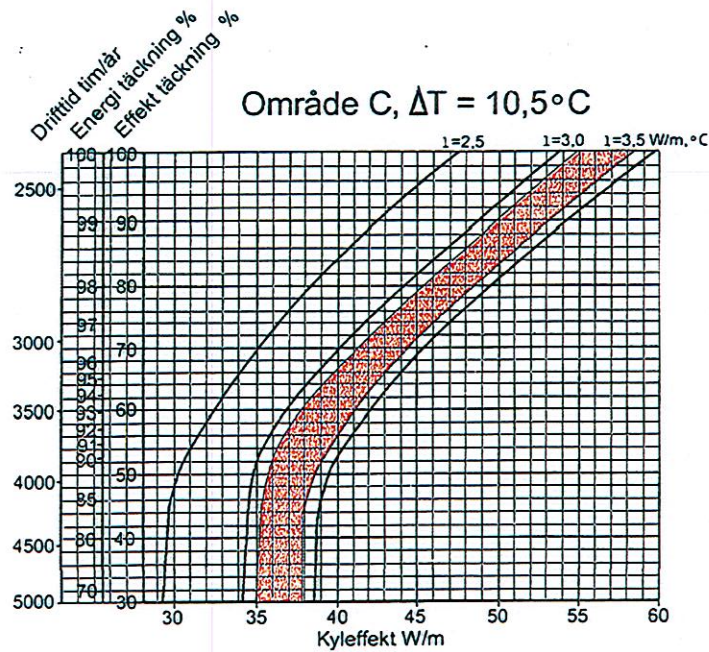
Størrelse på VP	22	30	40	60
Varmepumpe	92 300	97 800	105 200	120 200
Boring*	148500	188100	250800	356400
Arbeid Rørlegger	54 000	54 000	54 000	54 000
VVS-materiell	50 000	50 000	50 000	50 000
EL-tilkobling	24 000	24 000	24 000	24 000
Totalpris:	368 800	413 900	484 000	604 600

*Inkludert alt kollektormateriell utvendig; men eksklusive graving og tilbakefylling.

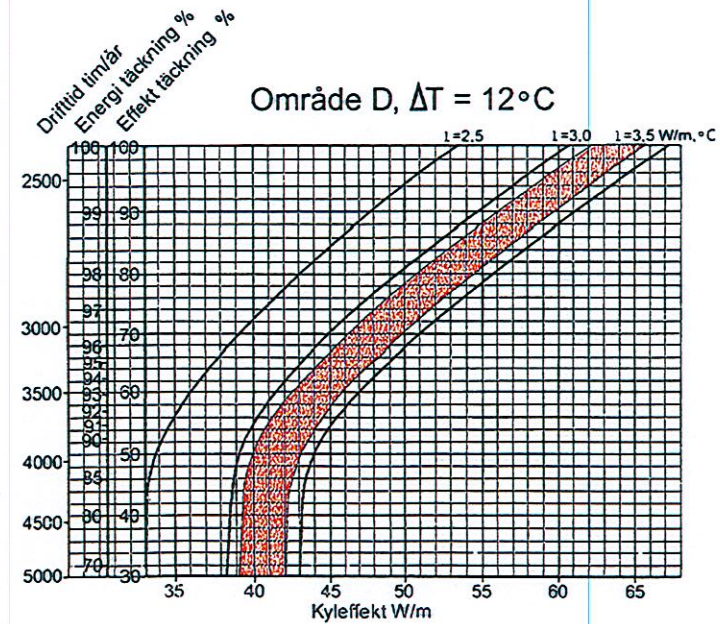
Alle priser er eksklusive m.v.a.

Ovenstående overslag har kun til hensikt å gi et omtrentlig bilde av kostnadene. Detaljert og bindende tilbud kan først gis etter at en aut. installatør og brønnborer har foretatt en befaring.

Effektuttak relatert til klimasone C og D

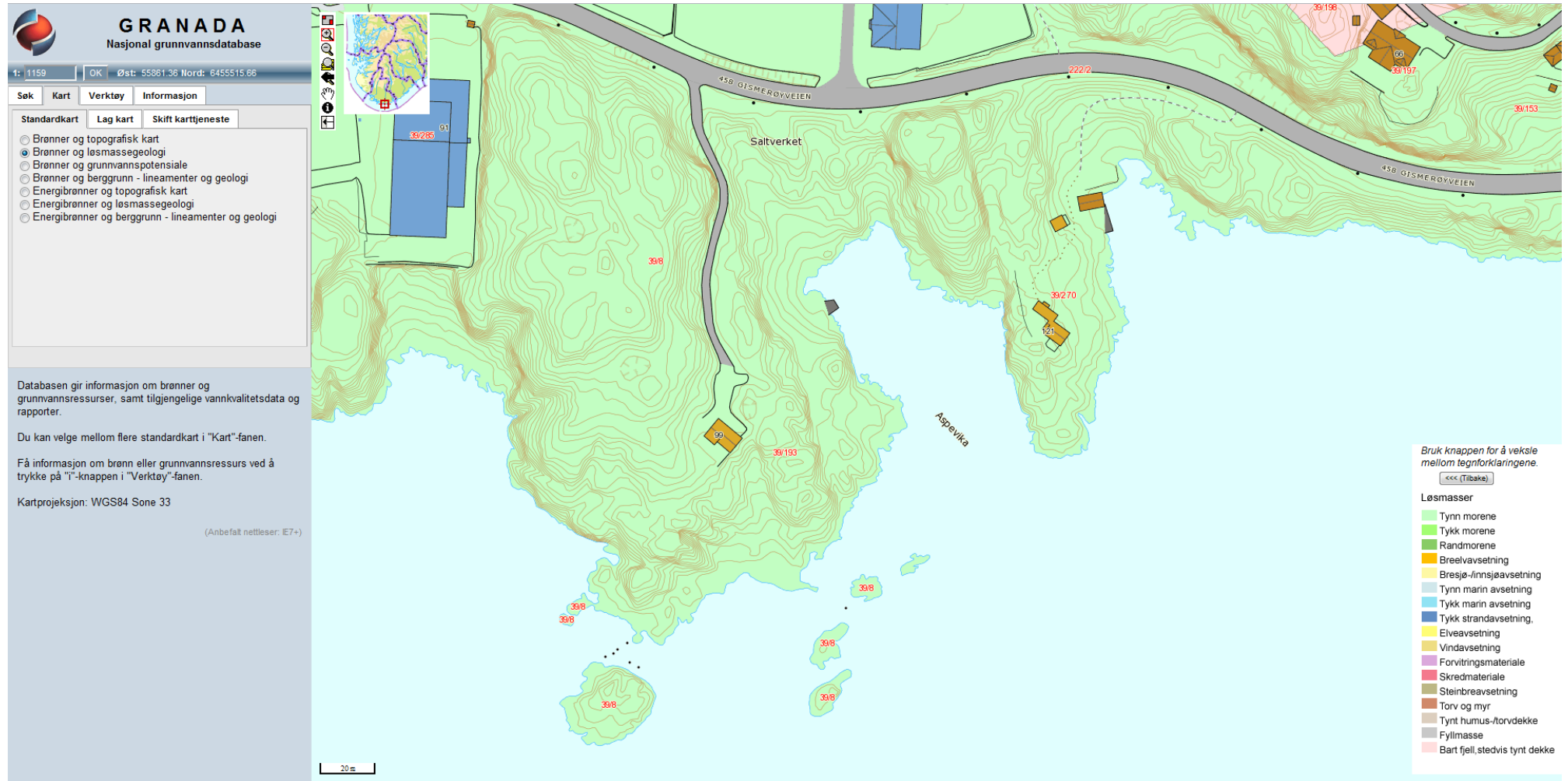


Årsmiddeltemperatur 5 – 7 grader



Årsmiddeltemperatur over 7 grader

Vedlegg 3 – Kart fra NGU over grunnforhold på byggested i Mandal





GRANADA

Nasjonal grunnvannsdatabase

1: 1159 OK Øst: 55835.62 Nord: 6455674.37

Søk Kart Verktøy Informasjon

Kommune Stedsnavn Adresse Eiendom

Norges fastland:

Fylke:

VEST-AGDER (1000)

Kommune:

MANDAL (1002)

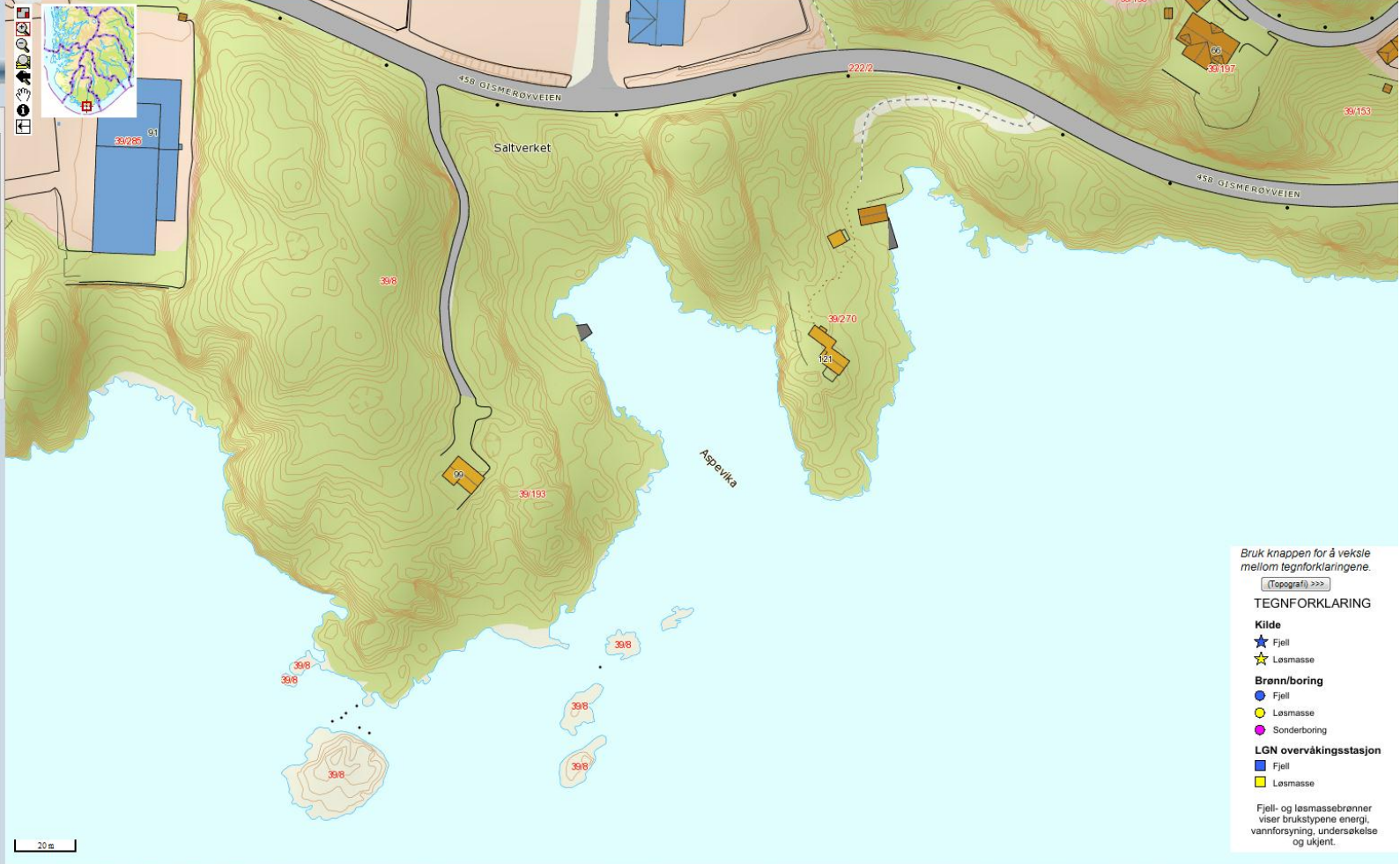
Databasen gir informasjon om brønner og grunnvannressurser, samt tilgjengelige vannkvalitetsdata og rapporter.

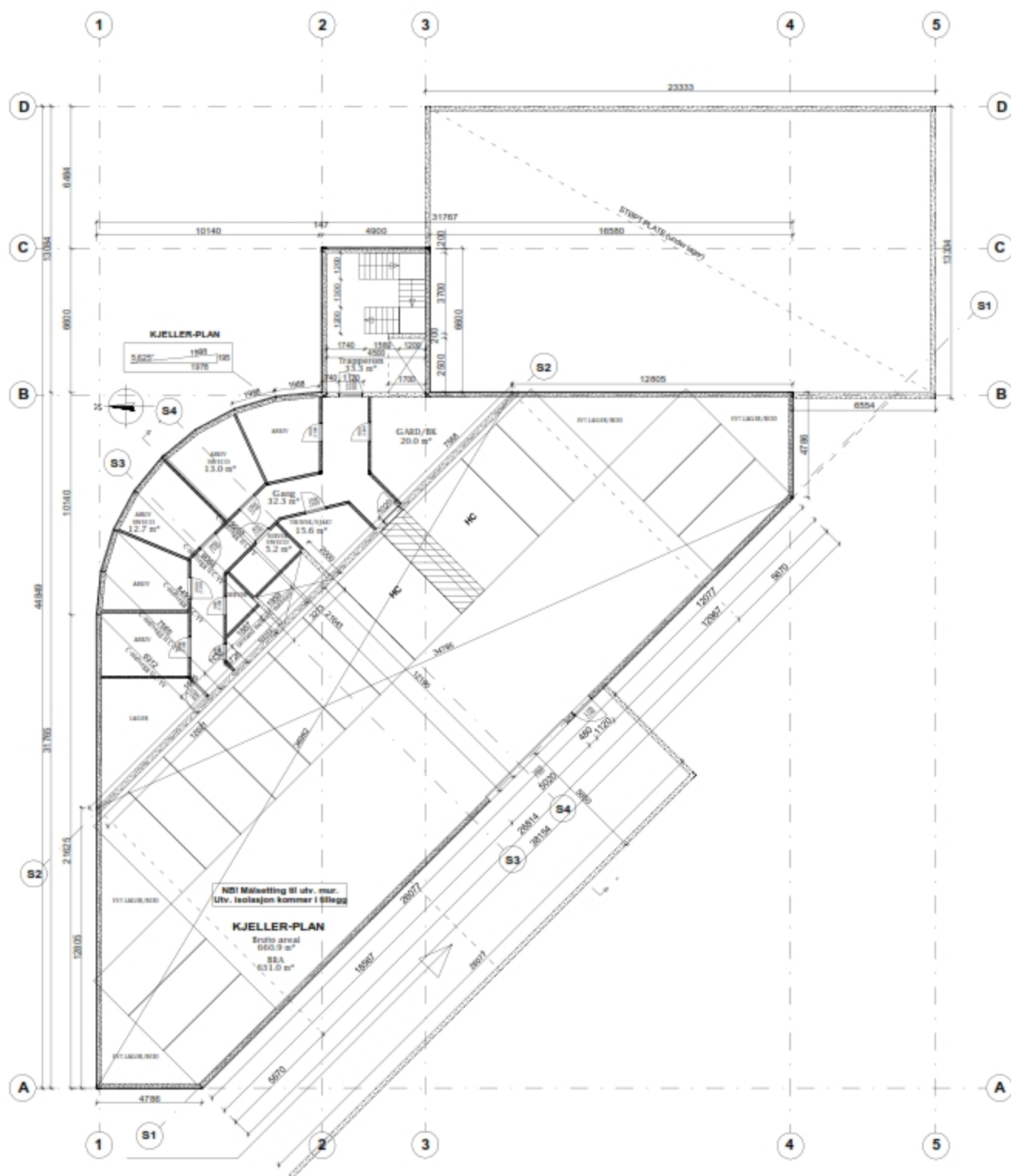
Du kan velge mellom flere standardkart i "Kart"-fanen.

Få informasjon om brønn eller grunnvannressurs ved å trykke på "I"-knappen i "Verktøy"-fanen.

Kartprojeksjon: WGS84 Sone 33




(Anbefalt nettleser: IE7+)

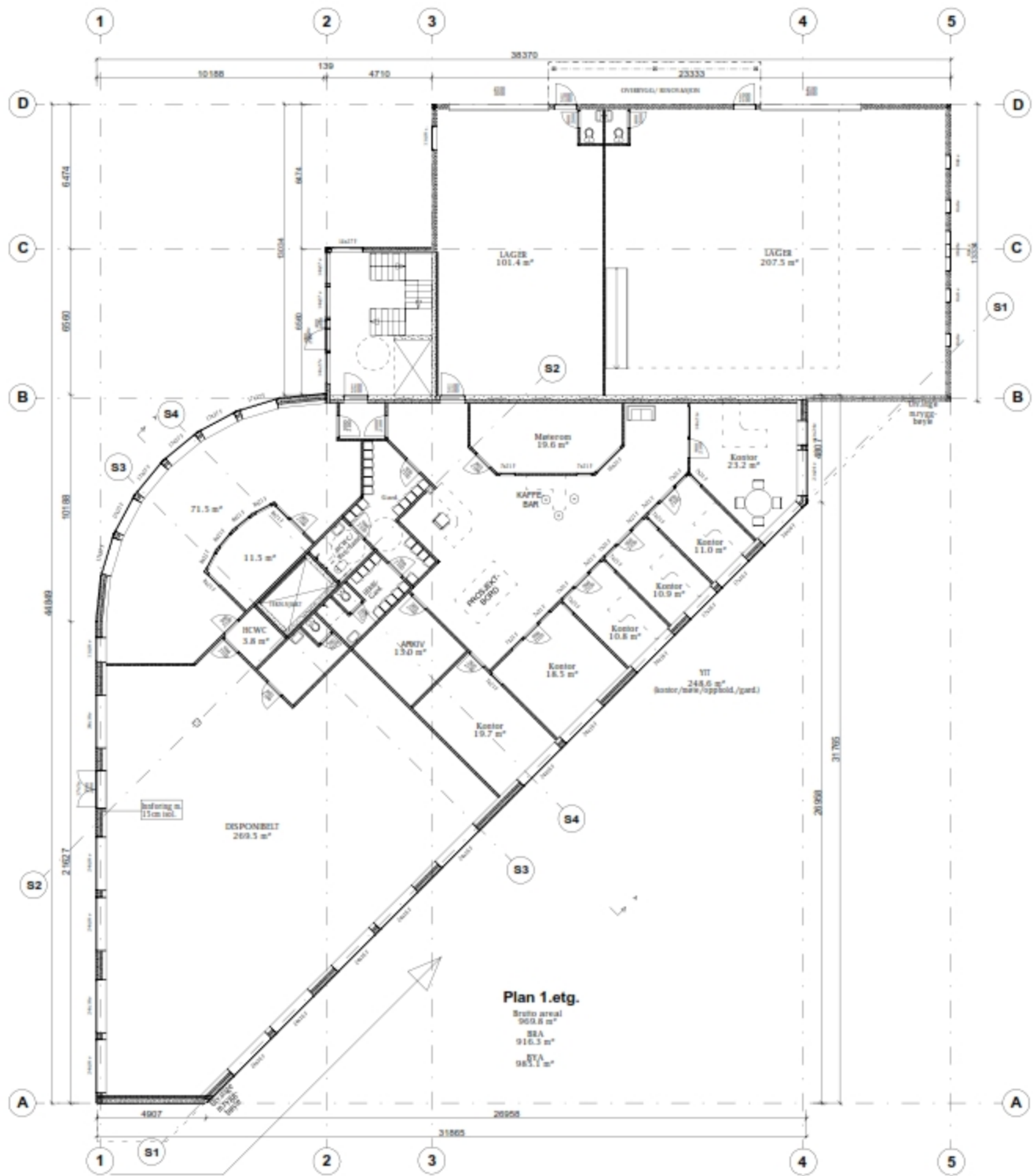




- G Mindre justeringer 10.02.12
- F Tr-dørhjelms-spiral 09.02.12
- D Korr. vinduer/port 16.01.12
- C Mål + fjernet 1 dar 17.01.12




Kjeller-plan

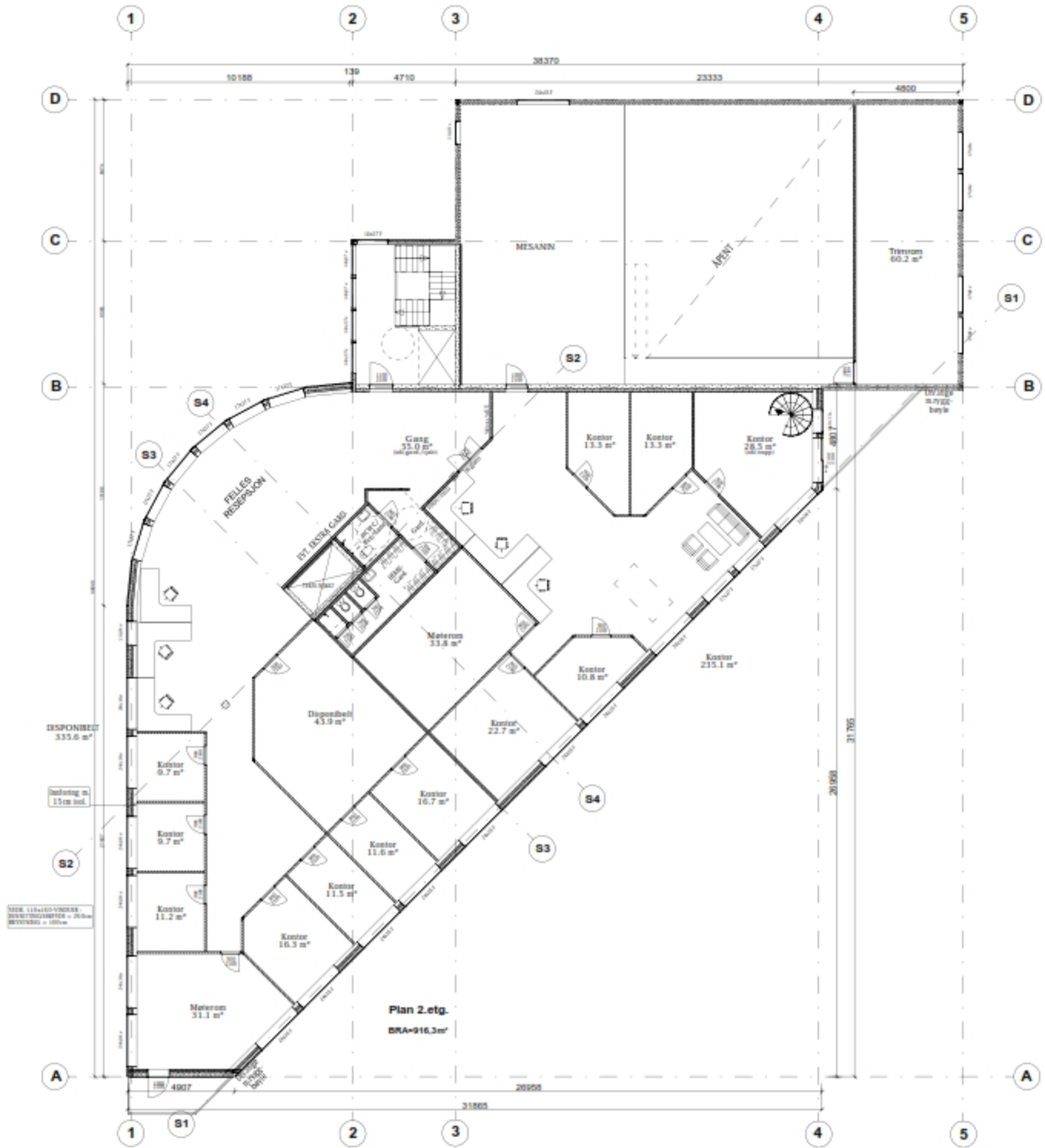
DATA DESIGN SYSTEM	TILTAKSHAVER: Havutsikt AS (nytt næringsbygg)		Tegningen er levert av:	
	BYGGEPLASS: Saltverket		 Torjusheigata 7 - 4514 Mandal TEL: 47 95 77 77 Mail: post@byggplan.as	
	KOMMUNE: Mandal GNR: BNR:			
	Tegn:	Tegn.nr. 500		ANNETT:  LARSEN INGENIØRBYGG 
Dato: 30.12.11	Prosjekt nr. 11H01			
Målestokk: 1:200				
TEGNINGEN MÅ HVERKEN HELT ELLER DELVIS KOPIERES ELLER BENYTTES VED UTFØRELSE AV ARBEIDET SOM RETTIGHETSINNEHAVER IKKE MEDVIRKER I				



G	Mindre justeringer	10.02.12
F	Tr-dørhjelms-spiral	09.02.12
D	Korr. vinduer/port	18.01.12
A	Korr. YIT	10.01.12

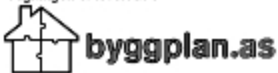


Plan 1.etg.

DATA DESIGN SYSTEM	TILTAKSHAVER: Havutsikt AS (nytt næringsbygg)		Tegningen er levert av:	
	BYGGEPLASS: Saltverket		 Torjusheigata 7 - 4514 Mandal TEL: 47 95 77 77 Mail: post@byggplan.as	
	KOMMUNE: Mandal GNR: BNR:			
	Tegn:	Tegn.nr. 501		ANNDKT:  LARSEN INGENIØRBYGG 
Dato: 30.12.11	Prosjekt nr. 11H01			
Målestokk: 1:200				
TEGNINGEN MÅ HVERKEN HELT ELLER DELVIS KOPIERES ELLER BENYTTES VED UTFØRELSE AV ARBEIDET SOM RETTIGHETSINNEHAVER IKKE MEDVIRKER I				







Plan 2. etg.

G	Mindre justeringer	10.02.12
F	Tr-dørhjørne-spiral	09.02.12
E	Forslag innredning/møbl	30.01.12
D	Korr. vinduer/port	16.01.12

DATA DESIGN SYSTEM	TILTAKSHAVER: Havutsikt AS (nytt næringsbygg)		Tegningen er levert av:	
	BYGGEPLASS: Saltverket		 Torjusheigata 7 - 4514 Mandal TEL: 47 95 77 77 Mail: post@byggplan.as	
	KOMMUNE: Mandal GNR: BNR:			
	Tegn:	Tegn.nr. 502		ANNETT:  LARSEN INGENIØRBYGG 
Dato: 30.12.11	Prosjekt nr. 11H01			
Målestokk: 1:200				
TEGNINGEN MÅ HVERKEN HELT ELLER DELVIS KOPIERES ELLER BENYTTES VED UTFØRELSE AV ARBEIDEN SOM RETTIGHETSINNEHAVER IKKE MEDVIRKER I				



Plan 3.etg.

DATA DESIGN SYSTEM	TILTAKSHAVER: Havutsikt AS (nytt næringsbygg)		Tegningen er levert av:  byggplan.as	
	BYGGEPLASS: Saltverket		Torjusheigata 7 - 4514 Mandal TE: 47 95 77 77 Mail: post@byggplan.as	
	KOMMUNE: Mandal GNR: BNR:		ANSVORT:  LARSEN INGENIØRBYGG	
	Tegn:	Tegn.nr. 503	 LARSEN INGENIØRBYGG	
Dato: 30.12.11	Prosjekt nr. 11H01			
Målestokk: 1:200		 LARSEN INGENIØRBYGG		
TEGNINGEN MÅ HVERKEN HELT ELLER DELVIS KOPIERES ELLER BENYTTES VED UTFØRELSE AV ARBEIDEN SOM RETTIGHETSINNEHAVER IKKE MEDVIRKER I				

- G Mindre justeringer 10.02.12
- F Tr-dør/hjærne-spiral 09.02.12
- E Forslag inndel/ møbl 30.01.12
- D Korr. vinduer/ port 18.01.12
- B Korr. vindu 12.01.12

Vedlegg 5 – SIMIEN-rapport



SIMIEN

Evaluering passivhus

Simuleringsnavn: Passivhusevaluering

Tid/dato simulering: 10:30 14/2-2012

Programversjon: 5.008

Brukernavn: Flerbruker

Firma: YIT

Inndatafil: W:\...\Havutsikten - Passivhusstandard - Uten trappeoppgang.smi

Prosjekt: Havutsikten

Sone: Alle soner

Resultater av evalueringen	
Evaluering mot passivhusstandarden	Beskrivelse
Varmetapsramme	Bygningen tilfredstiller kravet for varmetapstall
Energiytelse	Bygningen tilfredsstillers krav til energiytelse
Minstekrav	Bygningen tilfredsstillers minstekrav til enkeltkomponenter
Luftmengder ventilasjon	Luftmengdene tilfredsstillers minstekrav gitt i prosjektrapport 42 (tabell 2)
Samlet evaluering	Bygningen tilfredstiller alle krav til passivhus

Varmetapsbudsjett	
Beskrivelse	Verdi
Varmetapstall yttervegger	0,05
Varmetapstall tak	0,03
Varmetapstall gulv på grunn/mot det fri	0,03
Varmetapstall glass/vinduer/dører	0,14
Varmetapstall kuldebroer	0,03
Varmetapstall infiltrasjon	0,03
Varmetapstall ventilasjon	0,19
Totalt varmetapstall	0,50
Krav varmetapstall	0,50

Energiytelse		
Beskrivelse	Verdi	Krav
Netto oppvarmingsbehov	9,9 kWh/m ²	15,0 kWh/m ²
Netto kjølebehov	9,2 kWh/m ²	10,0 kWh/m ²
CO2-utslipp	25 kg/m ²	25 kg/m ²



SIMIEN

Evaluering passivhus

Simuleringsnavn: Passivhusevaluering

Tid/dato simulering: 10:30 14/2-2012

Programversjon: 5.008

Brukernavn: Flerbruker

Firma: YIT

Inndatafil: W:\...\Havutsikten - Passivhusstandard - Uten trappeoppgang.smi

Prosjekt: Havutsikten

Sone: Alle soner

Minstekrav enkeltkomponenter		
Beskrivelse	Verdi	Krav
U-verdi yttervegger [W/m ² K]	0,10	0,15
U-verdi tak [W/m ² K]	0,08	0,13
U-verdi gulv mot grunn og mot det fri [W/m ² K]	0,08	0,15
U-verdi glass/vinduer/dører [W/m ² K]	0,71	0,80
Normalisert kuldebroverdi [W/m ² K]	0,03	0,03
Årsmidlere temperaturvirkningsgrad varmegjenvinner ventilasjon [%]	83	80
Spesifikk vifteeffekt (SFP) [kW/m ³ /s]:	1,50	1,50
Lekkasjetall (lufttetthet ved 50 Pa trykkforskjell) [luftvekslinger pr time]	0,50	0,60

Energibudsjett		
Energipost	Energibehov	Spesifikt energibehov
1a Romoppvarming	11756 kWh	6,2 kWh/m ²
1b Ventilasjonsvarme (varmebatterier)	7062 kWh	3,7 kWh/m ²
2 Varmtvann (tappevann)	9548 kWh	5,0 kWh/m ²
3a Vifter	26408 kWh	13,9 kWh/m ²
3b Pumper	3940 kWh	2,1 kWh/m ²
4 Belysning	29840 kWh	15,7 kWh/m ²
5 Teknisk utstyr	35809 kWh	18,8 kWh/m ²
6a Romkjøling	13160 kWh	6,9 kWh/m ²
6b Ventilasjonskjøling (kjølebatterier)	4278 kWh	2,2 kWh/m ²
Totalt netto energibehov, sum 1-6	141802 kWh	74,4 kWh/m ²

Levert energi til bygningen (beregnet)		
Energivare	Levert energi	Spesifikk levert energi
1a Direkte el.	106415 kWh	55,8 kWh/m ²
1b El. Varmepumpe	12274 kWh	6,4 kWh/m ²
1c El. solenergi	0 kWh	0,0 kWh/m ²
2 Olje	0 kWh	0,0 kWh/m ²
3 Gass	0 kWh	0,0 kWh/m ²
4 Fjernvarme	0 kWh	0,0 kWh/m ²
5 Biobrensel	0 kWh	0,0 kWh/m ²
6. Annen ()	0 kWh	0,0 kWh/m ²
Totalt levert energi, sum 1-6	118689 kWh	62,3 kWh/m ²



SIMIEN

Evaluering passivhus

Simuleringsnavn: Passivhusevaluering

Tid/dato simulering: 10:30 14/2-2012

Programversjon: 5.008

Brukernavn: Flerbruker

Firma: YIT

Inndatafil: W:\...\Havutsikten - Passivhusstandard - Uten trappeoppgang.smi

Prosjekt: Havutsikten

Sone: Alle soner

Referanseinformasjon beregning

Evaluering mot passivhusstandarden	Beskrivelse
Beregning	Utført etter Prosjektrapport 42 med validert dynamisk timesberegning etter reglene i NS 3031
Kommune, gårds- og bruksnummer	1002, 39, 261
Konstruksjon og plassering	Næringsbygg Havutsikt, Gismerøyveien 89
Tekniske installasjoner	VAV med vannbåren varmebatteri, vannbåren varmeelementer i taket, LED-belysning, tørrkjøler
Soneinndeling	Kontor: Landskap + cellekontor Møterom Trappeoppgang WC, garderobe og gang Kantine
Arealvurdering	

Dokumentasjon av sentrale inndata (1)

Beskrivelse	Verdi	Dokumentasjon
Areal yttervegger [m ²]:	868	
Areal tak [m ²]:	824	
Areal gulv [m ²]:	750	
Areal vinduer og ytterdører [m ²]:	372	
Oppvarmet bruksareal (BRA) [m ²]:	1905	
Oppvarmet luftvolum [m ³]:	5145	
U-verdi yttervegger [W/m ² K]	0,10	
U-verdi tak [W/m ² K]	0,08	
U-verdi gulv [W/m ² K]	0,08	
U-verdi vinduer og ytterdører [W/m ² K]	0,71	
Areal vinduer og dører delt på bruksareal [%]	19,5	
Normalisert kuldebroverdi [W/m ² K]:	0,03	
Normalisert varmekapasitet [Wh/m ² K]	69	
Lekkasjetall (n50) [1/h]:	0,50	
Temperaturvirkningsgr. varmegjenvinner [%]:	83	



SIMIEN

Evaluering passivhus

Simuleringsnavn: Passivhusevaluering

Tid/dato simulering: 10:30 14/2-2012

Programversjon: 5.008

Brukernavn: Flerbruker

Firma: YIT

Inndatafil: W:\...\Havutsikten - Passivhusstandard - Uten trappeoppgang.smi

Prosjekt: Havutsikten

Sone: Alle soner

Dokumentasjon av sentrale inndata (2)

Beskrivelse	Verdi	Dokumentasjon
Estimert virkningsgrad gjenvinner justert for frostsikring [%]:	83,0	
Spesifikk vifteeffekt (SFP) [kW/m ³ /s]:	1,50	
Luftmengde i driftstiden [m ³ /hm ²]	8,0	
Luftmengde utenfor driftstiden [m ³ /hm ²]	1,0	
Systemvirkningsgrad oppvarmingsanlegg:	1,84	
Installert effekt romoppv. og varmebatt. [W/m ²]:	80	
Settpunkttemperatur for romoppvarming [°C]	20,0	
Systemeffektfaktor kjøling:	2,40	
Settpunkttemperatur for romkjøling [°C]	22,0	
Installert effekt romkjøling og kjølebatt. [W/m ²]:	41	
Spesifikk pumpeeffekt romoppvarming [kW/(l/s)]:	0,50	
Spesifikk pumpeeffekt romkjøling [kW/(l/s)]:	0,60	
Spesifikk pumpeeffekt varmebatteri [kW/(l/s)]:	0,50	
Spesifikk pumpeeffekt kjølebatteri [kW/(l/s)]:	0,60	
Driftstid oppvarming (timer)	12,0	

Dokumentasjon av sentrale inndata (3)

Beskrivelse	Verdi	Dokumentasjon
Driftstid kjøling (timer)	24,0	
Driftstid ventilasjon (timer)	12,0	
Driftstid belysning (timer)	12,0	
Driftstid utstyr (timer)	12,0	
Oppholdstid personer (timer)	12,0	
Effektbehov belysning i driftstiden [W/m ²]	5,00	
Varmetilskudd belysning i driftstiden [W/m ²]	5,00	
Effektbehov utstyr i driftstiden [W/m ²]	6,00	
Varmetilskudd utstyr i driftstiden [W/m ²]	6,00	
Effektbehov varmtvann på driftsdager [W/m ²]	0,80	
Varmetilskudd varmtvann i driftstiden [W/m ²]	0,00	
Varmetilskudd personer i oppholdstiden [W/m ²]	4,00	
Total solfaktor for vindu og solskjerming:	0,33	
Gjennomsnittlig karmfaktor vinduer:	0,20	
Solskjermingsfaktor horisont/bygningsutspring:	0,97	



SIMIEN

Evaluering passivhus

Simuleringsnavn: Passivhusevaluering

Tid/dato simulering: 10:30 14/2-2012

Programversjon: 5.008

Brukernavn: Flerbruker

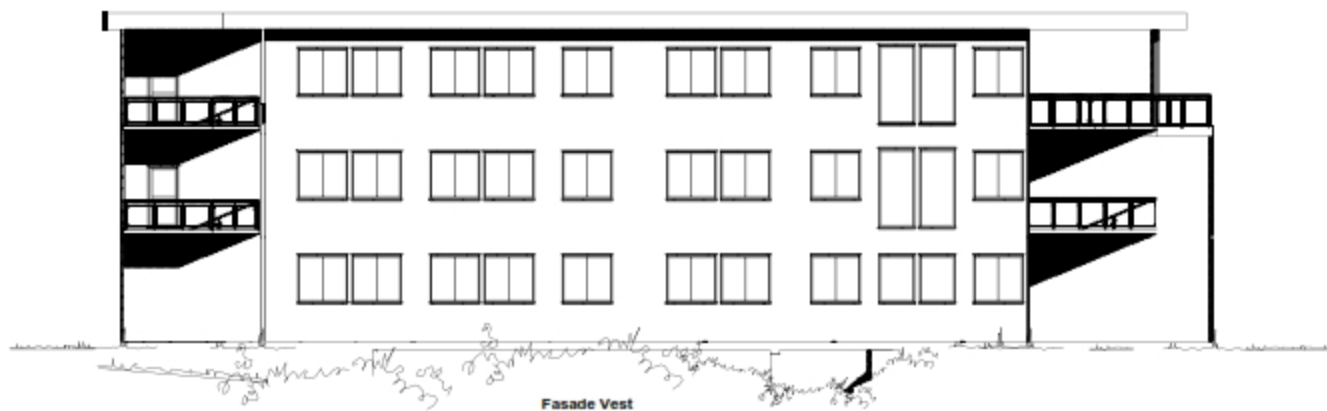
Firma: YIT

Inndatafil: W:\...\Havutsikten - Passivhusstandard - Uten trappeoppgang.smi

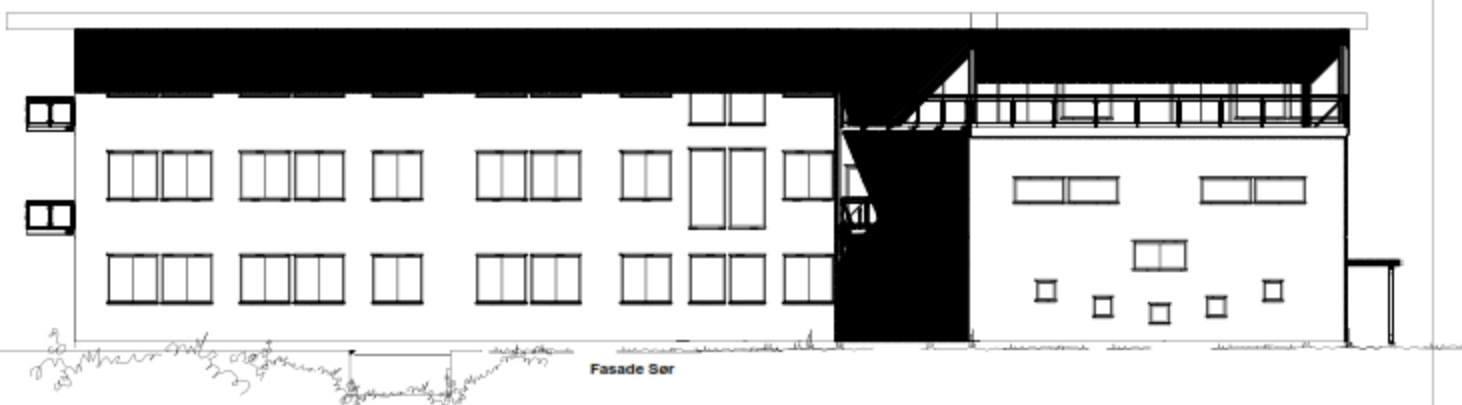
Prosjekt: Havutsikten

Sone: Alle soner

Inndata bygning	
Beskrivelse	Verdi
Bygningskategori	Kontorbygg
Simuleringsansvarlig	André Dalene
Kommentar	



Fasade Vest





Fasade Sør

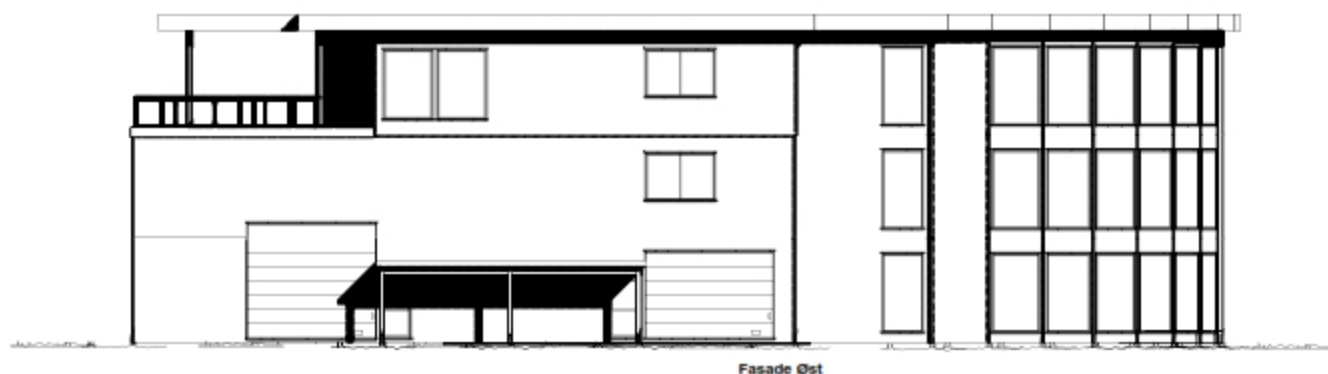


Snitt A-A

Fasader og snitt

G Mindre justeringer 10.02.12
 F Tr-dør/hjeme-spiral 09.02.12
 D Korr. vinduer/ port 16.01.12

DATA DESIGN SYSTEM	TILTAKSHAVER: Havutsikt AS (nytt næringsbygg)		Tegningen er levert av:	
	BYGGEPLASS: Saltverket		 Torjusheigata 7 - 4514 Mandal Tlf. 47 05 77 77 Mail: post@byggplan.as	
	KOMMUNE: Mandal GNR: BNR:			
	Tegn:	Tegn.nr. 504		ARKTEKT:  www.larsen.no Tlf. 47 05 77 77 Mail: post@byggplan.as
Dato: 30.12.11	Prosjekt nr. 11H01			
Målestokk: 1:200				






Fasade Øst



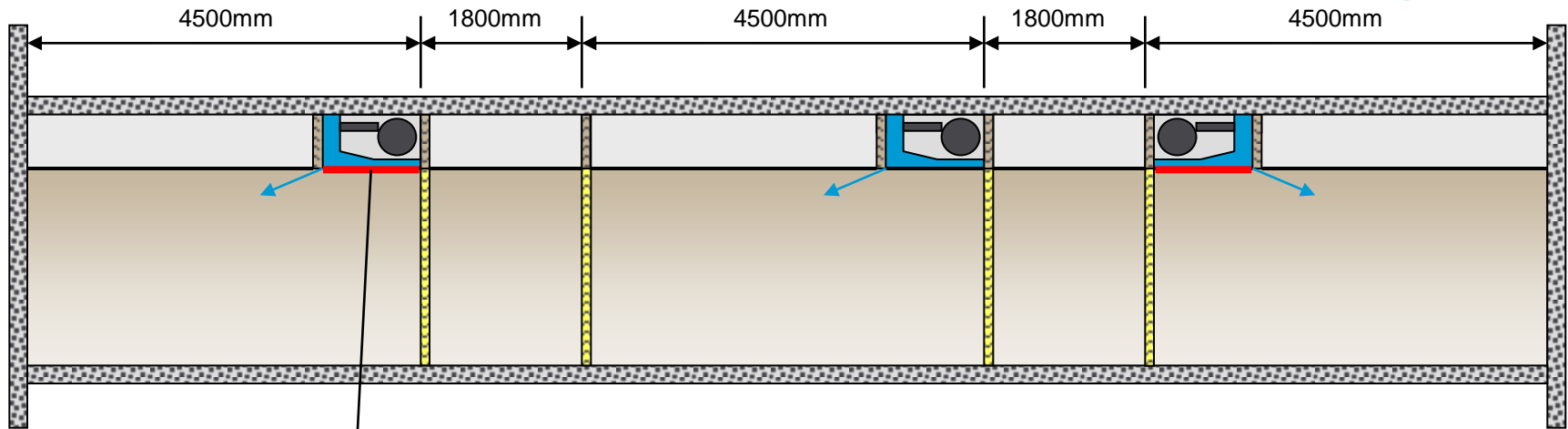
Fasade Nord

G	Mindre justeringer	10.02.12
F	Tr-dør/hjorne-spiral	09.02.12
D	Korr. vinduer/ port	18.01.12
B	Korr. vindu	18.01.12

Fasader

DATA DESIGN SYSTEM	TILTAKSHAVER: Havutsikt AS (nytt næringsbygg)		Tegningen er levert av :  byggplan.as Torjusheigata 7 - 4514 Mandal Tlf. 47 05 77 77 Mail: post@byggplan.as
	BYGGEPLASS: Salverket		
	KOMMUNE: Mandal GNR: BNR:		ARKTEKT :  LARSEN Arkitektur AS 
	Tegn:	Tegn.nr. 505	
Dato: 30.12.11	Prosjekt nr. 11H01		
Målestokk: 1:200			
TEGNINGEN MÅ HVERKEN HELT ELLER DELVIS KOPIERES ELLER BENYTTES VED UTFØRELSE AV ARBEIDEN SOM RETTIGHETSINNEHAVER SIKRE MEDVIRKER I			

Forus Office Arena, varmeløsning



Strålevarme



Energy supply solutions for Norwegian low energy commercial buildings

A draft paper of the master thesis with the same title by
Jostein Wall
jostein.wall@gmail.com

The Norwegian Parliament lays the foundation for an expansion of the efforts to reduce greenhouse gas emissions in Norway with *Klimameldingen* (Climate Report) [1] and *Klimaforliket* (Climate change compromise) [2] that leads to increasingly stricter requirements and increased focus on energy use of buildings. The building stock is responsible for 40 % of the energy consumption and 40 % of the materials used in Norway. Globally, buildings have a proportion of 30 % of world energy consumption, accounting for 21 % of greenhouse gas emissions. The energy consumption in Norwegian households and commercial building areas are now starting to show a declining tendency. Enova's building statistics show that the category the new commercial buildings increasingly are using more energy, mainly based on electricity and oil [3].

The master thesis *Energy supply solutions for Norwegian low energy commercial buildings* investigates a 3,000 m² office building currently being built on the coast in Mandal municipality in Norway, which shall meet the passive house standard. For more pictures and information about the building, visit the building's website at www.havutsikt.no. The building will use a new solution for thermal heat panels in the waterborne heating system, namely, ceiling heating panels to be integrated with the Finnish company YIT's KlimaTak™ [4], as showed in Figure 1.

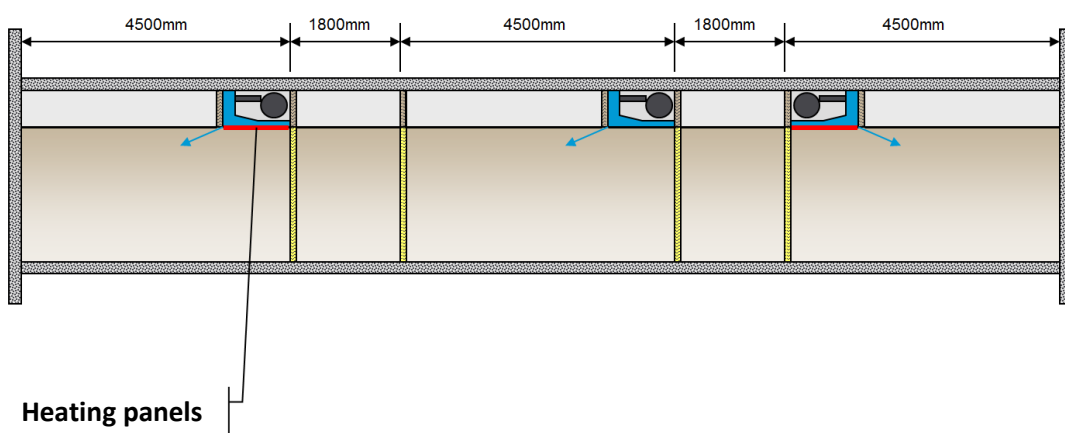


Figure 1 - Sketch of KlimaTak in the ceiling with and without mounted ceiling heating panels. The Heating panels is indicated with a red line.

Passive houses are characterized as a building with very little energy demand for heating. The heating demand is usually reduced to a quarter of the current average demand for buildings [5]. The rest of the heating demand of the building is mostly in the winter months, the same time it is least solar radiation available to utilize for the solar collectors. An indication of how the course of the year can be is shown in Figure 2, which shows the energy demand of a low energy house in Oslo together with the emitted energy from the sun. Figure 2 shows that the solar radiation is in opposite phase to the energy needs for heating, which can be problematic for the utilization of energy from the solar collector. For buildings with constant hot water requirements can solar collector system be designed so that it covers most of the hot water demand during the summer, so that the solar collector system can be utilized throughout the year. However, the office building in this master thesis is simulated without any hot water demand, due to the absence of showers in the building. The only drain sites for hot water in the building are the basins on the restrooms. The hot water demand is therefore assumed to be negligible for the buildings energy demand.

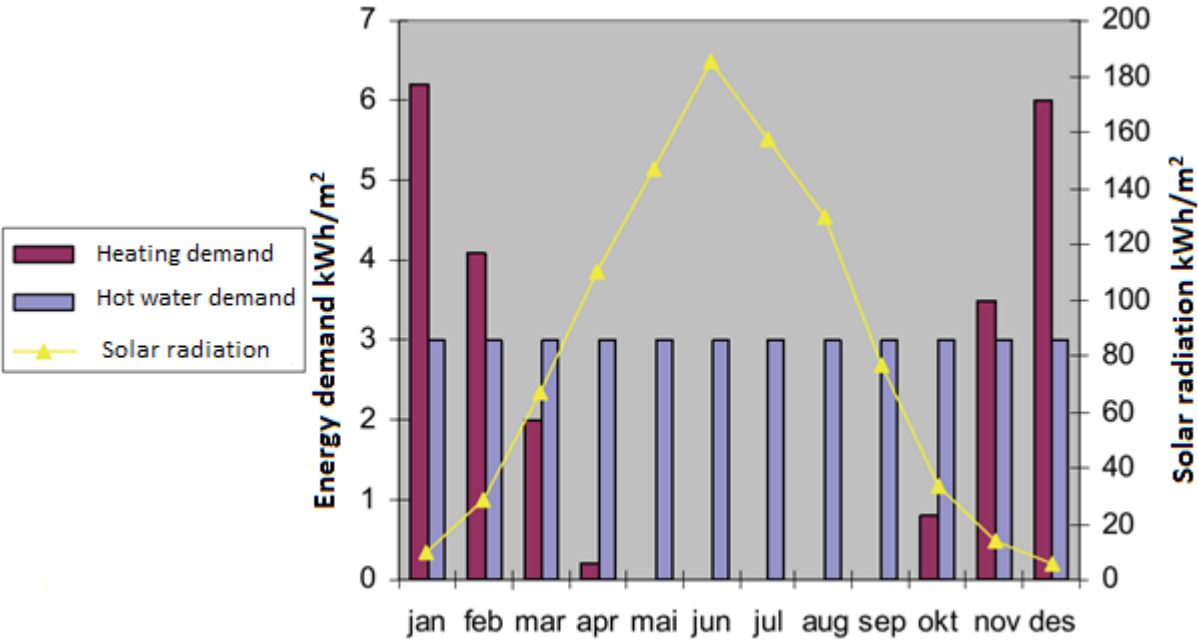


Figure 2 - Monthly energy use for space heating and hot water for a low-energy building (apartment building) in Oslo. Total monthly solar radiation for the same location is also shown.

Simulation model

EnergyPlus is a computer program for energy analysis and thermal simulation [6], and is the simulation program which is used in this paper. A simulation model of the office building was made with basis from the architecture plan drawings with a heating system complete with ceiling heating panels and ventilation system. The simulation of energy demand of the office building was simulated with only the zones for permanent residence air conditioned and heated, and it was installed

automatic outside shading which was controlled by both indoor temperature and solar radiation. The simulation resulted in an annual energy requirement of 356,026 kWh per year. This is a big deviation from the corresponding simulation in SIMIEN, which was done earlier by a consulting company. Different simulations were run with altered energy sources to the waterborne heating system, where the following combinations were examined:

1. Electric heating
2. Air-to-water heat pump + electric peak load
3. Water-to-water heat pump with energy well + electric peak load
4. Solar collector + air-to-water heat pump + pump electric peak load
5. Solar collector + water-to water heat pump with energy well + electric peak load

The heat pump which is used in the simulations uses R410a as the refrigerant, and the water-to-water heat pump uses an energy well with an active borehole depth of 1,000 m total.

A model of the building was built in SketchUp [45] with OpenStudio [46], and then imported to EnergyPlus. Output data from the simulations was then imported to Microsoft Excel for the processing. The 3D-model made of the building in SketchUp is showed in Figure 3 and Figure 4.

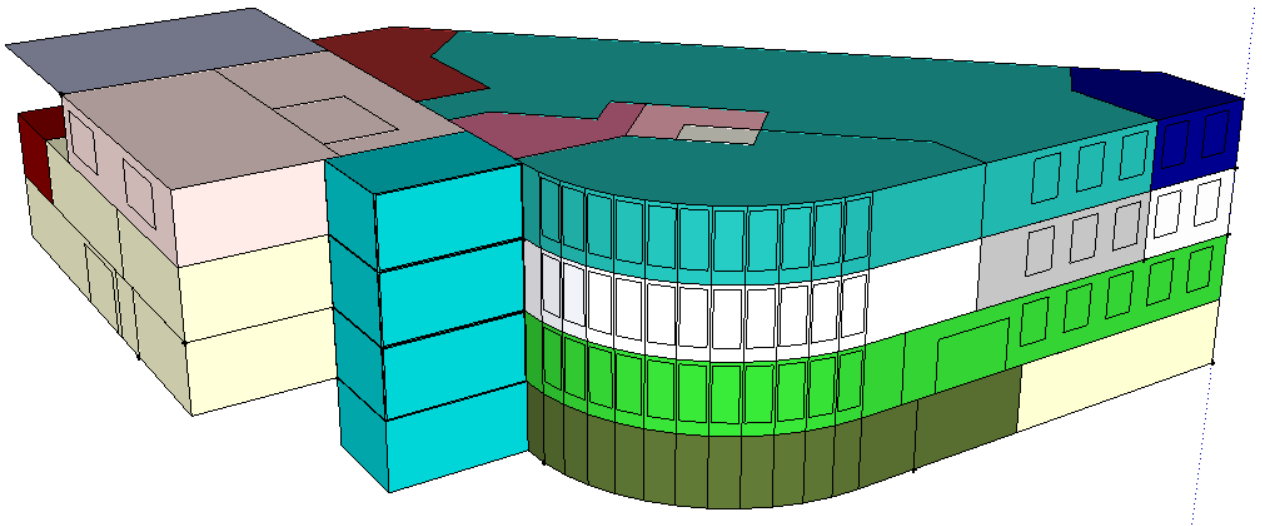


Figure 3 - Building model as seen from the shore

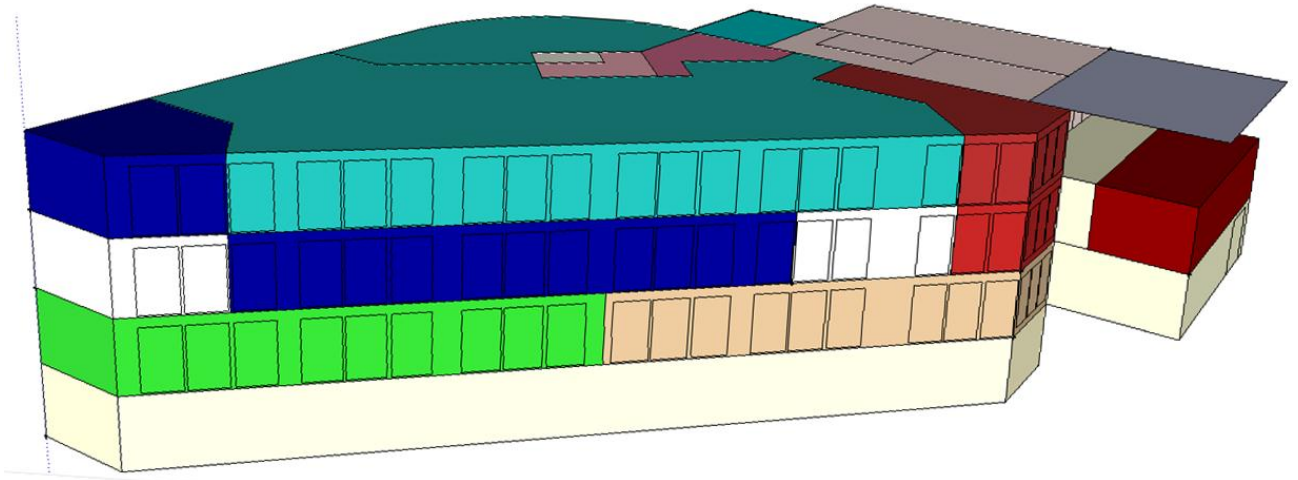


Figure 4 - Building model as seen from the ocean

Cooling demand

The demand simulation of the building with installed shading control indicates that the building has a cooling demand of 1,469 kWh per year to meet the comfort requirements of the air temperature which were set to minimum 21 °C and maximum 25 °C. This is very low, the size of the building taken into account, and simulations with passive action were performed to eliminate the cooling demand. Figure 5 shows the temperature profile in week 29 for a room on the 2nd floor with and without additional ventilation. The blue curve shows the temperature without the additional measures as simulated previously, while the red curve shows the temperature in which it is done two simultaneous actions to eliminate the cooling demand:

- 1) Continuous ventilation throughout the day
- 2) Increased infiltration

The second paragraph will in practice be natural ventilation of the building, either by use of air vents or opening of windows. This simulation indicates very well the effect such actions will have. The temperature is lowered about 4.5 °C, and it is therefore highly likely that this building will manage without a refrigerating unit installed. Similarly temperature profiles apply to the other zones in the building.

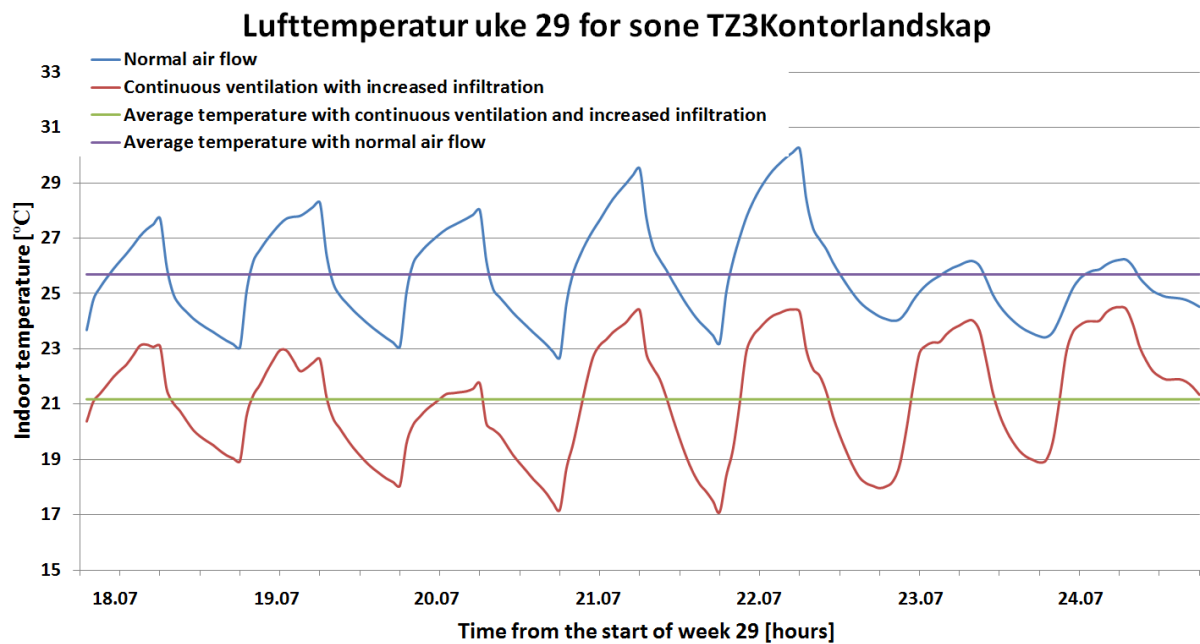


Figure 5 - Temperature profile with and without additional air flow in week 29 (16 - 22 July)

Energy consumption to heating with heat pump

Figure 6 shows the energy consumption to the heating system where the air-to-water heat pump is used for the base load and electricity is used as peak load. In Figure 6 the same heating system is used in the two different simulations, but the controlling is different. The wide bars show the energy use where the indoor temperature is allowed to fall up to 5 °C outside of working hours, while the narrow bars show energy use in the simulation where the indoor temperature is kept constant at 21 °C throughout the day. It can be seen in Figure 6 that having a constant indoor temperature causes an increase in heat energy used in the building. The increase in energy is 19,973 kWh per year, which is a natural consequence of the increasing temperature difference between the building and outside temperature for a large part of the day.

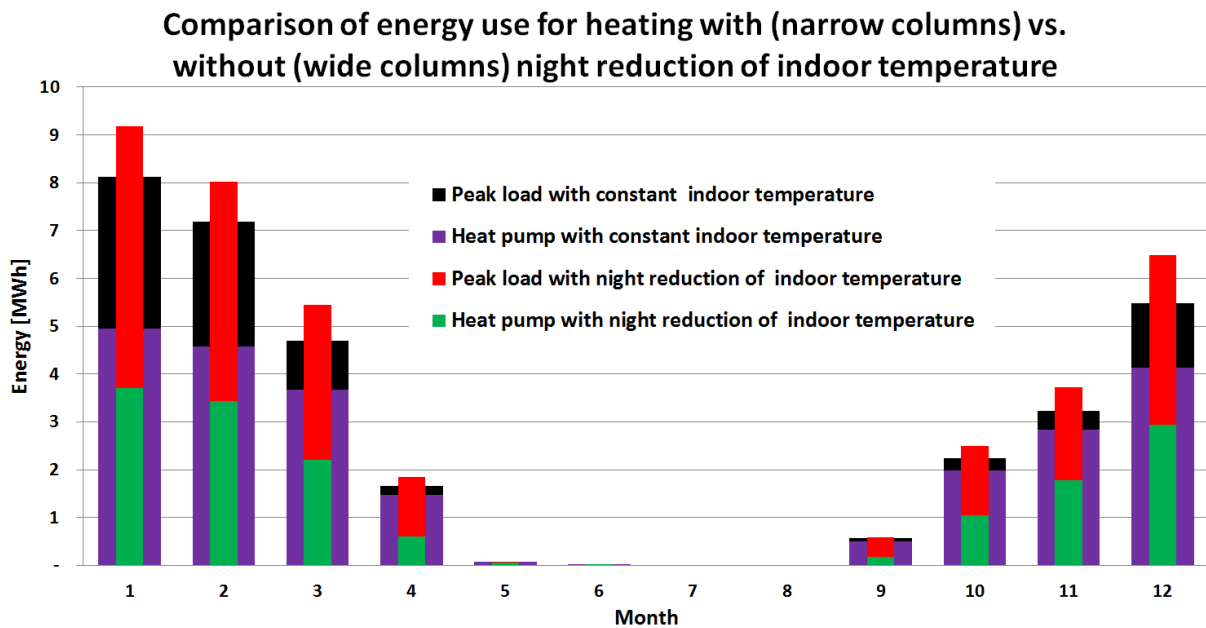


Figure 6 - Comparison of energy consumption to the heat system with air-to-water heat pump with and without night reduction of indoor temperature

Another consequence of keeping the indoor temperature at a constant level instead of allowing it to be reduced outside of working hours, is that the dynamics of the heating system is damped. In the first simulation after the night reduction period was over and the heat pump had either been turned off or gone on a minimum part load, the system had to run at maximum load to be able to raise the temperature by 5 °C. Since the heat pump has a limited power installed, the peak load has to deliver most of the effect needed. The power profile is shown in Figure 7, which compare the dynamics to the heating system with and without constant indoor temperature. For the system with nighttime temperature reduction, both the electric heating and the heat pump are turned off until at 4:00, when the heat pump starts to produce a small amount of heat. At 06:00 the temperature reduction period is over, and the system should now raise the temperature in the building from 16 to 21 °C. The heat pump starts up to maximum load, but since it has limited power the peak load must also deliver a large amount of energy. At 07:00 it is registered that heat pump delivers an output of 56.6 kW, whereas the effect of electricity is 65.1 kW. For the system with constant temperature, the consumption of electricity is low while the heat pump runs constantly until at 07:00, when internal loads¹ are enough to keep the indoor temperature at an adequate level. Since the heat pump can deliver more energy in the system that keeps a constant temperature compared to the energy from the peak load, this is a more energy efficient system in spite of the increased heat loss from the building.

¹ The internal loads that is simulated to start at 07:00 is 5 W/m² of lights, 6 W/m² of electric powered equipment and 100 people with an average thermal power of 90 W each.

Dynamics of the heating system with and without nighttime temperature reduction

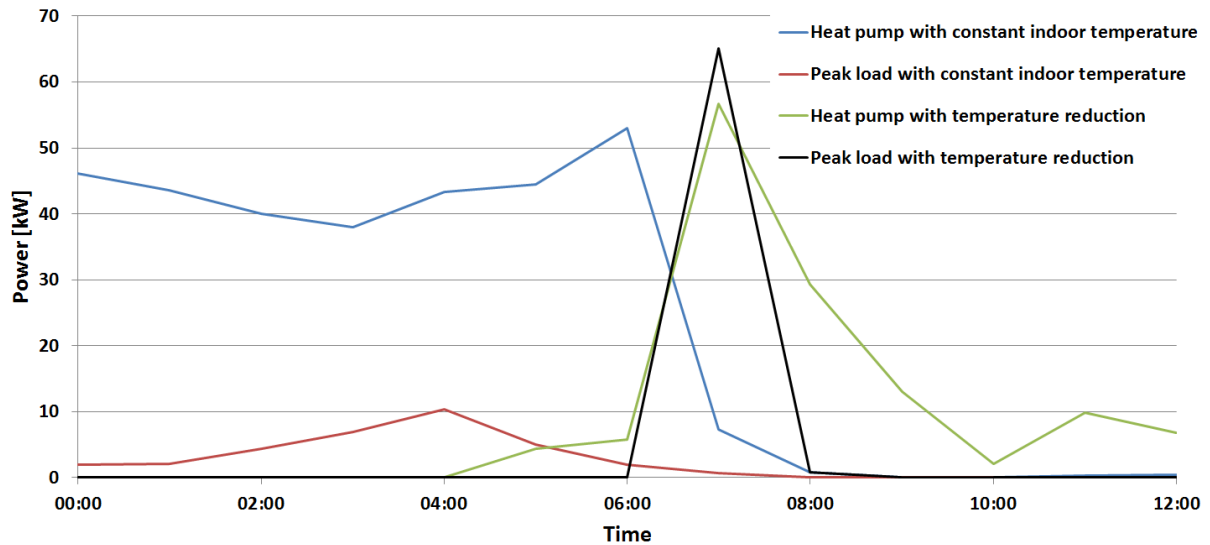


Figure 7 - The differences in the dynamics of the heating system with and without nighttime temperature reduction, the morning of 9 January

Solar collector in the heating system

In the simulations done in this master thesis, it is shown that a lot of the available energy produced in the solar collectors is not utilized due to no simultaneously heating demand. This is clearly visible on the duration diagram for heating in Figure 8 where the energy from the solar collector system is barely visible at the same time as the heat pump and peak load to the left in the figure, but clearly visible to the right, from about 3,700 hours and above where most of the energy from the solar collector is available. The total energy the solar collector can deliver but that is not being utilized by the heating system is 18 731 kWh per year. Due to this fact the systems with a solar collector scored poorly on the economy analysis, because it contributed too little for the coverage of the office buildings energy demand. The solar collector system with a 100 m² solar collector delivered less than 1,300 kWh per year, and will therefore not be able to justify a purchase cost of 305,000 NOK. If the lost energy from the collector could be utilized in whole or in part, this system could represent a better economic choice.

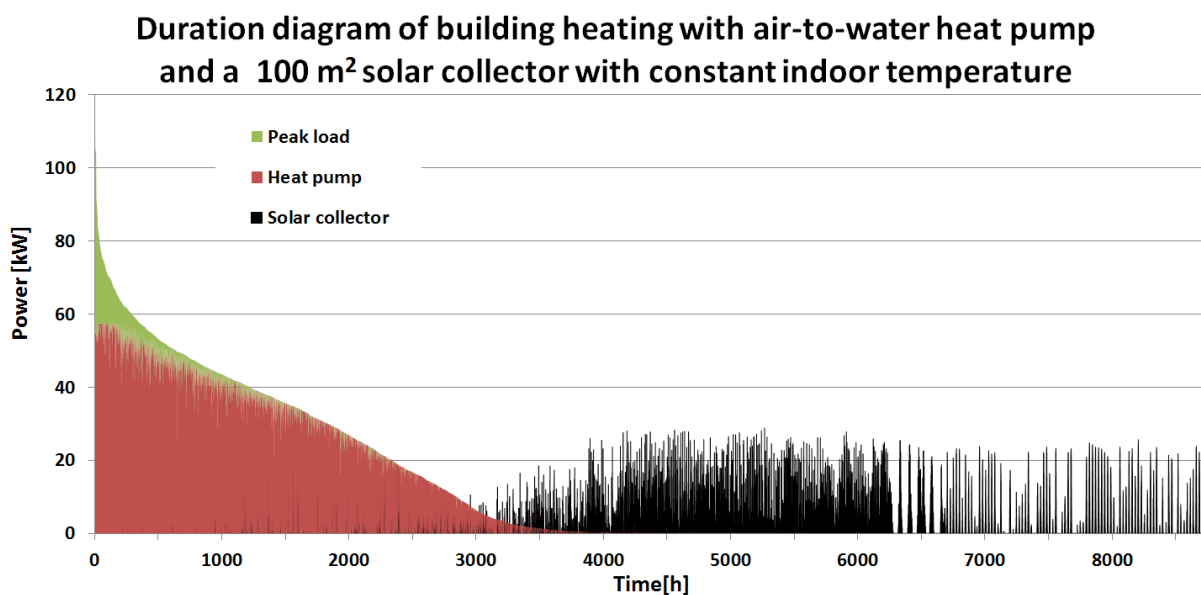


Figure 8 - Duration diagram for a heating system with solar collector and air-to water heat pump

The heating system that did the best in the simulations and economic analysis was the system with the air-to-water heat pump and electric peak load. This system has an investment cost of 246,000 NOK and annual energy savings of 57,579 kWh per year, compared to the reference system with only electricity as heating source.

Economic analysis

The results of the present value analysis which is illustrated in Figure 9, shows all the different heating systems in relation to the reference system with only electricity as heating source. It's a big difference in the profitability of the different systems, where the air-to-water heat pump system show the best results in all scenarios of varying yearly inflation of energy prices. At low inflation, savings from reduced energy expenses will be very small after a long time, and this is why the present value is low when the inflation of energy prices is low or zero. A future annual inflation in the upper layers are still the most likely to assume, since this would correspond roughly stable price if one takes into account the actual inflation and inflation. By comparing the present value of saved costs in the year 1 through year 40, it was found that an annual inflation of 5.6 % was the value that made the annual present value of income to remain at a constant level. An expected inflation in energy prices equal to the real interest rate or more is not unlikely as the power transfer to Europe for a common electricity market becomes more developed, and the price of fossil fuels increases. Technological innovations may however, contribute to reduced energy prices.

Regardless of future changes in energy prices, it is the air-to-water heat pump system that comes best out in the comparison. Solar collector systems might dramatically improve in the economy

analysis if the energy from the solar system could be stored over time, in a large buffer-tank with water or by returning excess heat to the energy well. Also a hot water demand in the building would contribute to improved profitability in the present value analysis for all energy systems.

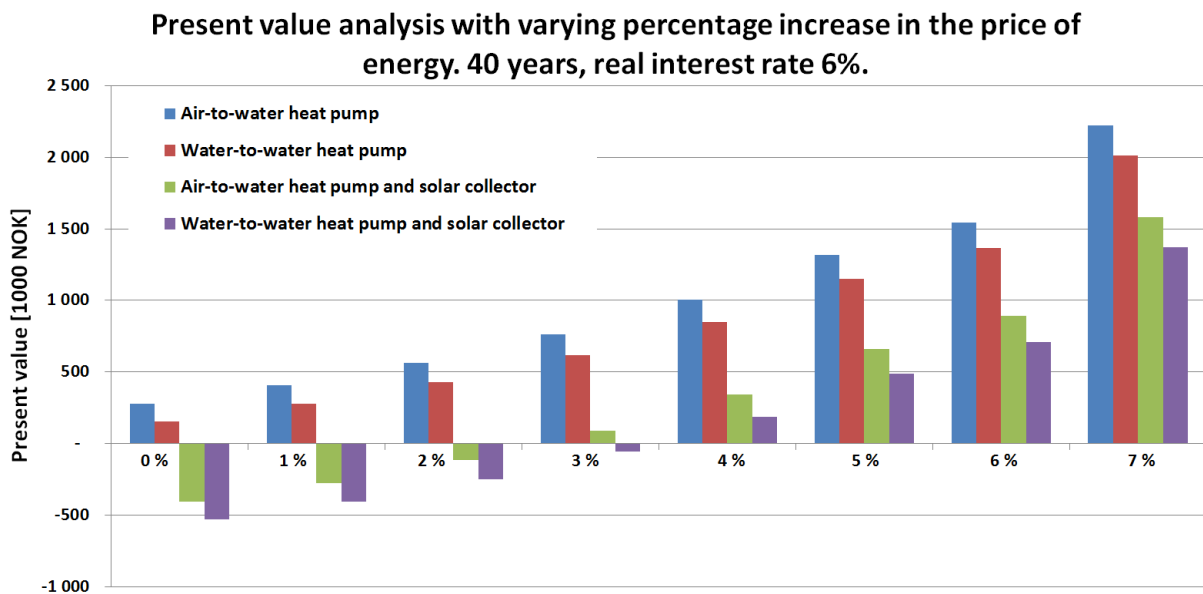


Figure 9 - Present value with varying annual increase of energy prices, from 0% - 7%

Of those simulations made in this report it was concluded that the best economically heating system for the office building is the heating system with an air-to-water heat pump and electricity as peak load. In second place comes the heating system with a water-to-water heat pump with energy well for heat source and electricity peak load. A larger water-to-water heat pump could have been used with a better outcome in the net present value analysis, but the price of the system would then also been correspondingly larger because of the larger necessary energy well.

Bibliography

1. *St.meld. nr. 34 Norsk klimapolitikk*, Det kongelige miljøverndepartement, Editor 2006-2007.
2. *Avtale om klimameldingen 2008*.
3. *Bygg for framtida*, Kommunal- og regionaldepartementet, Editor 2009.
4. YIT. *KlimaTak*. [cited 2012 23.06]; Available from: http://www.yit.no/yit_no/fagomr%C3%A5der/klima/klimatak
5. Inger Andresen, *Prosjektrapport 22. Planlegging av solvarmeanlegg for lavenergiboliger og passivhus. En introduksjon*, 2008.
6. U.S. Department of energy. *About EnergyPlus*. [cited 2012 15.06]; Available from: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_about.cfm