



AALBORG UNIVERSITET
KØBENHAVN

Aalborg Universitet København

Statens Byggeforskningsinstitut

A. C. Meyers Vænge 15

2450 København SV

Studenterrapport

Uddannelse: Master i Bygningsfysik

Semester: 4. semester forår 2015

Titel på masterprojekt: Bygningsrenovering på uddannelsesinstitutionen Martec
- analyse af muligheder samt rentabilitet for opgradering til
lavenergi.

Projektperiode: 1. februar – 1. juni 2015

Vejledere: Kirsten Engelund Thomsen og Jørgen Rose

Studerende: Erik Frandsen

Erik Frandsen

Antal normalsider: 58

Afleveringsdato: 1. juni 2015

Bygningsrenovering på uddannelsesinstitutionen Martec

- analyse af muligheder samt rentabilitet for
opgradering til lavenergi.



Indholdsfortegnelse:

Abstract	4
Indledning	6
1. – Beskrivelser af bygningen og dens anvendelse.	8
1.1 – Beskrivelse af eksisterende bygning.	8
1.2 – Beskrivelse af planlagt renovering og tilbygning.	13
1.3 – Parametre for simulering af bygningens varmetab.	17
1.4 – Parametre for simulering af bygningens varmetilskud.	20
1.5 – Bygningens samlede energibehov.	22
1.6 – Kriterier for opgradering af bygning til lavenergi.	25
2. – Forslag til opgradering af bygning.	30
2.1 – Efterisolering af terrændæk.	30
2.2 – Efterisolering af ydervæg og sokkel.	31
2.3 – Belysningsanlæg med LED-lyskilder.	34
2.4 – Solcelleanlæg på fladt tag.....	35
2.5 – Energooptimering med varmepumpeanlæg	37
3 – Rentabilitet på foreslåede opgraderinger.	39
3.1 – Efterisolering af terrændæk.	41
3.2 – Efterisolering af ydervæg og sokkel.	42
3.3 – Belysningsanlæg med LED-lyskilder.	44
3.4 – Solcelleanlæg på fladt tag.....	45
3.5 – Energooptimering med varmepumpeanlæg.	46
4 – Simulering af indeklimaet i bygningen.	47
5. – Udvælgelse og anbefaling af opgraderinger.....	57
6. – Diskussion af opgraderingsforslag og resultater.....	60
7. – Konklusion.....	62
8. – Litteraturliste	63
9. – Indhold i bilagsmappe	64

Abstract

At the educational institution, Martec in Frederikshavn, Marine Engineers, Ship Assistants, Ship Machinists, HF Maritime students and Entry Course students are trained, and courses are offered in maritime, offshore and energy engineering. The institution's main building was built in 1965 and later expanded in 1970. In addition to the main building, a workshop has been built in a separate building. Since the main building does not meet the current requirements on indoor climate and the need for facilities, Martec has decided to carry out another extension and a complete renovation of the main building.

The initiative for renovating the main building began in the fall of 2011, when at the request of Labour Inspection was performed measurements on the indoor climate in selected classrooms in order to investigate the temperature conditions and the concentration of CO₂. The results showed that the room temperature varied a lot and the concentration of CO₂ in the rooms was unacceptably high. Since no immediate action could be taken to meet the requirements, a renovation of some selected classrooms was conducted as a test. The following measurements on the renovated classrooms showed that the applied solution could be used to fulfil adequate air quality and stable temperature conditions.

Due to an increasing student intake and thus a need for more classrooms in this period, Martec has chosen to change the renovation project to a major renovation and extension project to meet the new requirements, and simultaneously upgrade the building to a modern, bright and pleasant study and work environment.

The aim of this report is to clarify what alternative measures Martec can apply for energy optimization in connection with a renovation and extension of the main building. Based on the plans for the renovation and extension project, the report examines options for upgrading the building to a low energy building and evaluates the profitability for these options.

From a comprehensive review of the existing building, the thermal conductivities are determined, which is used to model the building's energy consumption using the software Be10. The model is calibrated using measured energy consumption after which the model is used to simulate different improvement proposals.

Firstly, the model is adjusted to the renovation and extension plans for the building and the new energy consumption is calculated. From this simulation, it is examined what further upgrades are needed in order to meet the energy requirements of BR2010, LE2015 and BK2020. Specific proposals for building renovations and technical

installations for energy optimization that can fulfil these energy requirements are suggested.

In renovation projects where the main goal is energy savings, there will usually be co-benefits such as climate improvements, extension of building lifetime, improved environment, increased value of the building, etc. By valuing these co-benefits and including them in the overall evaluation, the investment in energy saving measures could be more attractive. In this particular project, however, it is the opposite situation. The main goal is not energy savings but instead climate improvements, compliance with new requirements and upgrading of the building to a modern, bright and pleasant study and work environment. These efforts will lead to energy savings that can be valued and contribute to financing the project.

The idea is therefore that if the saving achieved through a decreased energy consumption is used to finance additional energy saving measures, then it will be possible to set higher goals for the energy classification of the building.

Indledning

Baggrund

På uddannelsesinstitutionen Martec i Frederikshavn, uddannes der til Maskinmester, Skibsassistent, Skibsmaskinist, HF-Søfart og Adgangskursus. Derudover tilbydes kurser inden for det maritime, offshore og energiteknik. Hovedbygningen er fra 1965 og udvidet med en ekstra fløj i 1970. Endvidere er der opført en værkstedsbygning, som er en selvstændig bygning på grunden. Da hovedbygningen ikke lever op til de nugældende krav om indeklima og det aktuelle behov for lokaler, har Martec besluttet at gennemføre en total renovering af hovedbygningen samt en udvidelse med tilbygninger.

Initiativerne til renovering af hovedbygningen startede allerede i efteråret 2011, hvor der på foranledning af Arbejdstilsynet blev udført målinger på indeklimaet i udvalgte undervisningslokaler med henblik på at undersøge temperaturforholdene og luftens indhold af CO₂. Resultaterne heraf viste at rumtemperaturen varierede meget og indholdet af CO₂ var uacceptabelt højt. Da der ikke umiddelbart kunne gøres indgreb for at imødekomme kravene, blev der iværksat en renovering af udvalgte undervisningslokaler som en test. Efterfølgende målinger på testlokaler viste at den valgte løsning kunne anvendes til opfyldelse af tilstrækkelig luftkvalitet og stabile temperaturforhold.

Da der i samme periode opstod behov for flere undervisningslokaler på grund af stigende elevtilgang, ændrede Martec renoveringsprojektet til et større renoverings- og tilbygningsprojekt som skulle imødekomme de nye krav og samtidigt opgradere bygningen til et moderne, lyst og behageligt studie-og arbejdsmiljø.

I forbindelse med forestående renovering og tilbygninger, vil der blive udført efterisolering og udskiftning af vinduer i den eksisterende bygning. Indretningen af den eksisterende bygning vil samtidigt blive ændret med nye undervisningslokaler og nye kontorer til undervisere samt udvidelse af kantinen. Byggeprojektet har været i udbud, hvor 5 entreprenører har afgivet tilbud på baggrund af et dispositionsprojekt. Den valgte entreprenør udfærdiger detailprojektering samtidig med at byggeriet sættes i gang medio februar 2015.

Da der undervises i energi og miljø på Martec, ville det være et godt image for uddannelsesstedet, hvis der kunne implementeres alternative tiltag i projektet, som kan opgradere bygningen til lavenergi og forbedre bygningen yderligere med hensyn til indeklima og komfort. Herved vil Martec også signalere, at de er på forkant med udviklingen og samtidigt vil der være muligheder for at bruge projekterne i undervisningen som demonstrationsprojekter.

Formål

Hensigten med dette projekt er, at afklare hvilke alternative tiltag Martec i Frederikshavn kan anvende for energioptimering i forbindelse med en renovering og tilbygning på eksisterende bygning. Samtidig med at kravene til indeklima, komfort og energiforbrug skal opfyldes, ønskes bygningen opgraderet til at kunne opfylde bygningsreglementets krav om energi i jf. BR2010, LE2015 og BK2020 som angivet i BR10 [1]. Det planlagte projekt for ombygning og tilbygning er udgangspunktet for nærværende rapports analyse af muligheder for opgradering til lavenergi samt hvordan rentabiliteten ser ud for disse mulige tiltag.

Metode

Efter en gennemgang af den eksisterende bygning samt den planlagte renovering og tilbygning, hvor transmissionskoefficienterne fastlægges, udføres en beregning af energiforbrug for den eksisterende bygning ved hjælp af opbygget model i Be10 [2]. Denne model kalibreres i forhold til det faktiske målte energiforbrug for bygningen, således at efterfølgende simuleringer af ændringer på den eksisterende bygning tager afsæt i samme model.

Herefter laves en ny model, som tilrettes med de planlagte renoveringer og tilbygninger, således at beregninger af energiforbrug for bygningen efter den planlagte renovering og tilbygning kan udføres. Med resultaterne fra denne model kan efterfølgende vurderes hvad der yderligere skal til for at kunne opgradere bygningen til energikravene i BR2010, LE2015 og BK2020.

Dernæst udarbejdes forslag til bygningsrenoveringer og tekniske installationer med henblik på energioptimering af bygningen, som kan medføre at kravene i de nævnte lavenergiklasser kan nås.

Som grundlag for beregning af bygningens energibehov, benyttes beregningsmetoden som angivet i SBI-anvisning 213 [3], "Bygningers energibehov". For beregning af bygningens varmetab anvendes retningslinjer angivet i DS418 [4]. "Beregning af bygningers varmetab".

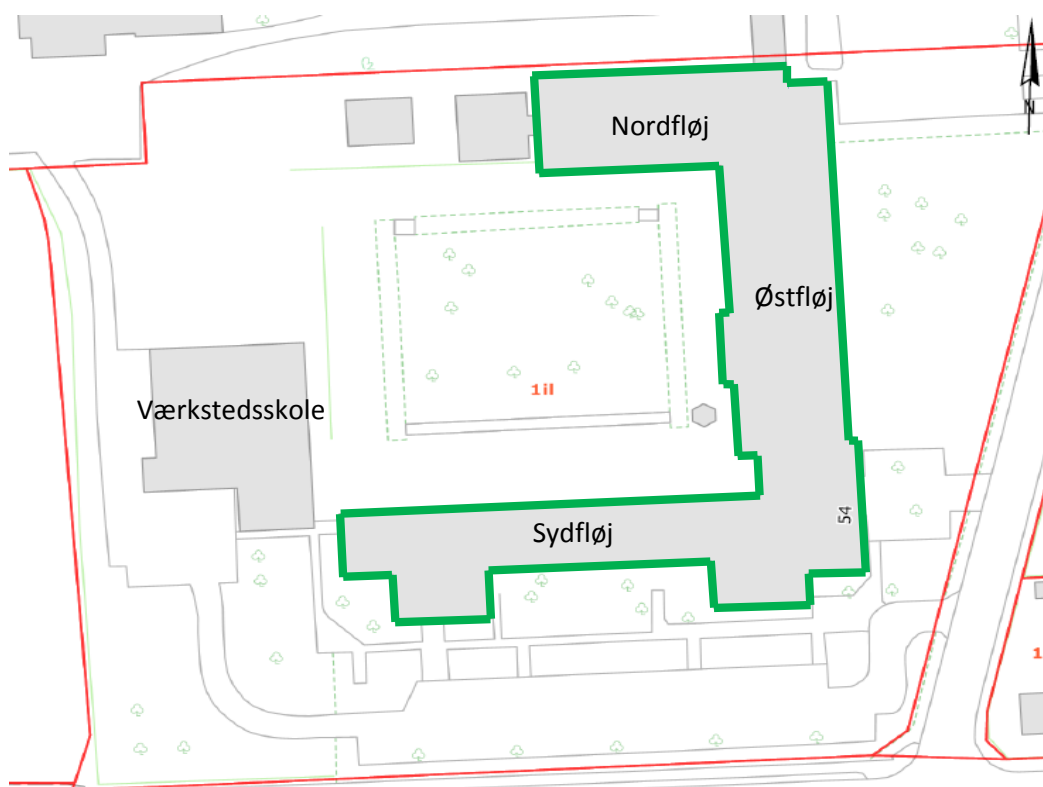
Som vejrdata til brug ved simulering er valgt et klimadatasæt bestemt ud fra referenceåret "Danmark_2013.DRY" [5], som er repræsentativ for den størst mulige del af den danske bygningsmasse ud fra de tilgængelige målestationer. Dette er valgt med den begrundelse, at det vil være det samme klimadatasæt som skal anvendes ved byggesagsbehandling inden for Bygningsreglementets område.

1. – Beskrivelser af bygningen og dens anvendelse.

I de følgende afsnit beskrives bygningen først som den ser ud i dag og efterfølgende som den vil tage sig ud når den planlagte ombygning og tilbygning er gennemført. Beskrivelserne anvendes for fastlæggelse af transmissionskoefficienterne og driftsparametre for luftskifte og varmeanlæg som er grundlæggende for energiberegningerne. Endvidere er bygningens belastning beskrevet ud fra dens anvendelse og driftstid som medvirker til fastlæggelse af parametre for energiforbrug og varmetilskud i bygningen.

1.1 – Beskrivelse af eksisterende bygning.

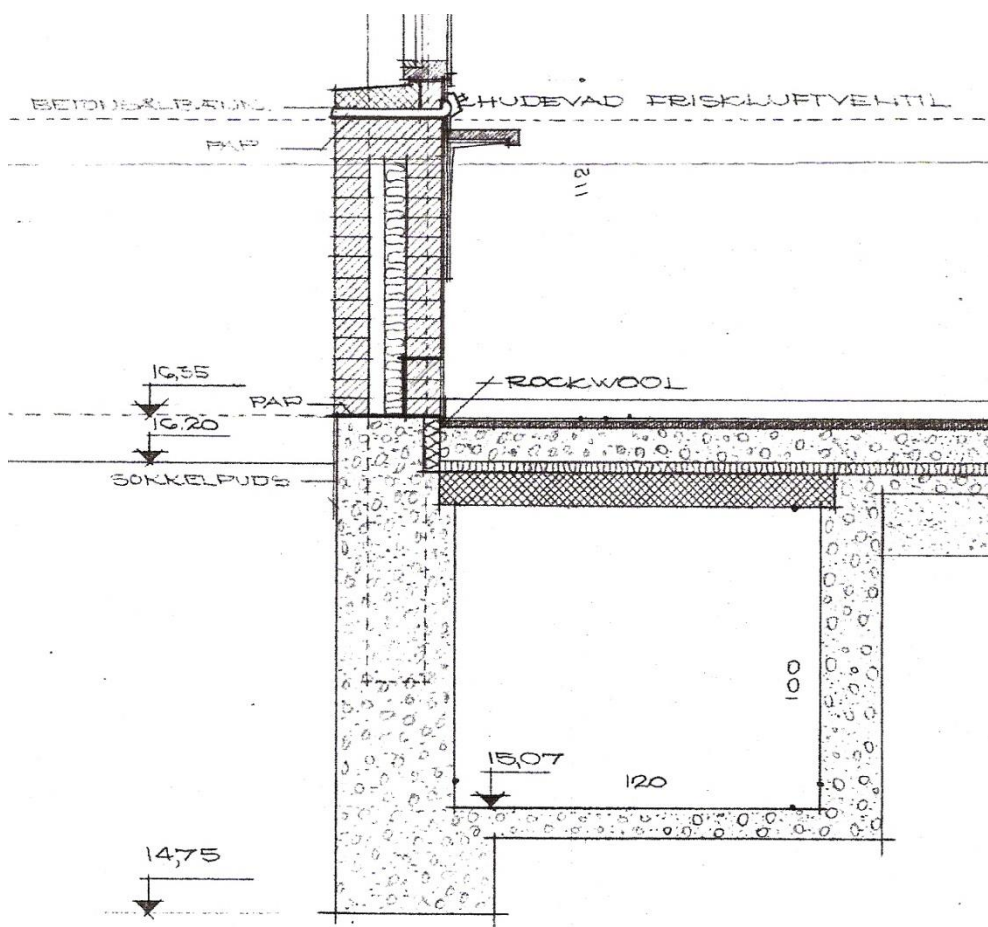
Uddannelsesinstitutionen Martec er beliggende på matrikel nr. 1il som ligger på Hånbækvej 54 i Frederikshavn. På Frederikshavn Kommunes matrikelkort (www.kort.frederikshavn.dk) [6], er den eksisterende bygning som projektet omfatter markeret med grønt omrids som vist i fig. 1. Foruden den nævnte bygning ses en værkstedsbygning og nogle pavilloner som ikke er omfattet af projektet.



Figur 1. Udsnit af matrikelkort med Martec's eksisterende bygninger.

Bygningens facader er forskudt ca. 3 grader i forhold til de geografiske verdenshjørner med orientering mod nord som vist på figur 1.

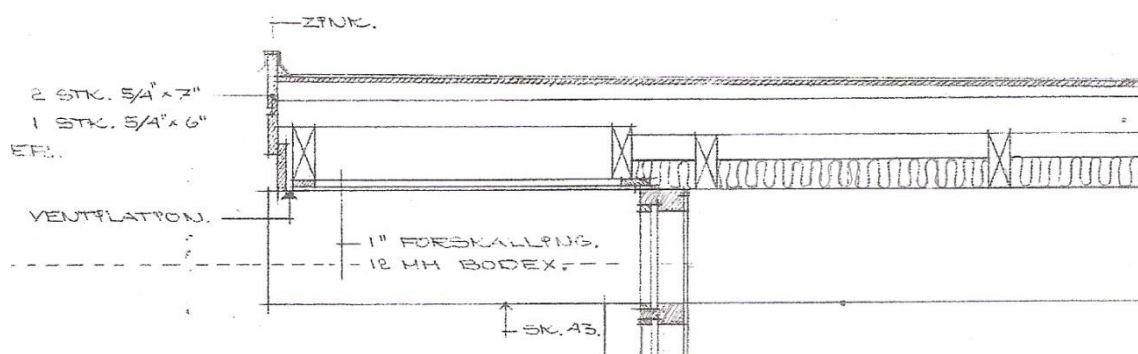
Under terrændæk langs med soklen, er der en uisoleret ingeniørgang med en højde x bredde på 1,0 x 1,2 m, hvor de tekniske installationer til el, vand og varme fremført i hele bygningens længde. Terrændækket består af 20 cm grus, plastfolie, 6 cm klaplag, 5 cm pladebatts isolering, 10 cm beton, 2 cm støbeasfalt og 4,5 mm linoleum. Over ingeniørgangen er terrændækket ført over en 10 cm betonplade og 50 mm isolering som vist på figur 2.



Figur 2. Snittegning af sokkel, terrændæk, ingeniørgang og facademur.

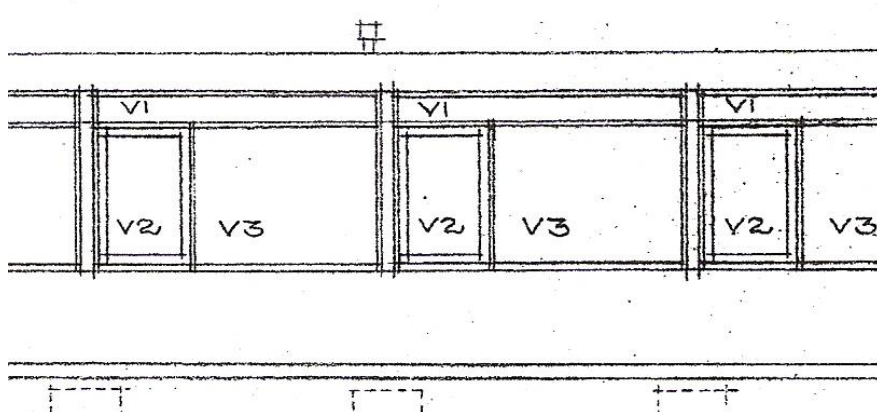
Facadevæggene (se figur 2) er udført i teglsten for både facademur og bagmur med 60 mm isolering og 50 mm hulmur samt med pudset indvendig overflade.

Tagkonstruktionen (se figur 3) i den eksisterende bygning består af et fladt tagpaptag på 16 mm douglasplader lagt på opskalkning og 3"x7" spær placeret på betondrager. Der er 100 mm vingemåtte isolering imellem spær og indvendigt er loftet afsluttet med Dæmpa loftsplader.



Figur 3. Tagkonstruktion i eksisterende bygning.

Vinduerne i den eksisterende bygning er med termoruder af ældre årgang. Hvert vindue i undervisningslokalerne består af 3 ruder hvoraf det ene (V2) er oplukkeligt (se figur 4). De tekniske data på termoruderne kendes ikke, men er vurderet til at have dimensionen 6-12-6 mm og en U-værdi på $2,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, en lystransmittans på 0,81 og en solenergitransmittans på 0,76.



Figur 4. Tegning af sydvendt facade på eksisterende bygning.

Liftskifte i lokalerne sker ved naturlig ventilation samt ved manuel start af en udsugningsventilator. Tilførsel af friskluft sker via friskluftventiler placeret under vinduerne (se figur 2) eller ved at åbne vinduerne.

Bygningens varmekilde er fjernvarme og varmerørene er ført i ingeniørgangene til radiatorer placeret under vinduerne. Varmerørene som er placeret i ingeniørgangen er isoleret med 25 mm isolering (se figur 5). I gangarealerne er der installeret gulvvarme, som er koblet fra på grund af utætheder. Varmeanlægget har ikke udekompensering på fremløbstemperaturen, men der bliver manuelt lukket ned for varmen om sommeren.



Figur 5. Fremføring af installationer i bygningens ingeniørgang.

I hele bygningen er der som grundbelysning installeret belysningsanlæg bestående af lysstofrørsarmaturer monteret på loft. Det er kvadratiske armaturer med opalfarvet skærm og 4 x 18 W lysstofrør og drosselspole (se figur 6). I undervisningslokaler og kontorer reguleres belysningen ved bevægelsesmelder. I gangarealer reguleres belysningen manuelt ved tænd og sluk.



Figur 6. Undervisningslokale med eksisterende grundbelysningsanlæg.

De overordnede bygningsdata som er gældende for den eksisterende bygning inden renovering og tilbygning er vist i tabel 1. Personbelastningen i bygningen er angivet i forhold til den kapacitet bygningen er dimensioneret til, selv om der i det seneste år i perioder har været flere studerende end det angivne. Endvidere er der opstillet midlertidige pavilloner for at kunne rumme de ekstra spidsbelastninger der har været på antallet af studerende det sidste år.

Ved opbygning af modeller i Be10 og BSim vil det derfor være mest hensigtsmæssigt at kalibrere modellerne efter det målte energiforbrug for bygningen for de foregående år (2013 og tidligere), da disse tal passer med den angivne kapacitet i tabel 1.

Når modellerne for den eksisterende bygning er kalibreret, kan modellerne tilpasses med de nye parametre, som gælder for bygningen efter den planlagte renovering og tilbygning. Disse modeller vil også være udgangspunktet for de efterfølgende beregninger på forslag til opgradering af bygningen til lavenergiklasserne.

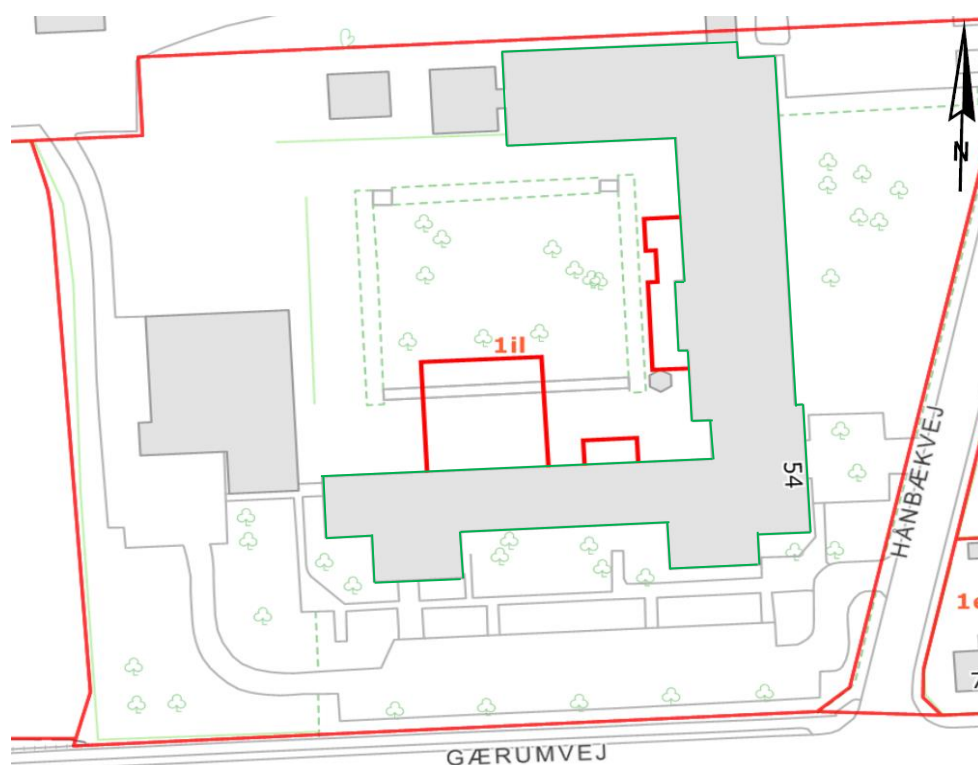
Overordnede bygningsdata før renovering		
Brugstid i bygningen	50	h/uge
Antal ansatte brugere i bygningen	40	pers.
Antal studerende i bygningen	390	pers.
Antal kontorer	10	stk.
Antal undervisningslokaler	12	stk.
Opvarmet etageareal	3789	m ²
Areal af undervisningslokaler	1451	m ²
Areal af kontor og møderum	518	m ²
Areal af kantine og køkken	350	m ²
Areal af gang og sekundære rum	1470	m ²
Vinduesareal i forhold til etageareal	26,2	%
Vinduesareal i forhold til facadeareal	61,3	%

Tabel 1. Overordnede bygningsdata for den eksisterende bygning.

1.2 – Beskrivelse af planlagt renovering og tilbygning.

Foruden den planlagte renovering, er der planlagt 3 tilbygninger til den eksisterende bygning. Den ene tilbygninger omfatter blandt andet en udvidelse på 375 m² af det eksisterende kantineområde som er placeret i østfløjen. Endvidere er der planlagt en udvidelse med 3 ekstra grupperum på i alt 50 m² placeret på sydfløjen. Derudover er der planlagt en større tilbygning på 630 m² med 2 etager i halvdelen af bygningen, som også placeres ved sydfløjen. Denne tilbygning kommer til at indeholde 4 undervisningslokaler og 4 grupperum samt en multisal med en kapacitet på ca. 150 personer.

På figur 7 ses de 3 tilbygninger på den eksisterende bygning indtegnet med rød streg på det tidligere viste matrikelkortet.



Figur 7. Matrikelkort med Martec's bygning inkl. tilbygninger markeret med rødt.

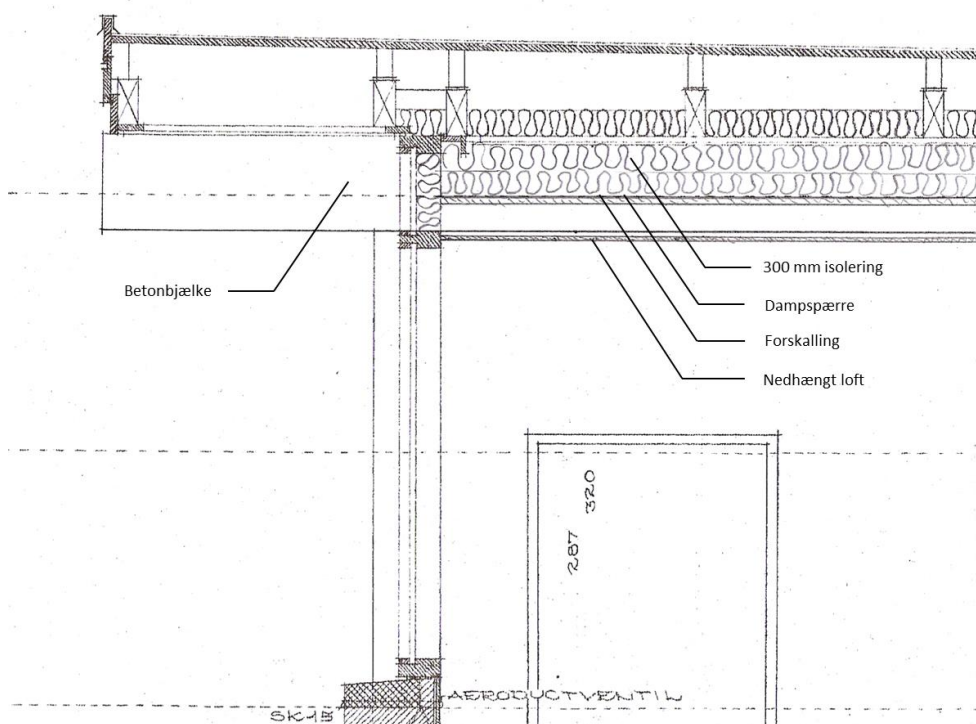
På figur 8 ses den nordvendte facade på sydfløjen hvor den store tilbygning skal placeres. Tilbygningens gulvniveauer bliver forskudt både op og ned i forhold til gulvniveau i den eksisterende bygning.



Figur 8. Nordvendt facade hvor tilbygning placeres på eksisterende bygning.

Ved renovering af den eksisterende bygning vil transmissionskoefficienter for facader, vinduer og loftkonstruktioner blive forbedret, så det samlede varmetab reduceres. I terrændækket vil transmissionskoefficienterne være uændrede, da det kun er den indvendige belægning af linoleum der udskiftes. Konstruktionen omkring soklen og facademur (se figur 2) vil ligeledes forblive uændret hvilket medfører at linjetabet ved soklen også vil være uændret.

Tagkonstruktionen bliver ændret som vist i figur 9, hvor det flade tagpaptag på 16 mm douglasplader lagt på opskalkning og 3"x 7" spær på betondrager forbliver. De 100 mm vingemåtte isolering imellem spær er udskiftet med 300 mm isolering med en Lambda-værdi på 0,037 W/mK. Under spær er Dæmpa loftet demonteret og der er udført nedskalkning til ca. 200 mm under spær hvor der er placeret en dampspærre under isoleringen. Herunder er der nedsænket loft til 2 cm under betondrager hvor de tekniske installationer fremføres. Loft er afsluttet med lyddæmpende hulperforeret loftsplader og med indbygget planforsænket belysningsarmaturer.



Figur 9. Snittegning af tag med efterisolering og nedsænket loft.

De eksisterende vinduer med termoruder udskiftes til nye vinduer med 3-lags lavenergiruder som har dimensionen 6-15-4-15-4 mm med solafskærmende belægning og en U-værdi på $0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$, en lystransmittans på 0,61 og en solenergitransmittans på 0,36. Samtidig ændres dimensionen på vinduerne således at den øverste rude imellem betonbjælker blændes af (se figur 10). Hermed bliver vindueshøjden 40 cm lavere og dermed bliver det samlede vinduesareal reduceret i den renoverede bygning.



Figur 10. Sydvendt facade med vinduer i eksisterende bygning.

Facader på tilbygning med multisal, udføres med bagmur af 120 mm letbetonelement og 350 mm isolering som afsluttes med vindtæt diffusionsåbent lag og ventileret hulrum samt udvendig træbeklædning. Tag i nybygning udføres som en varmttagskonstruktion, der afsluttes med tagpap på underlag af gennemsnitlig 450 mm kileskåret mineraluld og 220 mm betonelementer. Vinduer udføres generelt i træ/aluminium med 3-lag lavenergiruder i tilbygninger og i eksisterende bygning. Større sammenhængende vinduespartier udføres i aluminiumskonstruktion. Facade mod nord på multisal udføres i en kombination af sorte metalkassetter og glaspartier.

Ventilationsanlægget udskiftes i den eksisterende bygning fra at være udsugningsventilatorer og udluftningsventiler i facade under vinduer, til et balanceret ventilationsanlæg med variabel luftmængde reguleret efter indeluftens CO₂-indhold og temperatur.

Det nye ventilationsanlæg bliver bestykket med 6 mindre decentrale anlæg til hvert sit undervisningslokale i nordvendt fløj. Derudover vil der blive installeret 3 større centraliserede ventilationsanlæg som hver skal dække en zone med både kontor og undervisningslokaler og en zone omkring køkken og kantineområde samt en zone med undervisning og multisal i tilbygningen.

Det eksisterende belysningsanlæg udskiftes med et nyt energibesparende anlæg som forventes at give en besparelse på elforbrug til belysning fra 20 W/m² på det eksisterende anlæg til 11 W/m² på det nye anlæg.

De overordnede bygningsdata for bygningen efter renovering og tilbygning er vist i tabel 2. Til sammenligning er de overordnede data for bygningen før renovering også vist i tabellen. Ved opbygning af modeller i Be10 og BSim for bygningen efter renovering og tilbygning, tilpasses modellerne for den eksisterende bygning med de nye parametrene. Ved sammenligning af disse modeller vil der fremkomme et forbedret resultat på energiforbrug og indeklima for den planlagte renovering og tilbygning. Disse modeller vil også være grundlæggende for optimeringsforslagene som er specificeret i kapitel 2.

Bygningsdata før og efter renovering og tilbygning.			
	Før	Efter	
Brugstid i bygningen	50	50	h/uge
Antal ansatte brugere i bygningen	40	46	pers.
Antal studerende i bygningen	390	450	pers.
Antal kontorer	10	12	stk.
Antal undervisningslokaler	12	17	stk.
Opvarmet etageareal	3789	5209	m ²
Areal af undervisningslokaler	1451	2102	m ²
Areal af kontor og møderum	518	718	m ²
Areal af kantine og køkken	350	725	m ²
Areal af gang og sekundære rum	1470	1664	m ²
Vinduesareal i forhold til etageareal	26,2	18,9	%
Vinduesareal i forhold til facadeareal	61,3	51,8	%

Tabel 2. Overordnede data for bygningen før og efter om- og tilbygning.

Men foruden de overordnede bygningsdata skal de øvrige inputdata til brug for modellerne i simuleringsprogrammerne fastlægges. I det efterfølgende afsnit gennemgås først transmissionskoefficienterne for bygningens klimaskærm og dernæst gennemgås de nødvendige parametre, som er vigtige for opretholdelse af det ønskede indeklima.

1.3 – Parametre for simulering af bygningens varmetab.

I dette afsnit gennemgås de vigtigste parametre for det dimensionerende varmetab for bygningen før og efter den planlagte ombygning og tilbygning.

For sammenligning af bygningens energibehov samt det dimensionerende varmetab før og efter om- og tilbygning, er bygningens transmissionskoefficienter og de fysiske bygningsarealer fastlagt for videre bearbejdning i hver sin model i Be10.

For den eksisterende bygning er der til fastlæggelse af linjetab for fundamenter valgt en type sokkel i henhold til DS418 tabel 6.13.2b med sokkel i beton uden isolering og

med bagmur i tegl. Ved en beregnet U-værdi på terrændæk til $0,578 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, fås ved opslag i DS418 et linjetab ved sokkel på $0,814 \text{ W/m K}$. For samlinger mellem sokkel og vinduer/døre er linjetabet fastlagt til $0,22 \text{ W/m K}$. Linjetabet for samlinger ved vindue og betonsøjle samt vindue og sålbænk er fastlagt til $0,39 \text{ W/m K}$. Linjetabet for samlinger ved vindue og tag er fastlagt til $0,01 \text{ W/m K}$.

For bygningens ydervægskonstruktioner, loft- og tagkonstruktion samt terrændæk mod jord, er der udført en beregning på U-værdier i henhold til ovennævnte beskrivelse af bygningen. Beregning af U-værdier er vist i Bilag 1 og resultaterne er vist i tabel 3, hvor det dimensionerende varmetab ifølge Be10 også kan ses.

Dimensionerende varmetab	Areal (m^2)		U ($\text{W/m}^2\text{K}$)		Tab (W)	
	Før	Efter	Før	Efter	Før	Efter
Loft i ombygning	3.789	3.789	0,26	0,11	31.525	13.095
Loft i tilbygning		1.420		0,09		3.908
Ydervæg i ombygning	628	608	0,44	0,44	8.842	8.561
Ydervæg i tilbygninger		307		0,13		1.277
Terrændæk i ombygning	3.605	3.605	0,58	0,58	20.837	20.837
Terrændæk i tilbygninger		1.105		0,09		1.989
Total for bygning	8.022	10.834			61.204	49.666

Tabel 3. Det dimensionerende varmetab før og efter ombygning/tilbygning.

For den planlagte ombygning og tilbygning er der til fastlæggelse af linjetab for fundamenter i tilbygning, valgt en type sokkel i henhold til DS418 tabel 6.23.2a med letklynkebeton i øverste 40 cm med midtisolering og med letbeton som bagmur som giver en U-værdi på $0,12 \text{ W/mK}$. For samlinger mellem ydervæg/sokkel og vinduer/døre er der anslået et linjetab på $0,03 \text{ W/mK}$.

For fastlæggelse af bygningens U-værdier i loft- og tagkonstruktion efter den planlagte om- og tilbygning, er der udført en ny beregning som vist i bilag 1. Resultaterne fra beregningen er også vist i tabel 3.

For fastlæggelse af varmetabet fra vinduer i den eksisterende bygning, er U-værdien fastlagt ud fra en visuel vurdering af ruden som tilsyneladende er en termorude af typen 6-12-6 mm, som vurderes at have en U-værdi på $2,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, en lystransmittans på 0,81 og en solenergitransmittans på 0,76.

De nye vinduer til den planlagte ombygning og tilbygning er oplyst til at være lavenergi af typen 6-15-4-15-4 mm, med solafskærmende belægning, som har en U-værdi på 0,6 W/m²K og en lystransmittans på 61 og en solenergitransmittans på 36.

For at tage højde for tilskudsvarme fra solindfald, er vinduerne delt op i orientering samt opdelt i grupper med forskellige skyggepåvirkninger som vist i bilag 2.

I tabel 4 ses endvidere at det dimensionerende varmetab fra vinduerne bliver reduceret med 66% ved udskiftning af vinduer.

Dimensionerende varmetab	Areal (m ²)		U (W/m ² K)		Tab (W)	
	Før	Efter	Før	Efter	Før	Efter
Vinduer mod N	348	308	2,1	0,7	23385,6	6901,4
Vinduer mod Ø	233	267	2,1	0,7	15657,6	6016,6
Vinduer mod S	238	203	2,1	0,7	15993,6	4551,7
Vinduer mod V	173	203	2,1	0,7	11625,6	4551,7
Total for bygning	992	981			66662,4	22021,4

Tabel 4. Det dimensionerende varmetab fra vinduer før og efter ombygning/tilbygning.

Foruden beregning af U-værdier, er der yderligere udført en beregning af temperatur og fugt i konstruktionerne efter Glaser-metoden [7]. Ved beregning af tagkonstruktionen viste det sig, at den relative luftfugtighed er over 100% i tagrummet mellem isoleringen og Douglaspladerne med tagpap. Dette gælder både før og efter, at der er foretaget efterisolering.

Tilsyneladende har der været tilstrækkelig god ventilation af tagrummet, således at den fugtige luft er blevet ventileret ud så eventuel fugt er blevet tørret med ud.

Da temperaturen tagrummet samtidig er faldet med 1-2 grader, kan det anbefales at undersøge konstruktionen nærmere for at fastslå om ventilationen af tagrummet stadigvæk er tilstrækkelig ved det ændrede dugpunkt.

En simulering i for eksempel programmet WUFI, vil kunne fortælle om der sker en ophobning af fugt i konstruktionen, som kan have skadelig virkning på trækonstruktionen.

1.4 – Parametre for simulering af bygningens varmetilskud.

I dette afsnit gennemgås nogle af de vigtigste parametre som indgår i bygningens varmetilskud og som påvirker indeklimaet i bygningen både med hensyn til før og efter den planlagte ombygning og tilbygning.

Bygningens behov for køling og ventilation afhænger blandt andet af hvor meget varmetilskuddet er fra udstyr, solindfald og personer som afgiver varme. For at konstatere om kravene til optimal operativ temperaturforhold kan overholdes udføres der en simulering af indeklimaet i bygningen. Bygningens belastning fra personer og udstyr som ligger til grund for parametrene til simulering i henholdsvis Be10 og BSim er vist i nedenstående tabel 5.

Bygningslokale	Varmetilskud			
	Max antal personer	Sensibel varme (100 W/person) W/m ²	Bærbar PC (50 W / PC) W/m ²	Belysning W/m ²
Undervisningslokaler Areal: 77,8 m ² Volumen: 217,7 m ³	35	45	22,5	11
Kontor og møderum Areal: 71,3 m ² , Volumen: 199,6 m ³	12	17	8,5	11
Kantine og køkken Areal: 725 m ² , Volumen: 2320 m ³	230	4,5		11
Grupperum, Areal: 17,3 m ² Volumen: 48,4 m ³	6	35	17,3	11
Gang og sekundære rum Areal: 1523 m ² Volumen: 4264 m ³	200	4,5		11
Multisal, tilbygning Areal: 194,4 m ² Volumen: 1088,6 m ³	150	77	2,5	11

Tabel 5. Bygningens belastning fra personer og udstyr.

De valgte intervaller for varmeafgivelse fra personer, er valgt ud fra værdierne af clo og met i henhold til tabeller og grafer i bilag 3.

Antallet af personer i bygningslokalerne er valgt ud fra en forventet maksimal personbelastning, som stiller større krav til de tekniske installationer i de kritiske perioder, hvor der er meget varmetilskud som skal fjernes.

I henhold til BR2010 er kravet til luftskiftet 5 l/s pr. person plus 0,35 l/s pr. m² gulv. Desuden skal sikres at indeluftens CO₂-indhold ikke overstiger 1000 ppm i længere perioder. Ventilationsbehovet for disse to forhold er undersøgt og opstillet i tabel 6, hvor luftskiftebehovet for overholdelse af CO₂-kravet er fundet ved hjælp af ligevægtsligningen:

$$C = \frac{m}{n \cdot V} (1 - e^{-n \cdot \tau}) + (C_o - C_i)$$

Hvor: C er den resulterende koncentration af forurening i lokalet [m³/m³ luft]

m er den tilførte forurening i lokalet [m³/h]

C_o er begyndelseskoncentrationen i lokalet [m³/m³ luft]

C_i er forureningsmængde i den tilførte luft til lokalet [m³/m³ luft]

n er luftskiftet i lokalet [h⁻¹]

V er lokalets volumen [m³]

τ er tid [h]

For beregning af luftskiftebehovet er forudsat en tilført forurening af CO₂ på 17 l/h pr. person. Den anvendte værdi for setpunkt til opstart af ventilation for udskiftning af luft er sat til 450 ppm men vil i praksis nok sættes lidt højere, når der er CO₂-måling på reguleringsudstyret. Den tilførte CO₂ fra udeluften er sat til 380 ppm. De øvrige værdier er angivet i tabel 6.

Bygningslokale	Max antal personer	Areal m ² / person	Volumen m ³ / person	Beregnet ventilationsbehov		
				q _p BR10 l/s m ²	q _f CO ₂ -krav l/s m ²	Minimum Luftskifte h ⁻¹
Undervisningslokaler Areal: 77,8 m ² Volumen: 217,7 m ³	35	2,2	6,2	2,6	3,4	4,40
Kontor og møderum Areal: 71,3 m ² , Volumen: 199,6 m ³	12	5,9	16,6	1,2	1,3	1,64
Kantine og køkken Areal: 725 m ² , Volumen: 2320 m ³	230	3,2	10,1	1,9	2,4	2,70
Grupperum, Areal: 17,3 m ² Volumen: 48,4 m ³	6	2,9	8,1	2,1	2,7	3,42
Gang og sekundære rum Areal: 1523 m ² Volumen: 4264 m ³	50	30,5	85,3	0,5	0,2	0,66
Multisal, tilbygning Areal: 194,4 m ² Volumen: 1088,6 m ³	150	1	7	4,2	5,9	3,80

Tabel 6. Beregnet ventilationsbehov i henhold til BR10 og CO₂-krav.

1.5 – Bygningens samlede energibehov.

Da det samlede energibehov for bygningen blandt andet afhænger af hvor mange personer der opholder sig i bygningen og dermed hvor mange studerende der har været i de enkelte semestre, vil det være relevant at sammenligne det faktiske forbrug med resultaterne fra beregningen i Be10.

For sammenligning af varmeforbrug over de seneste år, er der foretaget en korrektion for graddage som vist i Tabel 7. Ved korrektion af varmeforbrug er der anvendt et graddage-uafhængigt forbrug på 8 MWh pr. måned som svarer til forbruget i sommerferien hvor institutionen er lukket. Korrektionen er foretaget ud fra EMD's graddage og normalgraddage gældende for Nordjylland (se bilag 4).

Varmeforbrug i MWh	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Januar	102,8	91,7	100,1	112,5	100,0	118,3
Februar	80,0	87,4	91,7	88,8	84,8	91,5
Marts	75,8	76,4	86,3	94,5	67,9	80,7
April	40,3	52,2	51,5	36,5	44,7	52,1
Maj	21,2	27,1	22,8	27,1	35,2	26,7
Juni	14,2	15,4	13,7	10,2	12,1	9,6
Juli	8,9	8,9	9,4	8,0	10,0	8,0
August	10,4	9,3	8,5	13,7	18,2	17,7
September	16,8	25,5	16,5	21,0	20,0	25,0
Oktober	56,1	49,0	48,3	53,4	56,5	70,8
November	88,6	92,2	79,7	81,9	86,3	98,6
December	97,4	107,5	101,7	86,4	112,0	151,8
I alt pr år:	612,4	642,7	630,3	634,0	647,7	750,8

Tabel 7. Varmeforbrug for bygningen korrigeret for graddage.

Som det fremgår af det korrigerede forbrug, så er varmemeforbruget rimeligt stabilt i årene fra 2009 til 2013. I samme periode har der også kun været meget få variationer i antallet af studerende i de enkelte semestre. Fra januar 2014 får Martec en ekstra tildeling af kvote for studerende, hvilket medførte at antallet af studerende steg fra ca. 390 til 450. Dette er sandsynligvis en af forklaringerne på at forbruget er steget fra 2013 til 2014. En anden årsag som kan være en del af forklaringen er, at varmemesteren, som kontrollerede varmen og energiforbruget, valgte at gå på pension i slutningen af 2013. Varmemesteren gjorde altid meget ud af at regulere og begrænse varmemeforbrug mest muligt.

Ved beregning af varmetilskud fra personbelastningen i Be10, er der taget højde for en stigning i antallet af studerende i Be10 modellerne for henholdsvis før og efter den planlagte ombygning og tilbygning. Dette skyldes at varmetilskuddet fra personbelastningen i Be10 angives med en fast defineret parameter på effekt pr. m², som er fastlagt ud fra forventet antal personer pr. m² i de enkelte lokaliteter i henhold til tabel 5. Det samme forhold er gældende for beregning af varmetilskud fra udstyr, som følger antallet af studerende. Derfor fås det bedste sammenligningsgrundlag for varmebehovet beregnet i Be10 gældende for før ombygning og tilbygning med det korrigerede varmemeforbrug fra årene 2009-2013 som vist i tabel 7, hvor

personbelastningen passer med det forventede. Det beregnede varmebehov i Be10 for bygningen efter den planlagte ombygning og tilbygning viser den opnåede effekt af de energibesparende renoveringstiltag.

Varmebehov MWh/år	Beregnet energi før	Beregnet energi efter	Graddage korrigeret forbrug 2013
Varmetab (Transmission og ventilation)	1.073	563	--
Tilskudsvarme fra solindfald	111	54	--
Internt tilskudsvarme	305	304	--
Bygningens varmebehov	657	205	648

Tabel 8. Beregnet varmekonsum for bygningen før og efter ombygning/tilbygning.

Som det fremgår af tabel 8, så kan bygningens samlede varmebehov forventes at blive reduceret til 205 MWh/år med de renoveringer, som er planlagt gennemført i løbet af 2015, hvilket svarer til en reduktion på ca. 69% på varmekonsumet.

På samme måde er lavet en sammenligning med elforbruget, hvor det ses, at den planlagte ombygning og tilbygning medfører en forventet stigning i elforbrug til 285.453 kWh/år svarende til en stigning på 12% (se tabel 9).

Selv om der kan konstateres et fald i elforbrug til belysning på grund af mere energieffektive belysningsarmaturer, medfører stigningen i elapparater og el til ventilation på grund af stigende personbelastning, at det samlede elforbrug stiger.

Det målte elforbrug i 2013 ligger ca. 20% lavere end det beregnede elforbrug for bygningen før den planlagte ombygning og tilbygning. Dette kan blandt andet være på grund af, at der i Be10 beregnes et fiktivt højere elforbrug til køling, da der er konstateret overtemperatur i bygningen.

Simuleringen af bygningen i Be10 efter den planlagte ombygning og tilbygning, hvor der er installeret balanceret ventilationsanlæg, viser ikke tegn på overtemperaturer.

Elforbrug kWh/år	Beregnet elforbrug før	Beregnet elforbrug efter	Målt elforbrug 2013
Belysning	131.099	109.910	--
Ventilatorer	3.789	33.338	--
Pumper	3.410	2.652	--
Andet elforbrug	115.944	139.553	--
Total elforbrug:	254.242	285.453	199.736

Tabel 9. Beregnet og målt elforbrug for bygningen.

1.6 – Kriterier for opgradering af bygning til lavenergi.

Foruden energirammen fastlagt i BR2010 for kontorer, skoler, institutioner, m.m. er der 2 frivillige energirammer hvoraf den ene, som er Lavenergi ramme LE2015, vil være gældende for fremtidigt byggeri opført efter BR2015. Den anden frivillige lavenergi ramme er Bygningsklasse 2020, BK2020 som også vil være en frivillig energiramme i det nye Bygningsreglement 2015. Da der er givet byggetilladelse til renovering af bygning og tilbygning på Martec inden det nye Bygningsreglement BR2015 træder i kraft, vil det være kravene til de frivillige lavenergi rammer som angivet i Bygningsreglement 2010, der vil blive anvendt ved analyse af opgradering til lavenergi.

Energiramme	kWh/m ² pr. år	
BR2010	$71,3 + 1650/A$	Hvor A er opvarmet etageareal
LE2015	$41,0 + 1000/A$	Hvor A er opvarmet etageareal
BK2020	25,0	Ingen arealtillæg

Tabel 10. Energiramme for undervisningslokaler m.m. som angivet i BR2010.

Bygningens energibehov som ønskes opgraderet til at overholde energirammerne, omfatter energi til opvarmning, varmt brugsvand, ventilation, køling og belysning. I det efterfølgende er der ikke taget stilling til hvordan tilbygning og renovering opfylder bygningsreglementet med hensyn til energi, men udelukkende fokuseret på hvordan den samlede bygningsmasse kan opgraderes til de nævnte energirammer. For fastlæggelse af bygningens energibehov, anvendes beregningsprogrammet Be10, hvor energibehovet er leveret energi omregnet til primær energi som angivet i BR2010, for at kunne sammenveje forskellige energiformer. Ved sammenligning med andre beregninger som ofte regner i netto energiforbrug, skal der korrigeres for disse faktorer på el-forbrug og fjernvarme, som er forskellige for hver energiramme. Dette gælder også ved simulering af indeklimaet i bygningen ved anvendelse af programmet BSim, hvor energiberegningerne foregår med netto energi.

De nævnte faktorer for omregning til primær energi er 2,5 på elforbrug i BR2010 og i LE2015 som ændres til 1,8 i BK2020. På fjernvarmeforbruget er det en faktor 1 i BR2010 som ændres til 0,8 i LE2015 og 0,6 i BK2020.

Foruden ovennævnte energirammer, er der om at bygningen udføres således, at det dimensionerende varmetab ikke overstiger 5 W/m² klimaskærm for BR2010 og 4 W/m² klimaskærm for LE2015 samt 3,7 W/m² klimaskærm når bygningen er i en etage.

Ved renovering og ombygning er der desuden krav om gennemførelse af rentable energibesparelser på bygningsdele som vedrører bygningsdele der er omfattet af renovering og ombygning. Derudover er der krav til transmissionskoefficienterne for bygningsdele som ændres.

For vinduer i tilbygning og ved udskiftning af vinduer i den eksisterende bygning, er der ifølge BR2010 krav om, at vinduets energitilskud E_{ref} skal være større end -33 kWh/m²K pr. år. Energertilskuddet for facadevinduer kan beregnes efter følgende formel:

$$E_{ref} = 196,4 * g_w - 90,36 * U_w$$

og energitilskuddet for ovenlysvinduer kan beregnes efter følgende formel:

$$E_{ref} = 345 * g_w - 90,36 * U_w$$

hvor g_w er solenergitransmittans for vinduet og U_w er varmetransmissionskoefficient for vinduet.

Set i forhold til energirammen vil de planlagte renoveringer ikke medføre at nøgletallet for bygningens energibehov kommer under energirammen for BR2010. Som det fremgår af tabel 11, så kan bygningens nøgletal for energiforbrug forventes at blive reduceret fra 306,2 til 128,5 kWh/m² pr. år set i forhold til BR2010. Men der mangler

stadigvæk ca. 44% i reduktion for at nå ned på energirammen for BR2010 og 64% i forhold til energirammen for LE2015 samt 70% i forhold til energirammen for BK2020.

kWh/m ² år	Før	Efter	Energiramme
BR2010	306,2	128,5	71,6
LE2015	264,9	116,8	41,2
BK2020	197,9	85,5	25,0

Tabel 11. Bygningens nøgletal for energiforbrug.

Det samme forhold kommer til udtryk når der sammenlignes med det grænseværdierne for det dimensionerende varmetab for bygningen ekskl. vinduer og døre som vist i tabel 12.

Transmissionstab W/m ²	Før	Efter	BR2010	LE2015	BK2020
Klimaskærm ekskl. vinduer og døre	10,1	6,3	5,0	4,0	3,7

Tabel 12. Transmissionstab i henhold til bygningsklasser.

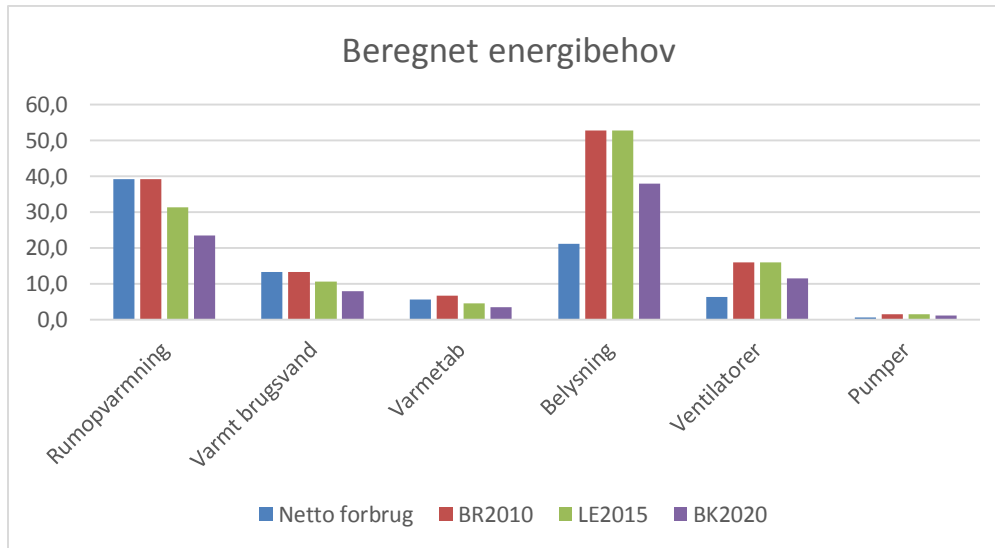
En kortlægning af energiforbruget i bygningen efter den planlagte ombygning og tilbygning som beregnet i Be10, giver et godt overblik over hvor det vil være mest udbytterigt at gennemføre yderligere renoveringer med hensyn til reduktion af energiforbrug. Ud fra kortlægningen vælges nogle muligheder for energioptimering som efterfølgende undersøges med hensyn til rentabilitet.

I tabel 13 er energibehovet opdelt efter energiart som bliver vægtet forskelligt i forhold til primær energiforbrug. Da vægtningen ændrer sig i beregningen af energibehovet for de enkelte energirammer, så er energibehovet medtaget for alle energiklasserne i BR2010.

kWh/m ² pr. år	Beregnet energibehov netto	Beregnet energibehov vægtet i forhold til energiart		
Energiart:		BR2010	LE2015	BK2020
Fjernvarmeforbrug	58,3	75,6	60,5	35,0
Elforbrug	28,1	70,3	70,3	50,6
Opdelt i kategori:				
Rumopvarmning	39,3	39,3	31,4	23,6
Varmt brugsvand	13,3	13,3	10,6	8,0
Varmetab	5,7	6,7	4,6	3,4
Belysning	21,1	52,8	52,8	38,0
Ventilatorer	6,4	16,0	16,0	11,5
Pumper	0,6	1,5	1,5	1,1
Samlet energibehov	86,4	129,6	116,9	85,6

Tabel 13. Kortlægning af beregnet energibehov i forhold til energirammerne i BR2010.

Den grafiske fremstilling af tabel 13 i figur 11, viser klart, at der er størst behov for reduktion af energiforbrug til rumopvarmning set i forhold til energirammerne. Dette vil sige, at det først og fremmest er for klimaskærmen, der skal findes forslag til energioptimeringer. Dernæst er det elforbrug til belysning som kommer i fokus for energioptimering.



Figur 11. Bygningens beregnede energibehov i kWh/m² pr. år.

For optimering af energiforbrug til rumopvarmning kan der tages udgangspunkt i det kortlagte dimensionerende varmetab fra Be10 som vist i tabel 14.

Dimensionerende varmetab for klimaskærmen:	W
Loft i eksisterende bygning	13.095
Loft i tilbygning	3.908
Ydervæg i eksisterende bygning	8.561
Ydervæg i tilbygning	1.277
Terrændæk i eksisterende bygning	20.837
Terrændæk i tilbygning	1.989
Vinduer/døre	22.021
Linietab ved ydervægsfundament	10.322
Linietab ved vinduer/døre	8.094

Tabel 14. Dimensionerende varmetab for klimaskærm.

De bygningsdele som har det største bidrag til det dimensionerende varmetab er vinduer/døre, men her er der allerede gennemført energioptimering i forbindelse med renoveringen. Det samme er gældende for loftet i den eksisterende bygning. Det næste store bidrag til det dimensionerende varmetab fra terrændækket i den eksisterende bygning, hvor der endnu ikke er påtænkt udførelse af renoveringer med henblik på energioptimering. Dernæst følger linjetabet ved ydervægsfundamentet,

hvor der heller ikke er påtænkt udførelse af renoveringer med henblik på energioptimeringer. Tilbage er så varmetabet fra ydervægen i den eksisterende bygning som kan være interessante at kigge nærmere på. Linjetabet ved vinduer og døre kan også forbedres, men er ikke medtaget i nærværende projekt da det vil kræve ændringer for den planlagte udskiftning af vinduer.

2. – Forslag til opgradering af bygning.

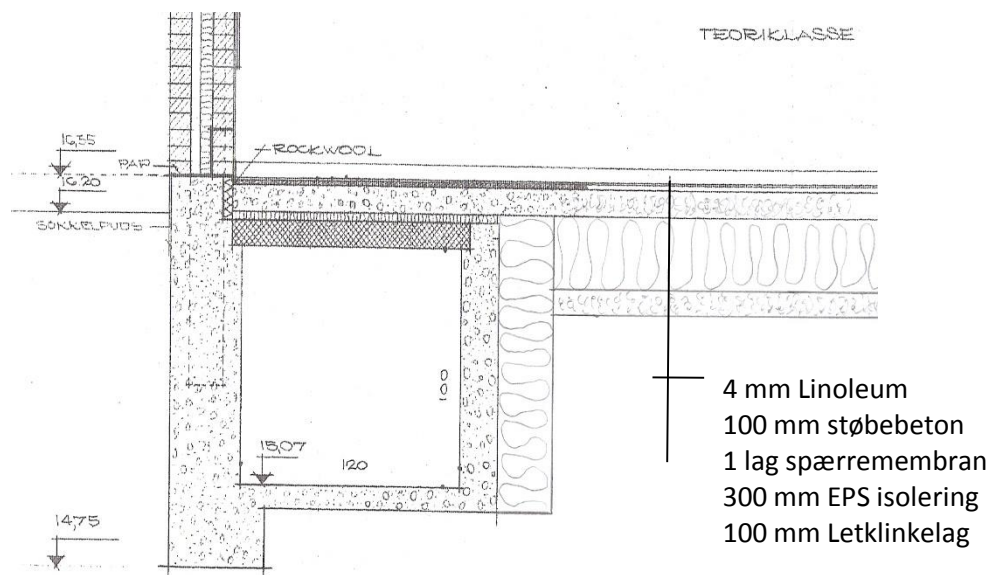
I de efterfølgende afsnit, gennemgås nogle muligheder for energioptimering af bygningen efter realisering af den planlagte ombygning og tilbygning. De valgte forslag, som skal medvirke til at bygningen kan opgraderes til lavenergiklasserne, er valgt på baggrund af den ovenfor nævnt energikortlægning, som indikerer hvor der er størst potentiale for energioptimering.

2.1 – Efterisolering af terrændæk.

I henhold til kortlægningen af bygningens energiforbrug, er terrændækket i den eksisterende bygning udvalgt til at være et emne med henblik på reducere af energitab, idet der er et relativt stort potentiale for energibesparelse.

Renoveringen omfatter fjernelse og bortskaffelse af det eksisterende betondæk på 100 mm samt 50 mm isolering og 60 mm klappag. Dernæst udføres udgravning og bortskaffelse af yderligere 290 mm grus og jord.

Nyt gulv opbygges af 100 mm kapilarbrydende letklinkelag, 300 mm EPS isolering og en radon spærremembran samt 100 mm støbebeton. Siden ind mod ingeniørgangen isoleres ligeledes med 300 mm isolering fra bund og op til overkant (se figur 12).



Figur 12. Snittegning af forslag til nyt terrændæk i eksisterende bygning.

En beregning af U-værdien på det anbefalede gulv (se bilag 5) fås til $0,094 \text{ W/m}^2\text{K}$ og samtidig fås et nyt linjetab for soklen på $0,55 \text{ W/mK}$. Fra Be10 fås et nyt dimensionerende varmetab på 3.389 W som med det eksisterende terrændæk var på 20.837 W . Dette giver en besparelse i dimensionerende varmetab på 17.448 W eller en besparelse på 83% i varmetab fra terrændæk. Hertil kommer en besparelse på tab fra fundament hvor det dimensionerende linjetab er reduceret fra 9742 W til 6582 W .

Besparelsen på det årlige varmeforbruge fås også fra Be10, hvor varmebehovet bliver 70 MWh , hvor det var på 206 MWh efter gennemførelse af den planlagte renovering. Dette giver yderligere en besparelse på 136 MWh/år eller en ekstra besparelse på varmeforbruget på ca. 66%.

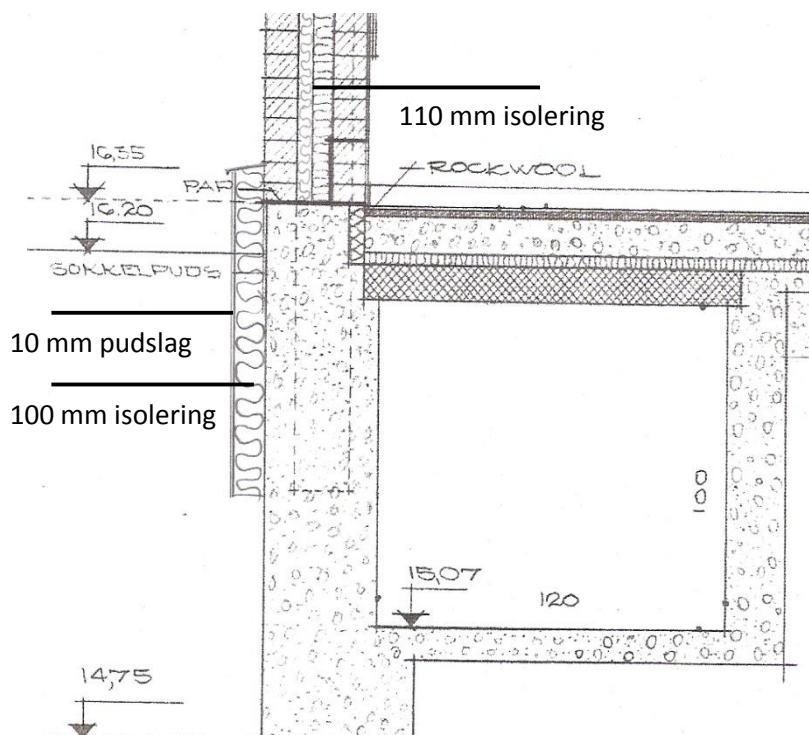
2.2 – Efterisolering af ydervæg og sokkel.

Ved efterisolering af ydervæg og sokkel er der skitseret 2 muligheder at vælge imellem hvoraf den ene kan gennemføres uden at ændre på ydervæggen og den anden giver en ny facade og en højere U-værdi.

Forslag A: I den eksisterende bygning er der 60 mm isolering i hulmuren. Da der er 110 mm hulrum imellem facadeteglsten og bagmur, kan der umiddelbart efterisoleres med

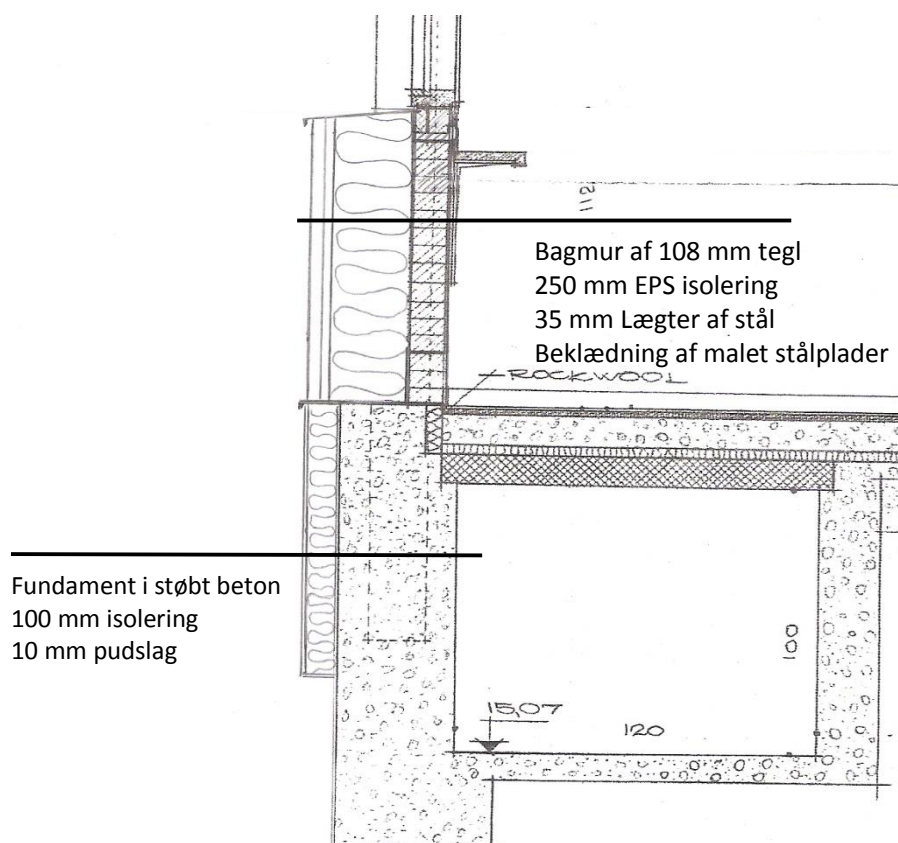
50 mm isolering. Da det kan forventes at den eksisterende isolering er sunket sammen og vanskeliggør efterisoleringen, skal påregnes oprensning og efterfyldning af hulmuren.

Endvidere kan linjetabet fra soklen reduceres ved at efterisolere udvendigt med isolering fra 2. skift på teglstensvæggen og ca. 1 m ned på soklen som vist på figur 13.



Figur 13. Snittegning af forslag til efterisolering af hulmur og sokkel.

Forslag B: En alternativ løsning er en ændring af konstruktionen således at den udvendige facadeteglsten fjernes og erstattes af en pladebeklædning uden på isoleringen. Dette giver mulighed for ekstra isolering og overfladen kan integreres med isoleringen af soklen således at der opnås samme overfladeforløb som vist i figur 14. Herved fjernes kuldebroen fra den udvendige teglsten til sokkel og bagmuren. Da bygningen generelt er opbygget med betonbjælker placeret på betonsøjler som bærende konstruktion, indgår teglstensydervæggene ikke som bærende konstruktion og kan derfor godt fjernes. Vinduerne er placeret på bagmuren og bliver således heller ikke generet af at facadeteglstenene bliver fjernet.



Figur 14. Snittegning af alternativ forslag til efterisolering af facade og sokkel.

For de 2 forslag til efterisolering af væg og sokkel, er der fra beregninger i Be10, vist en oversigt i tabel 15 på transmissionskoefficienter og besparelser på det dimensionerende varmetab og det årlige varmebehov.

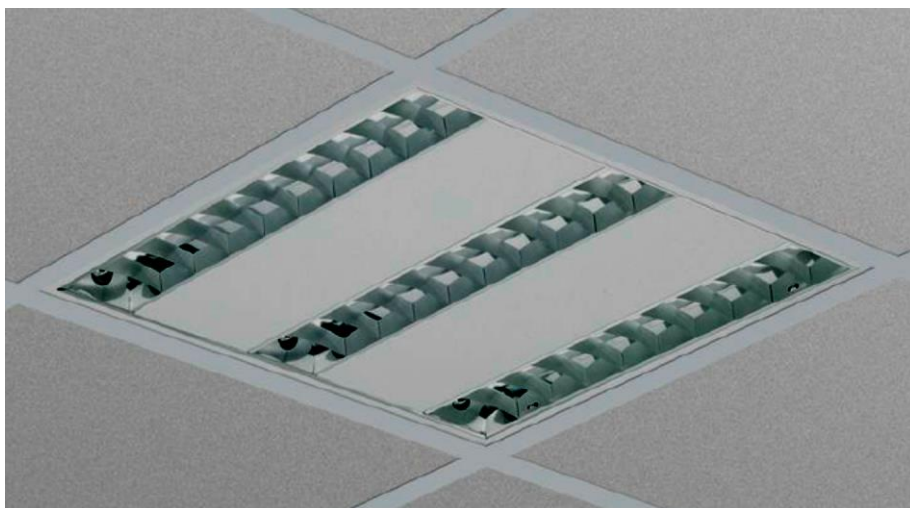
Renoverings- forslag:	Transmissionstab		Dimensionerende varmetab W		Besparelse i årligt varmeforbrug MWh/år
	U-værdi W/m²K	Linjetab W/mK	Ydervæg	Sokkel	
	Ydervæg	Sokkel			
Hulmursisolering og efterisolering af sokkel	0,28	0,55	5.448	6.582	18,8
Udvendig isolering og efterisolering af sokkel	0,14	0,33	2.724	3.949	31,7

Tabel 15. Varmetaboversigt for renoveringsforslag A og B.

2.3 – Belysningsanlæg med LED-lyskilder.

De foregående udregninger på energiforbrug viser, at elforbrug til belysning har en stor andel i energiforbruget, selv om der er medtaget udskiftning af belysningsanlæg i den planlagte ombygning og tilbygning. Grundbelysningen i den eksisterende bygning består af kvadratiske armaturer med 4 x 18 W lysstofrør og drosselspole samt en opalfarvet plastskærm. Ved beregning i Be10 giver denne belysning et elforbrug på 34,6 kWh/m² år.

Der er planlagt udskiftning til nye kvadratiske armaturer for indbygning i loft af fabrikat Philips type TBS165 3x14W/830 HFS C6, som består af 3 x 14 W lysstofrør og HF-forkoblingsenhed (se figur 15).



Figur 15. Belysningsarmatur med lysstofrør til indbygning i loft.

Resultaterne fra Be10 viser, at denne løsning giver et elforbrug til belysning på 21,1 kWh/m² år, så der med den nævnte udskiftning kan opnås en besparelse på 13,5 W/m² år, hvilket giver en besparelse på ca. 40%.

Ved anvendelse af LED-lyskilder, kan der opnås endnu større energibesparelser end ved brug af lysstofrør. Som erstatning af ovennævnte belysningsarmatur kan anvendes et armatur med LED-lyskilder som fabrikat Philips type RC120B LED27S/830 PSD W60L60 (se figur 16), som giver ca. samme belysningsniveau.



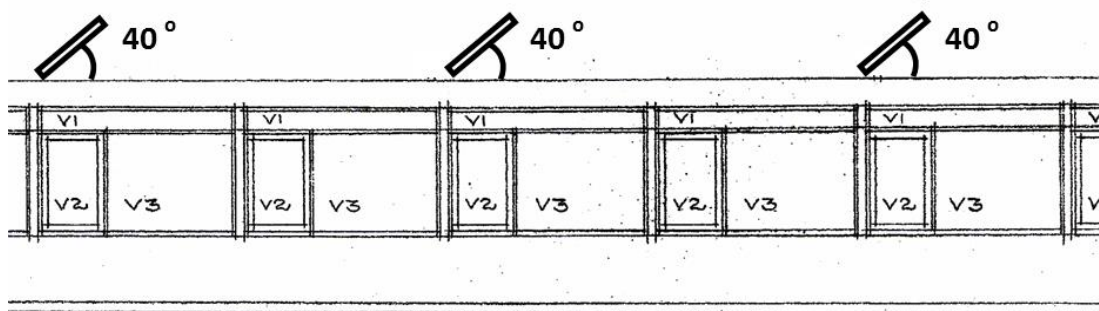
Figur 16. Belysningsarmatur med LED-lyskilder til indbygning i loft.

Dette belysningsarmatur har en samlet system effekt på 32 W hvilket giver en installeret effekt på $7,4 \text{ W/m}^2$. Ved beregning i Be10 giver denne løsning et forbrug til belysning på $14,2 \text{ kWh/m}^2 \text{ år}$. Hermed opnås en ekstra elbesparelse på $6,9 \text{ kWh/m}^2 \text{ år}$, men samtidigt stiger varmekonsumet med $2,5 \text{ kWh/m}^2 \text{ år}$. Dette giver en årlig besparelse på elforbrug på $35,9 \text{ MWh/år}$ og en stigning i varmekonsum på 13 MWh/år . Data på belysningsarmaturer er vist i bilag 6.

2.4 – Solcelleanlæg på fladt tag

Da bygningen har en stor flad tagflade, er der en oplagt mulighed for at etablere solceller på taget, hvilket vil være medvirkende til reduktion af elforbruget, som indgår i beregningen af nøgletallet til sammenligning med energirammerne.

For at solcellerne får en optimal placering på taget med henblik på opnåelse af maksimal udnyttet effekt fra solcellerne, skal de placeres med orientering mod syd i en hældning på 40 grader. Derudover skal solcellepanelerne placeres med en indbyrdes afstand imellem rækkerne så skygger fra foran siddende paneler undgås.



Figur 17. Østvendt facadetegning af bygning med visning af solcellernes placering.

Med en placering på taget som vist i figur 17 og figur 18, vil der være plads til 11 rækker på østfløj, 2 rækker på nordfløjen og 3 rækker på vestfløj samt 4 rækker på tilbygning, som giver mulighed for installering af 512 stk. solcellepaneler med en effekt på 270 Wp på hver. Dette giver en samlet effekt på i alt 128 kWp. Det samlede areal for solcellepanel bliver på i alt 855 m² og peakeffekten pr. m² bliver på 0,15 kWp/m².

Den valgte placering som vist på figur 17 og afstanden imellem rækkerne bevirker at ovenlysvinduerne i gangarealerne på nordfløj og østfløj kan bevares, uden at der skal foretages ændringer heraf.

Ved den anviste optimale placering af solcelleanlægget, forventes det at produktionen af elektricitet ifølge Be10 vil være på 128 MWh pr år, hvilket svarer til 45% af bygningens samlede elforbrug.

Beregninger i Be10 viser at skæringspunktet for optimal udnyttelse af solcelleanlægget til dækning af energibehovet er på 915 m² solcelleanlæg.

I praksis vil udnyttelsen af den producerede elektricitet fra solcelleanlægget til eget forbrug være mindre, da der vil være maksimal produktion på samme tidspunkt, hvor undervisningsinstitutionen er lukket ned.

Ved beregning af nøgletal i Be10, bevirker det installerede solcelleanlæg, at det samlede energibehov for bygningen bliver reduceret fra 86,6 til 60,9 kWh/m² pr. år.

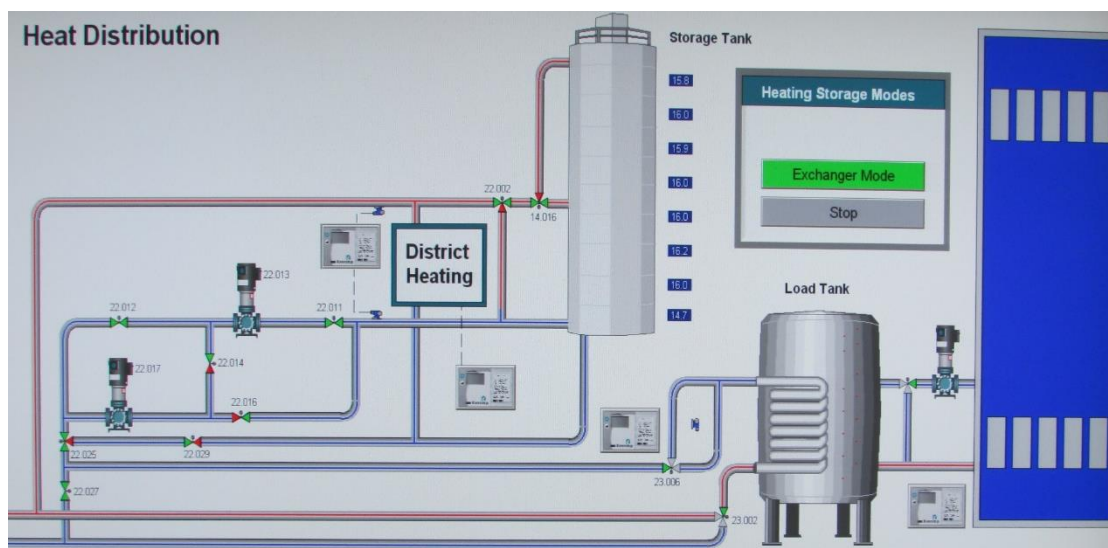


Figur 18. Oversigt for placering af solcelleanlæg vist med blå farve.

2.5 – Energoptimering med varmepumpeanlæg

I laboratoriet for Energi og Miljø er der opstillet 4 varmepumper som via en varmeveksler er koblet op på et decentralt ledningssystem der leverer den producerede varme til en akkumuleringskøle eller til et udendørs vandbassin som vist i figur 18. Varmepumperne er kun i drift i forbindelse med undervisning, hvilket medfører at de står stille det meste af tiden.

Da varmepumper er meget energieffektive varmekilder, er der en potentiel mulighed for at optimere på varmekonsumet, hvis det decentrale ledningssystem bliver koblet på det øvrige centralvarmesystem i bygningen således, at varmepumpenes produktion kan bruges til opvarmning af bygningen.



Figur 19. Tegning af decentralt ledningssystem i Energi- og Miljølaboratorium.

På figur 19 ses det decentrale ledningssystem som opsamler varmeenergien fra de enkelte produktionsenheder i Energi- og Miljølaboratoriet. Varmeenergien kan sendes ud i akkumulerings tanken eller det udendørs vandbassin som vist på tegningen. På tegningen ses endvidere en last tank som består af forskellige størrelser af elvarmelegemer som kan simulere en elbelastning.

Undervisningsmæssigt vil det også give større værdi hvis varmepumperne var i kontinuerligt drift, da der vil være flere data på varmepumpenes elforbrug og varmeproduktion tilgængeligt i det centrale overvågningssystem, som der efterfølgende kan analyseres på med hensyn til varmepumpenes effektivitet m.m.

For at koble centralvarmesystemet sammen med det decentrale varmeledningssystem skal der påregnes opsætning af en varmeveksler. Dette giver selvfølgelig et ekstra tab i systemet idet der også er varmeveksler placeret imellem hver varmepumpeenhed og det decentrale varmeledningssystemet. Derudover skal der påregnes et styringssystem som kan styre ind- og udkobling af varmepumperne i henhold til det aktuelle varmebehov i bygningen. Styringen kan implementeres i det centrale overvågningssystem hvor de øvrige forbrugs- og produktionsdata er tilgængeligt i forvejen.

De 4 varmepumper som vist i figur 20, tænkes anvendt som supplement til varmeforsyningen er følgende:

1. Jordvarmepumpe fabrikat Danfoss type DHP-H Opti Pro 8
Nominel varmeydelse på 7,5 kW og COP på 4,34
2. Jordvarmepumpe fabrikat Danfoss type DHP-R 20
Nominel varmeydelse på 18,2 kW og COP på 3,73
3. Solvarme/jordvarmepumpe fabrikat Viessmann type Vitocal 343-G
Nominel varmeydelse på 10,3 kW og COP på 4,7
4. Luft-Vand varmepumpe fabrikat Danfoss type DHP-A Opti 8
Nominel varmeydelse på 7,0 kW og COP på 3,1

Den samlede varmeydelse for varmepumperne er på i alt 43 kW. Af hensyn til varmeberegning i Be10, anslås COP-faktoren til at være et gennemsnit af varmepumpernes COP-faktorer som giver 3,89. Af hensyn til tabet i varmevekslerne sænkes COP-faktoren til 3,5 og varmeydelsen sænkes tilsvarende til 38,7 kW.



Figur 20. Varmepumper som er opstillet i Energi- og Miljølaboratoriet.

Ved beregning i Be10 giver forslaget en varmebesparelse på 17 kWh/m² pr. år eller 88,5 MWh/år og et ekstra elforbrug på 23,9 MWh/år.

3 – Rentabilitet på foreslåede opgraderinger.

Som det fremgår af foregående afsnit, er de beskrevne forslag til opgradering af bygningen samlet set medvirkende til at nøgletallet for bygningens samlede energibehov, kan mere end opfylde energirammerne for henholdsvis LE2015 og BK2020.

De foreslåede tiltag til energibesparelser giver nogle økonomiske besparelser på driften som har indflydelse på rentabiliteten af investeringen. Disse forhold vil blive nærmere belyst i det følgende, da de enkelte forslag kan gennemføres uafhængigt af hinanden, men kombineres på en måde, hvor enkelte af forslagene fravælges samtidig med at energirammerne overholdes.

Efterfølgende vil rentabiliteten for de enkelte forslag blive behandlet, da det vil være medvirkende til udvælgelse af forslag til opgradering af bygningen.

I nedenstående tabel 16 er vist en oversigt over de energibesparelser som de enkelte forslag giver.

Renoverings- forslag	Energi- besparelse	Reduktion af nøgletal [kWh/m ² år] i forhold til energiklasserne		
		MWh/år	BR2010	LE2015
Terrændæk	136,0	23,4	17,9	13,6
Ydervæg og sokkel A	18,8	3,0	2,3	1,7
Ydervæg og sokkel B	31,7	5,4	4,2	3,2
LED-Belysning	35,9	15,8	16,3	11,7
Solcelleanlæg	137,0	65,1	65,1	46,9
Varmepumper	88,6	4,5	0	0
Samlede måltal		57,2	75,9	60,7

Tabel 16. Oversigt af energibesparelsen ved foreslåede renoveringstiltag.

I tabel 16 ses endvidere de opnåede reduktioner i nøgletal fordelt på de enkelte energiklasser for hvert renoveringsforslag som beregnet i Be10. Det samlede måltal for opgradering af bygningen til lavenergiklasserne er vist nederst i tabel 15. Ved at sammensætte renoveringsforslagene i forskellige kombinationer som giver det samlede måltal for de enkelte energirammer, kan der opstilles nogle pakked løsninger som opgraderer bygningen til de enkelte energiklasser. Ud over energirammen skal de valgte kombinationer også undersøges for kravet til det dimensionerende varmetab for hver energiklasse. Dette vil blive nærmere belyst i kapitel 5.

For at kunne vurdere om de enkelte energibesparende tiltag er rentable, anvendes to metoder. Den ene metode er beskrevet i BR10, hvor der er nævnt, at en energibesparende foranstaltning er rentabel, når:

$$\frac{\text{Årlig besparelse} * \text{Levetid af foranstaltning}}{\text{Investeringsen}} > 1,33$$

Til investeringen medregnes kun ekstraomkostninger til de energibesparende forbedringer.

Den anden metode som anvendes til vurdering om de enkelte forslag til energioptimering er rentable, fås ved at beregne intern rente [8] af investeringen i forhold til nutidsværdien af besparelsen i hele levetiden for det energibesparende tiltag. Den interne rente bruges herefter til at vurdere om investeringen giver et acceptabelt afkast. For beregning af nutidsværdien, er valgt en lav rentesats idet renteværdien af investeringen modvirkes af en forventet stigning i energiydgifter, som øger værdien af den årlige besparelse.

I det følgende er investeringsprisen for de foreslåede tiltag overslagspriser som er fremkommet i samarbejde med en medarbejder fra en lokal entreprenørvirksomhed.

3.1 – Efterisolering af terrændæk.

Med en varmepris på kr. 432 pr. MWh for fjernvarmeforbrug (se bilag 7), vil der ved ovennævnte efterisolering af terrændækket som giver en varmebesparelse på 136 MWh, kunne opnås en besparelse på varmeregningen på i alt kr. 58.752.

I henhold til projektkalkulation i bilag 8, vil efterisolering af terrændækket beløbe sig til en investering på kr. 2.905.420. I henhold til BR10 vil efterisolering af bygningsdele have en levetid på 40 år.

Dette giver en rentabilitet på 0,81 som er mindre end 1,33 hvilket medfører, at tiltaget ikke betragtes som værende rentabelt.

Ved beregning af tilbagebetalingstid og intern rente i Excel regneark som vist i bilag 8, fås et resultat som vist i tabel 17.

INPUT:	
Investering [DKK]	2.900.000
Årlig besparelse [DKK/år]	58.700
Levetid [År]	40
Rente [%]	1,0%
OUTPUT:	
Nominel værdi [DKK]	-555.300
Nutidsværdi [DKK]	-976.600
Simpel tilbagebetalingstid [År]	49,5
Diskonteret tilbagebetalingstid [År]	68,6
Intern rente - IRR [%]	-2,0%

Tabel 17. Resultat fra økonomiberegning på terrændæk.

Da resultatet viser, at nutidsværdien er på kr. -976.562 ved levetidens udløb og den diskonterede tilbagebetalingstid er længere end levetiden, så anses investeringen ikke som værende attraktiv. Endvidere ses at intern rente er negativ, så økonomisk set, vil det være bedre at investere i noget andet.

3.2 – Efterisolering af ydervæg og sokkel.

Ved at efterisolere ydervæggen med hulmursisolering og udvendig efterisolering af soklen som beskrevet i forslag A, kan der opnås en varmebesparelse på 18,8 MWh pr. år. Med en fjernvarmepris på kr. 432 pr. MWh, giver det en årlig besparelse på varmeregningen på kr. 8.122.

Prisen for det energibesparende tiltag er kr. 470.150 og med en levetid på 40 år, fås en beregnet rentabilitet på 0,69 hvilket medfører, at den energibesparende aktivitet ikke er rentabel i henhold til BR10.

Ved beregning af tilbagebetalingstid og intern rente i Excel regneark som vist i bilag 9, fås et resultat som vist i tabel 18. Resultatet viser også her at investeringen ikke vil være økonomisk rentabel.

INPUT:	
Investering [DKK]	470.000
Årlig besparelse [DKK/år]	8.100
Antal år [År]	40
Rente [%]	1,0%
OUTPUT:	
Nominel værdi [DKK]	-145.300
Nutidsværdi [DKK]	-203.500
Simpel tilbagebetalingstid [År]	57,9
Diskonteret tilbagebetalingstid [År]	86,9
Intern rente - IRR [%]	-2,7%

Tabel 18. Resultat fra økonomiberegning på ydervæg og sokkel forslag A.

Ved at efterisolere ydervæggen udvendigt og samtidig udvendig efterisolering af soklen i henhold til forslag B, kan opnås en varmebesparelse på 31,7 MWh pr. år. Dette giver en årlig besparelse på varmeregningen på i alt kr. 13.694.

Prisen for det energibesparende tiltag er kr. 1.007.340 og med en levetid på 40 år, fås en beregnet rentabilitet på 0,54 hvilket medfører, at den energibesparende aktivitet ikke er rentabel i henhold til BR10.

Ved beregning af tilbagebetalingstid og intern rente i Excel regneark som vist i bilag 10, fås et resultat som vist i tabel 19. Resultatet viser også her at investeringen ikke vil være økonomisk rentabel.

INPUT:	
Investering [DKK]	1.000.000
Årlig besparelse [DKK/år]	13.700
Antal år [År]	40
Rente [%]	1,0%
OUTPUT:	
Nominel værdi [DKK]	-459.600
Nutidsværdi [DKK]	-557.700
Simpel tilbagebetalingstid [År]	73,6
Diskonteret tilbagebetalingstid [År]	133,7
Intern rente - IRR [%]	-3,7%

Tabel 19. Resultat fra økonomiberegning på ydervæg og sokkel forslag B.

3.3 – Belysningsanlæg med LED-lyskilder.

I den planlagte ombygning og tilbygning er der medtaget udskiftning af eksisterende belysningsarmaturer samt belysningsarmaturer i tilbygninger. Så alle omkostninger vedrørende nedtagning af eksisterende armaturer og opsætning af nye armaturer er indregnet i den planlagte ombygning og tilbygning. Hermed vil omkostningerne for dette energibesparende tiltag begrænses til at være differencen imellem prisen på armaturet i det planlagte projekt og prisen på det foreslåede armatur med LED-lyskilder.

Prisdifferensen fastlægges ud fra listepriiserne i Philips katalog (se bilag 11), hvor prisen for Philips type TBS165 3x14W/830 HFD C6 er kr. 1.000,- inkl. lyskilder og prisen for Philips type RC120B LED27S/830 PSD er kr. 1.340,- inkl. lyskilder. Hermed kan prisdifferencen fastsættes til kr. 340,-.

Da der skal anvendes 574 nye armaturer i den planlagte ombygning og tilbygning, giver det foreslåede energibesparende tiltag en merpris på i alt kr. 195.160,-. LED-lyskilderne giver en elbesparelse på 35,9 MWh/år og en varmestigning på 13 MWh/år hvilket giver en samlet besparelse på energiregningen på kr. 20.900,-. Levetiden for belysningsarmaturer er på 15 år, hvorved der fås en beregnet rentabilitet på 1,61 som er større en 1,33, hvilket medfører at det energibesparende tiltag er rentabelt i henhold til BR10.

Resultaterne fra beregning af tilbagebetalingstid og intern rente vist i tabel 20, indikerer også, at der er et godt afkast på investeringen, selv om tilbagebetalingstiden er på 9-10 år.

INPUT:	
Investering [DKK]	195.000
Årlig besparelse [DKK/år]	20.900
Antal år [År]	15
Rente [%]	1,0%
OUTPUT:	
Nominel værdi [DKK]	118.600
Nutidsværdi [DKK]	94.800
Simpel tilbagebetalingstid [År]	9,3
Diskonteret tilbagebetalingstid [År]	9,8
Intern rente - IRR [%]	5,6%

Tabel 20. Resultat fra økonomiberegning på LED-belysning.

3.4 – Solcelleanlæg på fladt tag.

På grund af størrelsen på solcelleanlæggets samlede installerede effekt, kan solcelleanlægget vælges som installationstilsluttet eller som nettilsluttet til det offentlige elnet. Ved at vælge installationstilsluttet solcelleanlæg, kan en del af den producerede solcelleenergi bruges til eget forbrug og resten sælges til det offentlige net. Dette vil være den bedste løsning for Martec, da de betaler kr. 739 pr. MWh el (se bilag 7) og prisen for salg til det offentlige net, som er Energinet.dk, er kr. 600 pr. MWh i de første 10 år hvorefter prisen falder til kr. 400 pr. MWh [12].

Den samlede elproduktion som solcelleanlægget forventes at kunne producere er på 128 MWh pr. år. Da elforbrug og elproduktion afregnes time for time, forventes det at 80% af den samlede produktion på solcelleanlægget vil kunne bruges til eget forbrug. Dette svarer til ca. 45% af det samlede elforbrug.

Den forventede levetid for solcelleanlægget er fastsat til 30 år, hvilket giver en beregnet rentabilitet på 1,84 som er større end 1,33 i henhold til BR10, hvilket medfører, at tiltaget betragtes som værende rentabelt (se bilag 12).

Den samlede investering og den årlige besparelse de første 10 år samt efterfølgende år er vist i tabel 21.

INPUT:	
Investering [DKK]	1.482.000
Årlig besparelse første 10 år [DKK/år]	91.000
Årlig besparelse efter 10 år [DKK/år]	85.900
Levetid [År]	30
Rente [%]	1,0%
OUTPUT:	
Nominel værdi [DKK]	1.147.000
Nutidsværdi [DKK]	784.000
Simpel tilbagebetalingstid [År]	16,3
Diskonteret tilbagebetalingstid [År]	18,3
Intern rente - IRR [%]	3,2%

Tabel 21. Resultat af økonomiberegning på solcelleanlæg.

Ved beregning af tilbagebetalingstid og intern rente i Excel regneark, fås et resultat som vist i tabel 21. Resultatet viser, at der ved levetidens udløb er opnået en besparelse på kr. 784.000 i nutidsværdi. Da tilbagebetalingstiden er på 16,9 år, og den interne rente er meget lav, så vil investeringen i solcelleanlægget ikke være særlig attraktivt set fra et økonomisk synspunkt.

3.5 – Energioptimering med varmepumpeanlæg.

For at kunne udnytte varmeproduktionen fra varmepumperne i Energi- og Miljølaboratoriet, er det nødvendigt med en tilpasning til det eksisterende centralvarmeanlæg. Hertil kræves blandt andet en varmeveksler, reguleringsudstyr, rørføring til varmecentralen og noget programmering i overvågningssystemet som i alt kræver en investering på kr. 46.000,-.

Den forventede besparelse på fjernvarmen er på 88,5 MWh/år og den forventede stigning i elforbrug er på 23,9 MWh/år. Dette giver en samlet besparelse på energiudgifter på i alt kr. 20.570,-. Med en forventet levetid på 20 år, fås hermed en beregnet rentabilitet på 6,71 som er meget større end 1,33 hvilket medfører, at det energibesparende tiltag kan betragtes som rentabelt (se bilag 13).

INPUT:	
Investering [DKK]	46.000
Årlig besparelse [DKK/år]	20.600
Levetid [År]	20
Rente [%]	1,0%
OUTPUT:	
Nominel værdi [DKK]	365.400
Nutidsværdi [DKK]	325.200
Simpel tilbagebetalingstid [År]	2,2
Diskonteret tilbagebetalingstid [År]	2,3
Intern rente - IRR [%]	43,2%

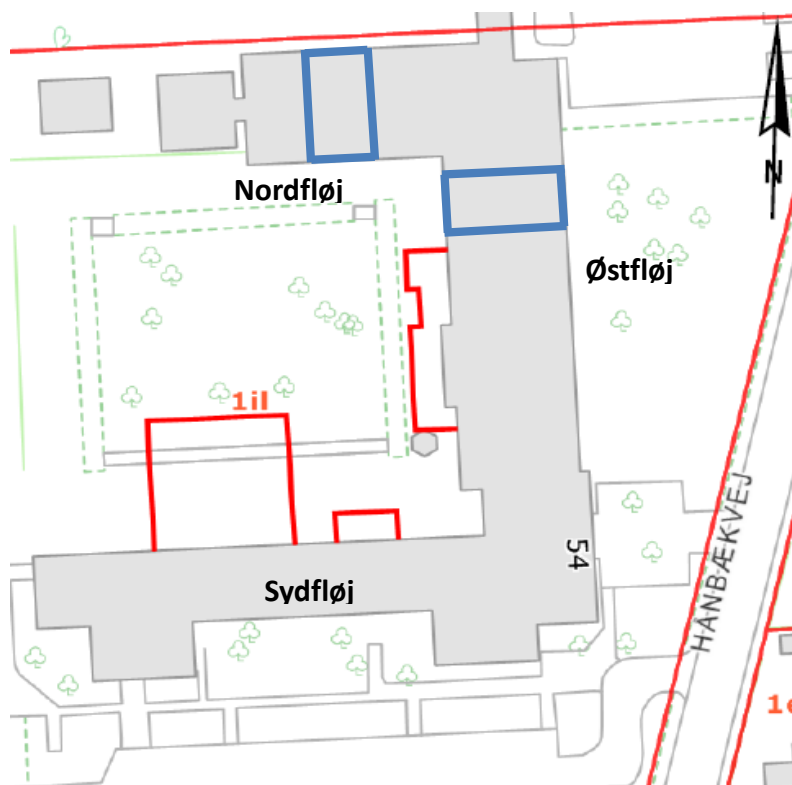
Tabel 22. Resultat af økonomiberegning på varmepumpeanlæg.

Ved beregning af tilbagebetalingstid og intern rente i Excel regneark, fås et resultat som vist i tabel 22. Resultatet viser, at der ved levetidens udløb er opnået en besparelse på kr. 325.171 i nutidsværdi. Da tilbagebetalingstiden er på 2,3 år, og den interne rente er meget høj, så vil investeringen i varmepumpeanlægget være meget attraktivt set fra et økonomisk synspunkt.

4 – Simulering af indeklimaet i bygningen.

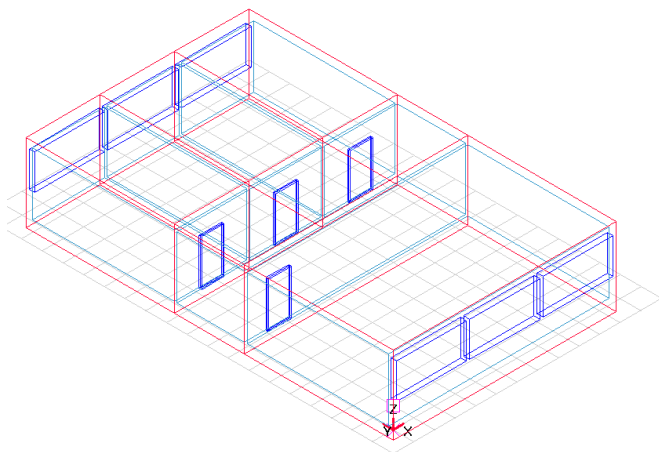
I forbindelse med renoveringen af den eksisterende bygning, har det været vigtigt at sikre en forbedring af indeklimaet med henblik på at opnå et lavere CO₂-niveau og et stabiliseret rumtemperaturforhold på omkring 20 – 26 °C. Derfor er der i det følgende udført en analyse af, hvilken effekt de påtænkte renoveringer vil have på indeklimaet i den eksisterende bygning, inden der tages stilling til yderligere tiltag med henblik på energioptimeringer.

Som grundlag for analysen er der gennemført en simulering i programmet BSim [9], hvor der er opbygget 4 modeller til hjælp for påvisning af effekten ved den påtænkte renovering. De 4 modeller er opbygget af 2 udvalgte områder i den eksisterende bygning, hvor der bliver simuleret for indeklimaet for både før renoveringen og efter renoveringen. De 2 udvalgte områder er vist i figur 21.



Figur 21. De udvalgte områder for simulering i BSim er vist med blå.

For 2 af modellerne er der valgt et område af bygningen på den nordlige fløj, hvor der er 2 undervisningslokaler og en gang. For de 2 andre modeller er der valgt et område på den østlige fløj, hvor der er et undervisningslokale, 3 kontorer og en gang i midten som vist i figur 22.



Figur 22. Model fra BSim til simulering af øst/vestvendt undervisning og kontorlokaler.

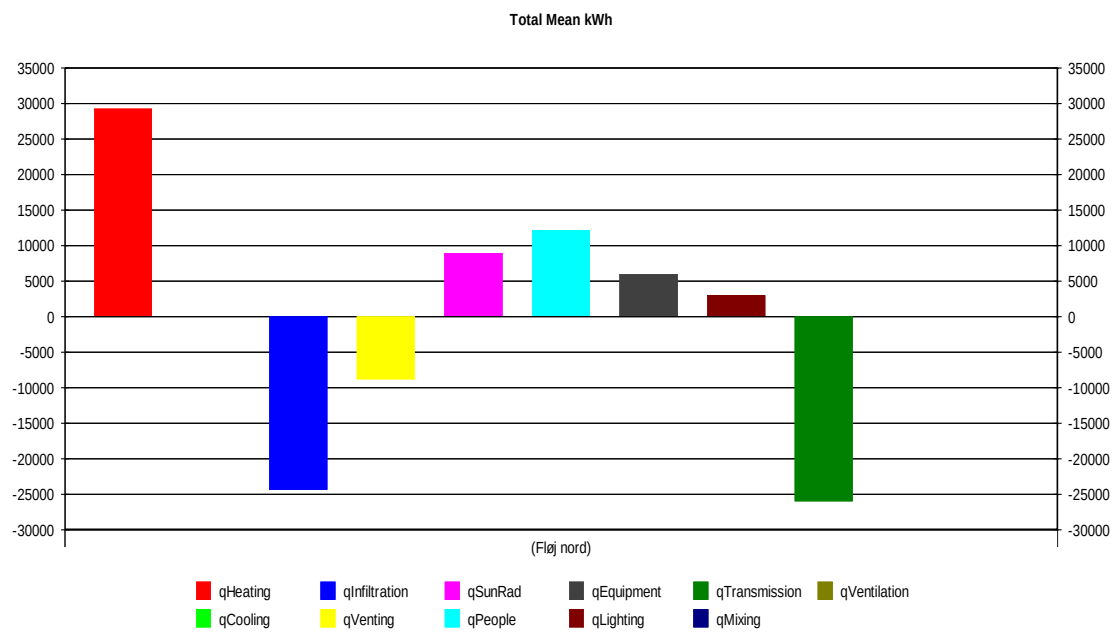
Som kontrol af resultaterne fra modellerne, foretages først en sammenligning af varmebalancen for modellerne før og efter renoveringen. Hvis reduktionen i varmebehov og reduktionen i transmissionstab svarer til det forventede fra simuleringen i Be10, vil modellerne betragtes som værende repræsentative. Det skal dog bemærkes at tallene fra varmebalancen ikke kan blive fuldstændig identiske, blandt andet på grund af de forskellige geometriske forhold samt forskellige forhold i belastning fra personer og udstyr.

Ved sammenligning af varmebalancen i efterfølgende grafer fra de 4 modeller, kan konstateres at modellen for før og efter renovering af bygningen giver en reduktion i varmebehov på ca. 63% som betragtes at være acceptabelt i forhold til resultatet fra Be10 som gav 69% i reduktion på varmebehov.

Endvidere ses at der efter renovering af bygning er kommet et ekstra varmetab med fra ventilationsanlægget som erstatter den manuelle udluftning (Venting) fra før renoveringen. Varmebidraget fra solindstråling er blevet reduceret som følge af det mindre vinduesareal. Varmetabet fra infiltration er blevet mindre på grund af fjernelse af udluftningsventiler under vinduerne og udskiftning af vinduer hvor der var utætte lister ved oplukkelige vinduer.

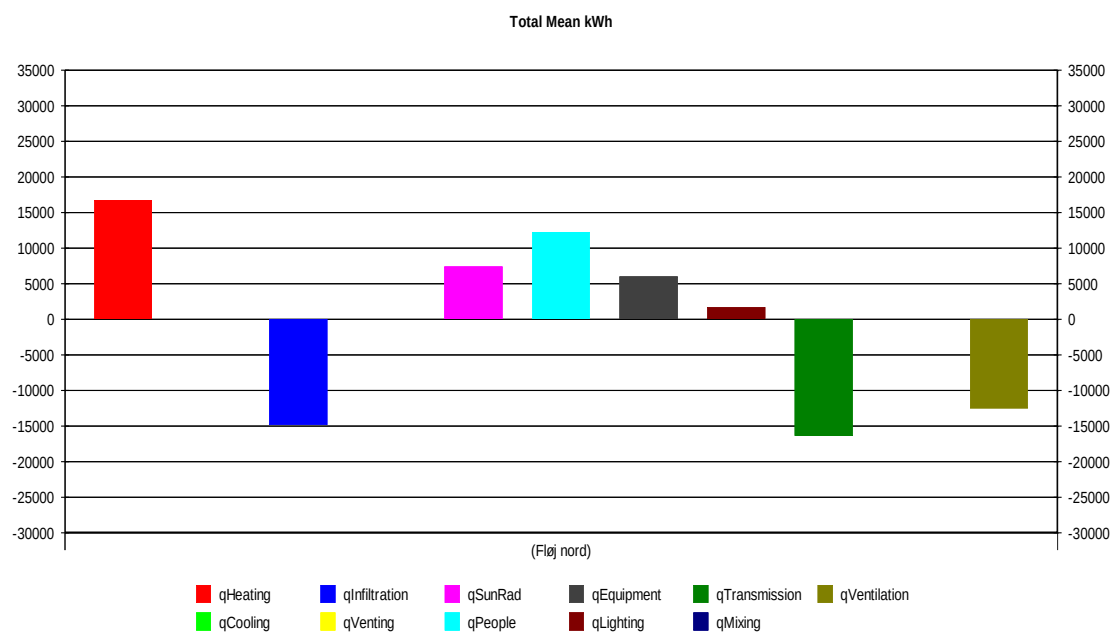
Varmetilskuddet fra personbelastningen er uændret da det er samme som før, men varmetilskuddet fra belysningen er blevet mindre på grund af reduktion i installeret effekt til belysningsanlægget.

Ved sammenligning af figur 23 og figur 24 ses forskellen fra før og efter renovering af nord/sydvendt undervisningslokaler i den eksisterende bygning.



C:\Undervisningsmateriale\Bygningsfysik\Masterprojekt\BSiml\Martec før NS.dissxml

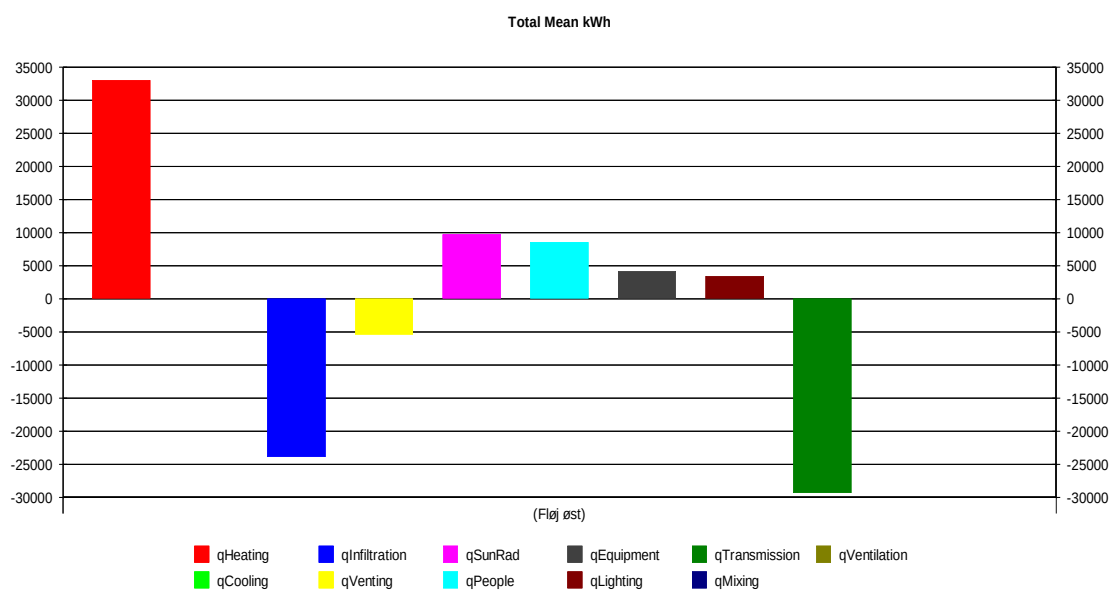
Figur 23. Varmebalance i nord/sydvendt undervisningslokaler før renovering.



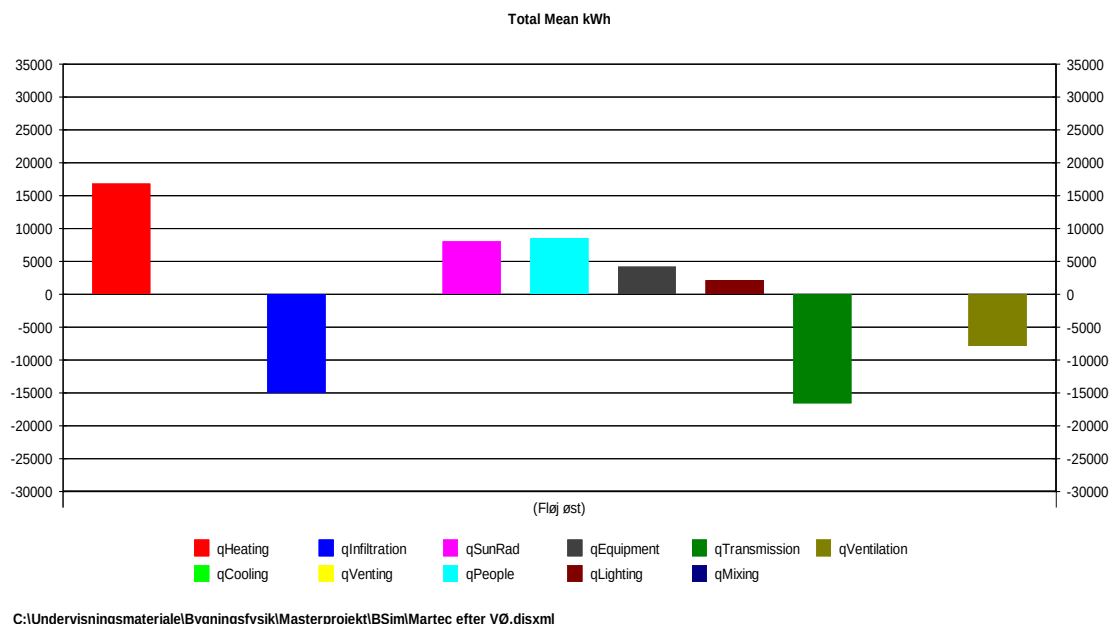
C:\Undervisningsmateriale\Bygningsfysik\Masterprojekt\BSiml\Martec efter NS.dissxml

Figur 24. Varmebalance i nord/sydvendt undervisningslokaler efter renovering.

Ved sammenligning af figur 25 og figur 26, ses forskellen fra før og efter renovering af vest/østvendt kontorlokale og undervisningslokale i den eksisterende bygning.



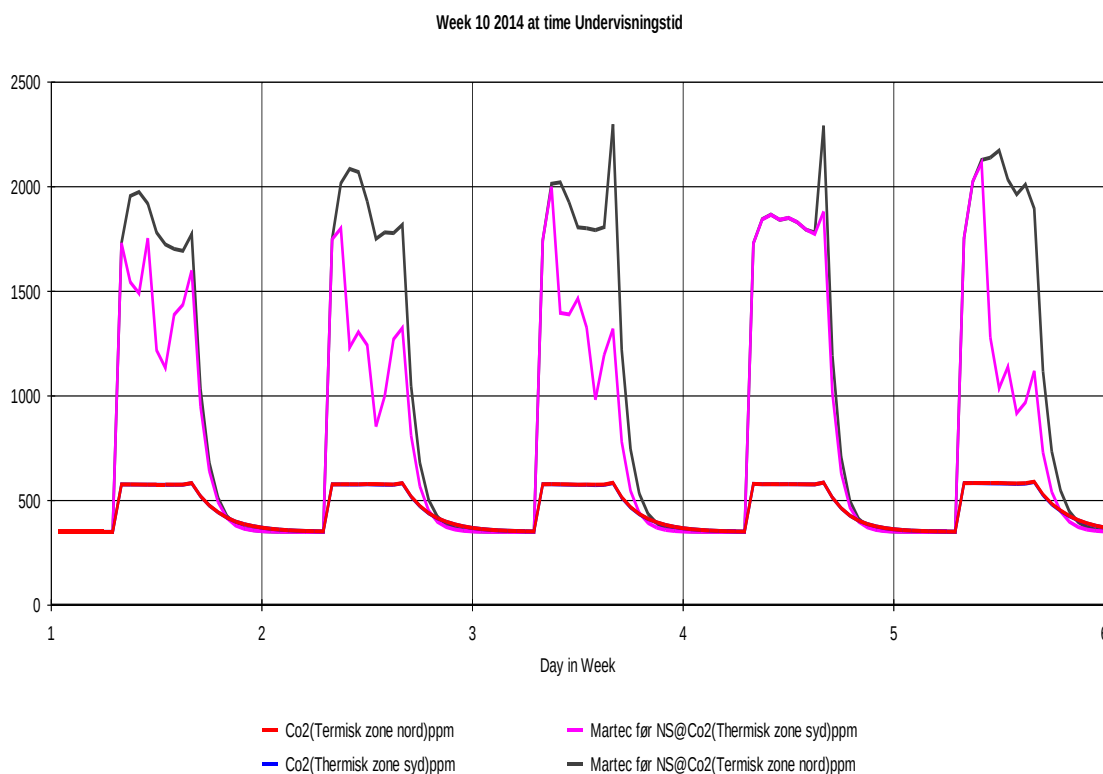
Figur 25. Varmebalance i vest/østvendt undervisningslokale/kontor før renovering.



Figur 26. Varmebalance i vest/østvendt undervisningslokale/kontor efter renovering.

Som kontrol af virkningen fra ventilationsanlægget hvor luftskiftet er valgt ud fra de beregnede luftskiftebehov, som skal sikre et acceptabelt niveau af CO₂-indhold i undervisningslokaler og kontorlokaler, er resultaterne fra simuleringen i BSim fra før

og efter renovering analyseret. Niveauet af CO₂-indholdet fra simuleringens resultater svarer rimelig godt til resultaterne fra Arbejdstilsynets målinger på omkring 2000 ppm (se bilag 14). I figur 27, er resultaterne på CO₂-indhold i nord og sydvendt undervisningslokale for før og efter renovering, vist i samme graf.



C:\Undervisningsmateriale\Bygningsfysik\Masterprojekt\BSiml\Martec efter NS.dixml

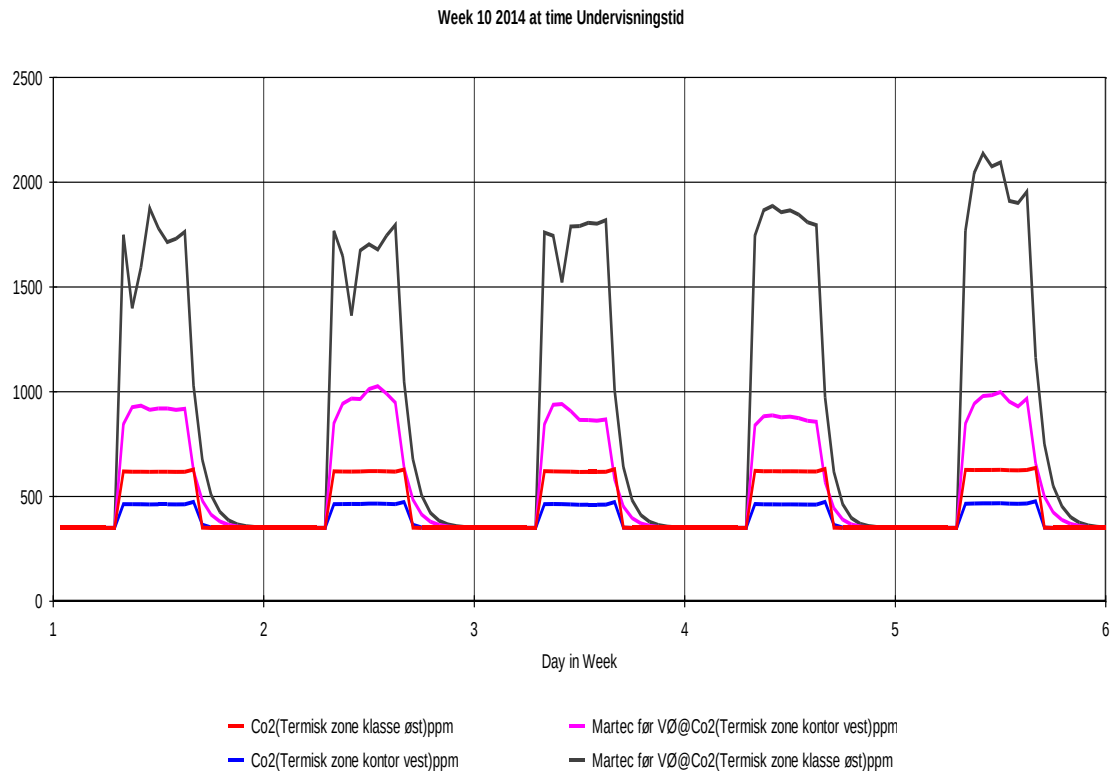
Figur 27. CO₂-indhold i nord og sydvendt undervisningslokaler i uge 10 i marts måned.

I figur 27 er den sorte kurve i grafen CO₂-indholdet i nordvendt undervisningslokale og den lilla kurve CO₂-indholdet i sydvendt undervisningslokale fra før renovering af bygningen. CO₂-niveauet er i perioder lavere i sydvendt undervisningslokale, da der sker hyppigere udluftning på grund af højere temperaturer som følge af varmetilskud fra solindfald.

Den røde og den blå kurve i grafen er sammenfaldende og repræsenterer CO₂-niveauet i nord og sydvendt undervisningslokale efter renoveringen.

For sammenligning af CO₂-indholdet i undervisningslokaler og kontorer er valgt en måned, hvor CO₂-indholdet er meget højt i forhold til de øvrige måneder. Ifølge kurverne i figur 27, falder CO₂-indholdet fra ca. 1900 ppm til ca. 600 ppm i undervisningslokalerne. Det valgte luftskifte er således tilstrækkeligt for at holde CO₂-indholdet nede på et acceptabelt niveau under kravet på 1000 ppm.

I nedenfor viste figur 28, er resultaterne fra simuleringen i BSim på CO₂-indhold i undervisningslokale og kontorlokale for før og efter renovering af bygningen, vist i samme graf.



C:\Undervisningsmateriale\Bygningsfysik\Masterprojekt\BSim\Martec efter VØ.dixml

Figur 28. CO₂-indhold i østvendt undervisningslokale og vestvendt kontor.

I figur 28 er den sorte kurve CO₂-indholdet i østvendt undervisningslokale og den lilla kurve CO₂-indholdet i vestvendt kontorlokale før renovering af bygningen.

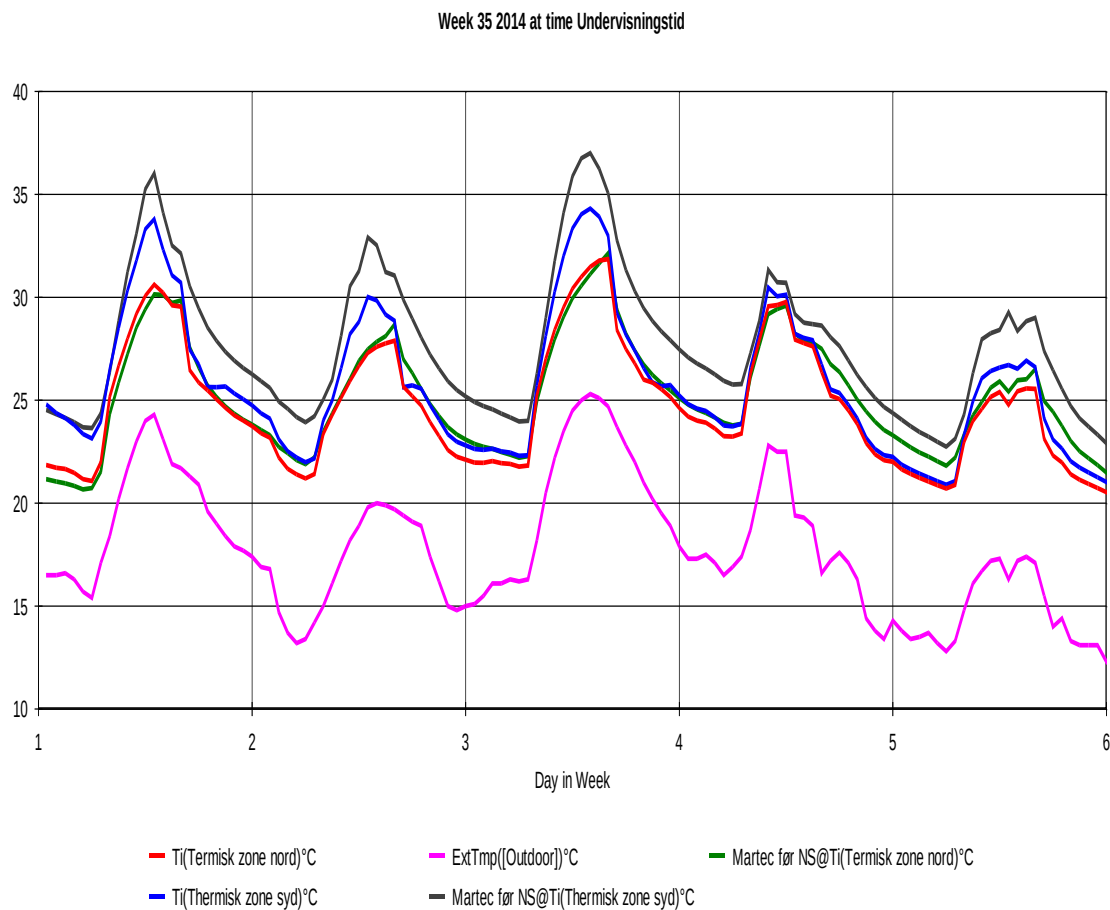
Den røde kurve er CO₂-niveauet i østvendt undervisningslokale og den blå kurve er CO₂-niveauet i vestvendt kontorlokale efter renoveringen.

Af figur 28 fremgår, at der tilsyneladende ikke har været problemer med for højt CO₂-niveau på kontorlokalene i forhold til kravet på maksimum 1000 ppm. Men efter installering af ventilationsanlæg, falder CO₂-indholdet fra ca. 900 ppm til 450 ppm. CO₂-indholdet i undervisningslokalet falder ligeledes fra ca. 1900 ppm til ca. 600 ppm.

For at undersøge om det valgte luftskifte har givet en tilstrækkelig god virkning for forbedring af det termiske indeklimaforhold, er temperaturforholdene i kontorlokaler og undervisningslokaler fra simuleringen i BSim analyseret.

I figur 29 er vist temperaturer for uge 35 i august måned, som er på tidspunkter hvor der også foregår undervisning. Her er den sorte kurve temperaturen i sydvendt undervisningslokale før renovering og den blå kurve er temperaturen efter renovering. Den grønne kurve er temperaturen i nordvendt undervisningslokale før renovering og den røde kurve er temperaturen efter renovering. Den nederste lillafarvet kurve er udetemperaturen.

Ved sammenligning af temperaturer fra før og efter renovering på, ses at temperaturen varierer i mellem 20 og 37 °C før renovering og i mellem 20 og 34 °C efter renovering, hvor de højeste temperaturer er ved høj udetemperatur. Endvidere ses at det valgte luftskifte på 3,4 l/s m² ikke er tilstrækkeligt, hvis temperaturen skal holdes nede på et komfortabelt niveau når udetemperaturen kommer over 20 °C.



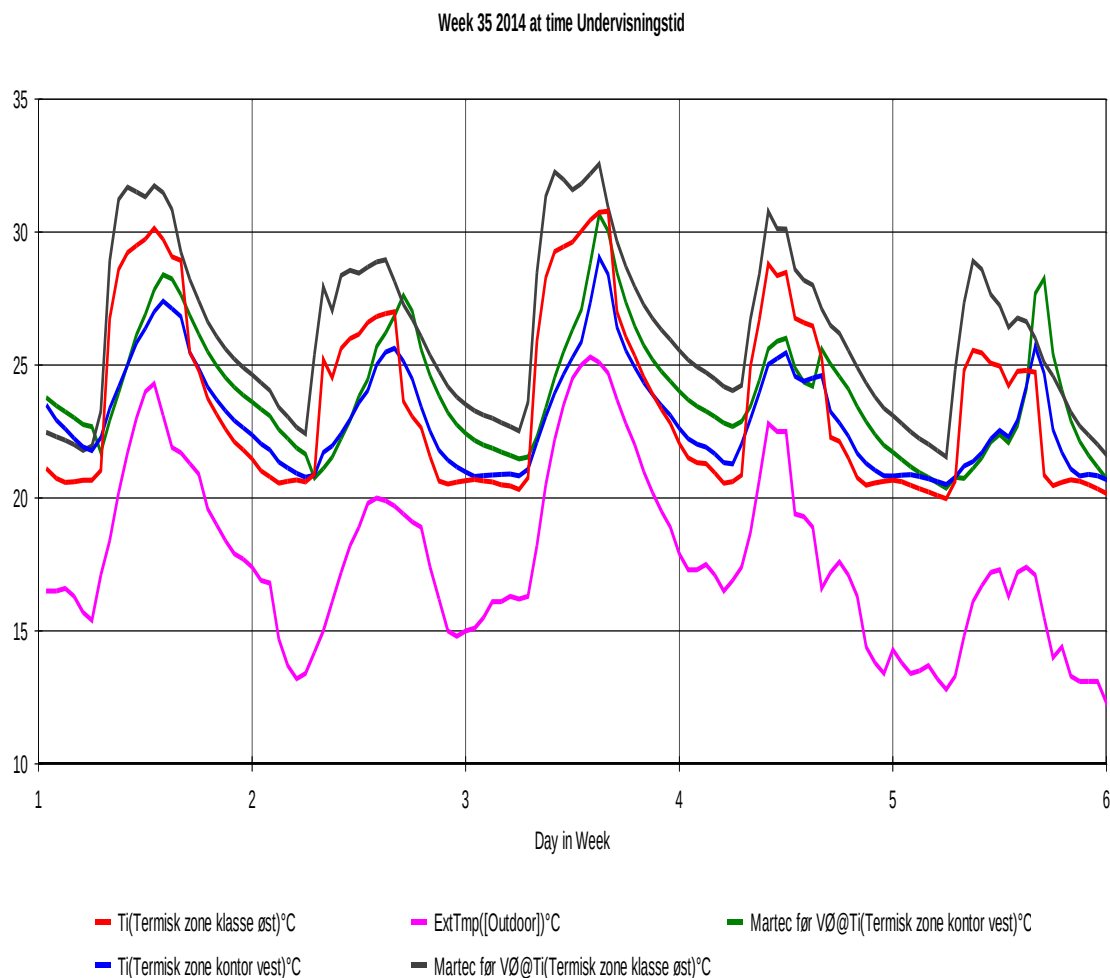
C:\Undervisningsmateriale\Bygningsfysik\Masterprojekt\BSim\Martec efter NS.dixml

Figur 29. Temperaturer i nordvendt og sydvendt undervisningslokaler.

I figur 30 er vist temperaturer for uge 35 i august måned, hvor den sorte kurve er temperaturen i østvendt undervisningslokale før renovering og den røde kurve er

temperaturen efter renovering. Den grønne kurve er temperaturen i vestvendt kontorlokale før renovering og den blå kurve er temperaturen efter renovering. Den nederste lillafarvet kurve er udetemperaturen.

Her varierer temperaturen i mellem 20 og 33 °C før renovering og i mellem 20 og 31 °C efter renovering, hvor de højeste temperaturer er ved høj udetemperatur. Så her ses også, at det valgte luftskifte på 3,4 l/s m² ikke er tilstrækkeligt, hvis temperaturen skal holdes nede på et komfortabelt niveau når udetemperaturen kommer over ca. 17 °C.



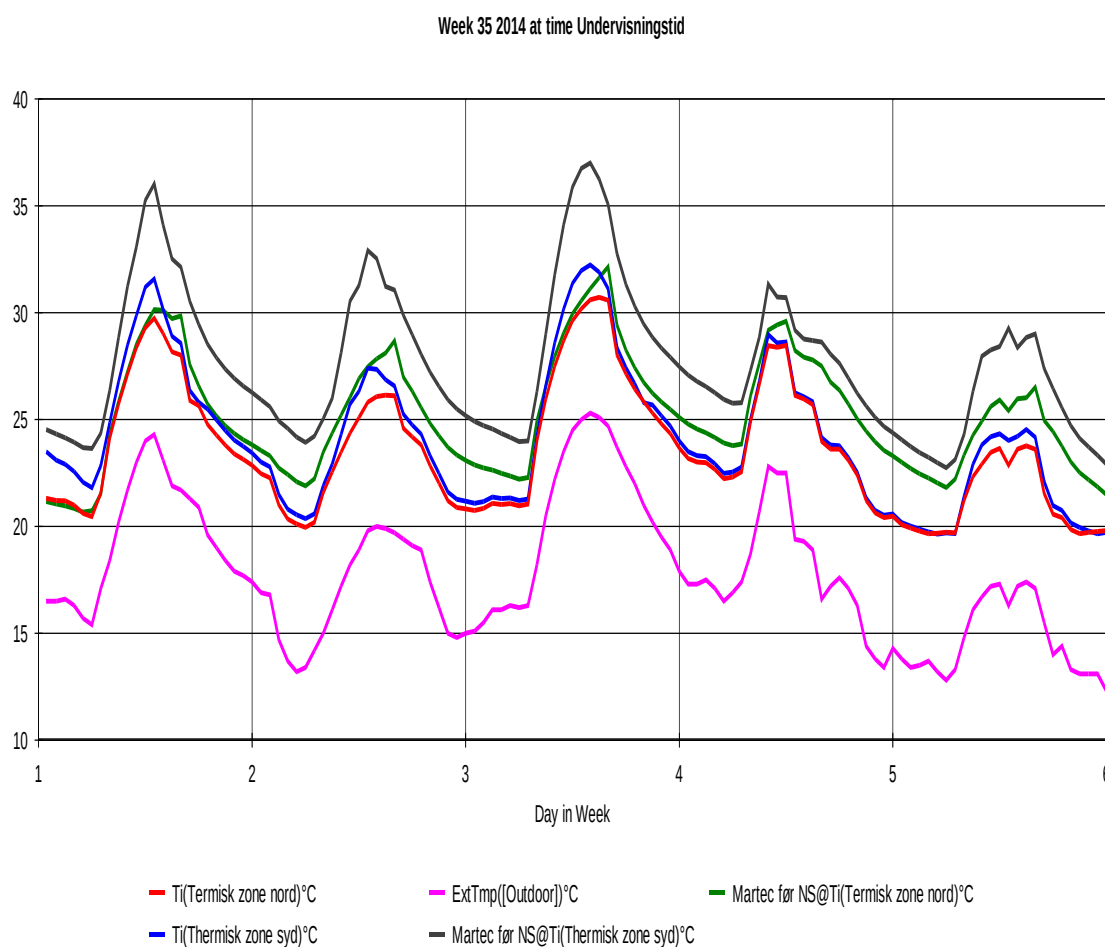
C:\Undervisningsmateriale\Bygningsfysik\Masterprojekt\BSimlMartec efter VØ.dismxl

Figur 30. Temperaturer i østvendt undervisningslokale og vestvendt kontorlokale.

For at holde temperaturen nede på et optimalt niveau på ca. 20 – 26 °C, skal luftskiftet i lokalerne øges og der skal være mulighed for at køre med natkøling i den varme periode.

I figur 31 er temperaturerne vist for samme periode hvor det simulerede luftskiftet efter renovering er øget til $7,2 \text{ l/s m}^2$. Her er den sorte kurve temperaturen i sydvendt undervisningslokale før renovering og den blå kurve er temperaturen efter renovering. Den grønne kurve er temperaturen i nordvendt undervisningslokale før renovering og den røde kurve er temperaturen efter renovering. Den nederste lillafarvet kurve er udetemperaturen.

Af graferne i figur 17 ses at temperaturen i undervisningslokalerne nu er faldet til næsten samme niveau på ca. $20 - 32$ samt at det kun er ved høje udetemperaturer at komforttemperaturen på 26°C overskrides.



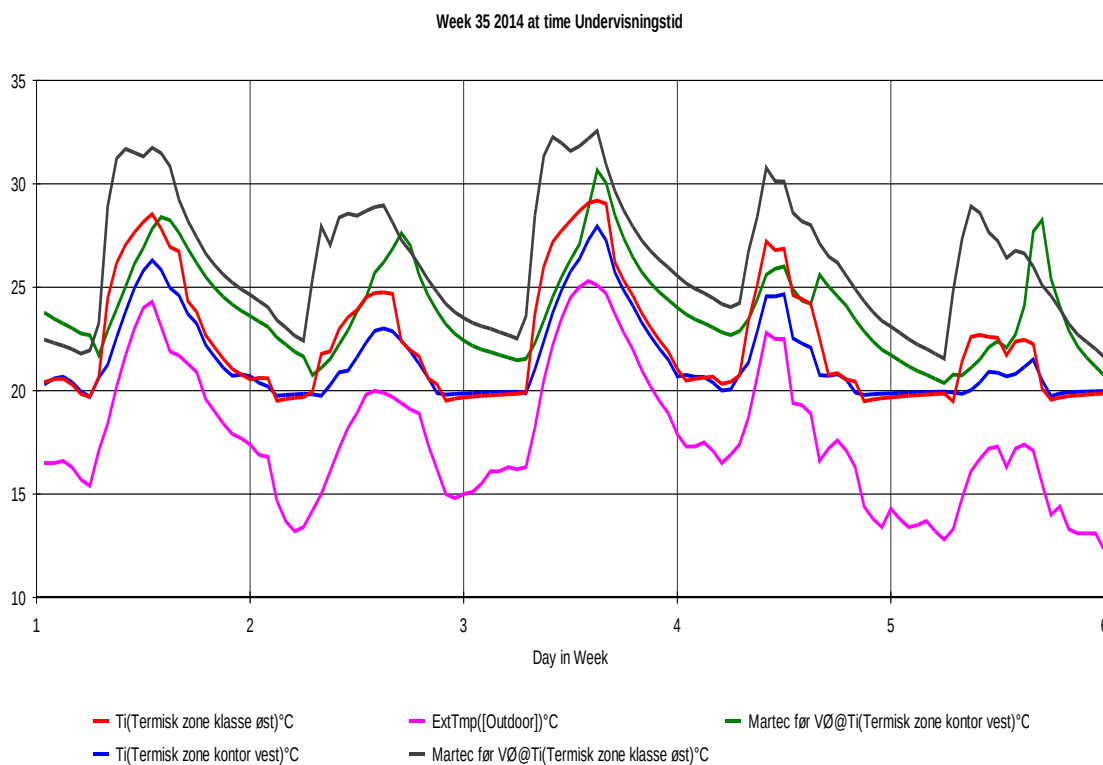
C:\Undervisningsmateriale\Bygningsfysik\Masterprojekt\BSim\Martec ekstra vent NS.dixml

Figur 31. Temperaturforløb i nord- og sydvendt undervisningslokaler efter renovering.

I figur 32 er temperaturerne vist for samme periode hvor det simulerede luftskiftet efter renovering er øget til $7,2 \text{ l/s m}^2$. Her er den sorte kurve temperaturen i østvendt undervisningslokale før renovering og den røde kurve er temperaturen efter renovering. Den grønne kurve er temperaturen i vestvendt kontorlokale før renovering

og den blå kurve er temperaturen efter renovering. Den nederste lilla farvet kurve er udetemperaturen.

Af graferne i figur 32 ses at temperaturen i undervisningslokalet nu er faldet til et temperaturniveau på ca. 20 – 29 °C samt at det kun er ved høje udetemperaturer at komforttemperaturen på 26 °C overskrides. I kontorlokalet er temperaturen faldet til ca. 20 – 27 °C ved høje udetemperaturer.



C:\Undervisningsmateriale\Bygningsfysik\Masterprojekt\BSim\Martec ekstra vent VØ.dixml

Figur 32. Temperaturforløb i øst/vestvendt undervisningslokale/kontor før renovering.

Hvis temperaturen skal sænkes yderligere bliver det nødvendigt med køleflader i ventilationsanlægget så indblæsningstemperaturen kan sænkes ved de høje udelufttemperaturer.

5. – Udvalgelse og anbefaling af opgraderinger.

Da hvert af de foreslåede energibesparende tiltag ikke alene kan medføre en opgradering af bygningen til lavenergiklasserne, vil det være nødvendigt at udvælge flere af de foreslåede tiltag i en kombination, som bevirker at bygningen kan opgraderes til lavenergiklasse. Ved udvælgelsen er der lagt vægt på først at bruge de energibesparende tiltag som har den bedste rentabilitet til kombinationer, som kan opfylde de enkelte lavenergiklasser. I tabel 15 ses en oversigt på energibesparelsen for enkelte tiltag i nøgletal og i tabel 23 ses en samlet oversigt på rentabilitet af de foreslåede energibesparende tiltag.

	Terrændæk	Ydervæg A	Ydervæg B	Belysning	Solcelleanlæg	Varmpumpe
Investering [DKK]	2.905.420	470.150	1.007.340	195.160	1.481.530	46.000
Årlig besparelse [DKK/år]	58.752	8.122	13.694	20.914	93.626	20.570
Levetid [År]	40	40	40	15	30	20
Nominel værdi [DKK]	-555.340	-145.286	-459.564	118.552	1.108.044	365.398
Nutidsværdi [DKK]	-976.562	-203.514	-557.746	94.801	755.481	325.171
Simpel tilbagebetalingstid [År]	49,5	57,9	73,6	9,3	15,8	2,2
Diskonteret tilbagebetalingstid [År]	68,6	86,9	133,7	9,8	18,3	2,3
Intern rente - IRR [%]	-2,0%	-2,7%	-3,7%	5,6%	3,2%	43,2%
Rentabilitet < 1,33 <=	0,88	0,69	0,54	1,61	1,90	6,71

Tabel 23. Samlet oversigt på rentabilitet af foreslåede energibesparende tiltag.

I forbindelse med udvælgelsen af de energibesparende tiltag vil det dimensionerende transmissionstab for klimaskærm ekskl. vinduer og døre også blive undersøgt med henblik på specificerede krav som angivet i tabel 24.

W/m ²	BR2010	LE2015	BK2020
Krav til dimensionerende transmissionstab ekskl. vinduer og døre for bygning i 1 etage.	5,0	4,0	3,7

Tabel 24. Krav til dimensionerende varmetab for bygningsklasser i BR10.

Dette medfører, at det er nødvendigt at vælge tiltaget med nyt terrændæk som giver 4,4 W/m², for at opfylde kravet på max. 5 W/m² i henhold til BR2010. Ved at vælge nyt terrændæk og efterisolering af ydervæg forslag A fås et dimensionerende varmetab på 4,0 W/m², hvilket er opfylder kravet til LE2015. Ved at vælge nyt terrændæk og efterisolering af ydervæg forslag B fås et dimensionerende varmetab på 3,6 W/m², hvilket er opfylder kravet til BK2020.

Selv om disse kombinationer også medvirker til nedbringelse af nøgletallet for det samlede energibehov, er det imidlertid ikke tilstrækkeligt for at opfylde kravet til energirammerne for nogen af bygningsklasserne. Hertil skal der vælges en kombination af de øvrige energibesparende tiltag for at komme i mål. I tabel 25 er vist de mest optimale kombinationer for opgradering af bygning til lavenergiklasserne.

Kombinationer		BR2010	LE2015	BK2020
K1	Terrændæk og 480 m ² solcelleanlæg	●		
K2	Terrændæk, LED-belysning, Varmepumper og 210 m ² solceller	●		
K3	Terrændæk, LED-belysning, Varmepumper, Ydervæg A og 550 m ² solceller	●	●	
K4	Terrændæk, LED-belysning, Varmepumper, Ydervæg B, og 610 m ² solceller	●	●	●
K5	Terrændæk, LED-belysning, Ydervæg B, og 650 m ² solceller	●	●	●
K6	Terrændæk, Varmepumper, Ydervæg B og 855 m ² solceller	●	●	●

Tabel 25. Kombinationsoversigt for opgradering af bygning til lavenergiklasser.

Ved beregning i Be10 på forskellige kombinationer, viser det sig at nyt terrændæk og solcelleanlæg skal indgå i alle kombinationer for at kunne opfylde kravet til energirammerne i lavenergiklasserne.

Derfor er kombinationerne sammensat således, at når de nødvendige energibesparende tiltag er udpeget, er solcelleanlægget efterfølgende tilpasset i størrelsen på den installerede effekt, hvilket bevirker at den nødvendige investering i solcelleanlæg tilnærmelsesvis kan reduceres med samme forhold. Herved opnås at de mest rentable tiltag er med til at udligne de mindre gode rentable tiltag, som er nødvendige i forhold til kravet for det dimensionerende varmetab.

I tabel 26 ses en samlet oversigt af investering, besparelse og rentabilitet for de udvalgte kombinationer, hvor det også fremgår at tilbagebetalingstiden og intern rente er blevet jævnet ud i forhold til resultaterne for de individuelle tiltag. Dette bevirker også at der økonomisk set ikke er nogen af de udvalgte kombinationer som er rentable.

INPUT:	K1	K2	K3	K4	K5	K6	
Investering [DKK]	3.737.000	3.510.000	4.569.000	5.210.000	5.234.000	5.440.000	
Årlig besparelse første 10 år [DKK/år]	109.200	122.100	166.700	179.400	163.000	184.000	
Årlig besparelse efter 10 år [DKK/år]	107.100	120.900	163.400	175.700	159.100	178.900	
Gennemsnitlig levetid [År]	30	30	30	30	30	30	
OUTPUT:							
Nominel værdi [DKK]	-502.696	129.385	365.351	96.744	-420.451	-20.752	
Nutidsværdi [DKK]	-953.015	-378.425	-321.797	-642.149	-1.090.078	-774.036	
Simpel tilbagebetalingstid [År]	34,2	28,7	27,4	29,1	32,1	29,6	
Diskonteret tilbagebetalingstid [År]	42,8	34,3	32,7	35,1	40,7	36,0	
Intern rente - IRR [%]	-1,9%	-0,8%	-0,5%	-0,9%	-1,5%	-1,0%	

Tabel 26. Samlet oversigt på rentabilitet af de udvalgte kombinationer for energibesparende tiltag.

6. – Diskussion af opgraderingsforslag og resultater.

De valgte forslag til opgradering af bygningen er selvfølgelig ikke de eneste muligheder, som er tilgængeligt i forbindelse med den forestående renovering. De kan derfor betragtes som nogle eksempler på energibesparende tiltag, som har et stort potentiale for energibesparelser som medfører at bygningen kan opgraderes til lavenergiklasser.

Af andre muligheder for energibesparende tiltag, som kunne være interessante at se nærmere på skal her nævnes: Ekstra isolering i tag, minimering af kuldebroer fra søjler og bjælker, udskiftning af ovenlysvinduer i gangarealer samt installering af central tilstands- og styringsanlæg (CTS-anlæg). Endvidere har der været overvejelser om etablering af passiv køling i tilbygningen, som vil kunne give besparelser på elforbrug til ventilation. Da disse tiltag er vurderet til at have et mindre potentiale i forhold til bygningens samlede energiforbrug, er de ikke medtaget i nærværende rapport. De valgte forslag til energioptimering er i forvejen tilstrækkelig i forhold til opgradering af bygningen til lavenergiklasser.

Det skal derfor ikke på forhånd udelukkes, at der kan være andre energibesparende tiltag som vil være relevante i forhold til at opgradere bygningen til lavenergiklasser.

Som det fremgår af de gennemgåede forslag til opgradering af bygningen, er det meget omkostningstungt at opnå de energioptimeringer, som er nødvendige for at kunne opfylde kravene til lavenergiklasserne for nybyggeri.

Hvis man i stedet for at betragte rentabiliteten af de enkelte energibesparende tiltag, kunne betragte rentabiliteten af alle forslagene i et samlet renoveringsprojekt, hvor den planlagte renovering af bygningen primært skal udføres af andre hensyn end energioptimering, så ville den ekstra investering i energibesparende tiltag være mere attraktiv.

Ved andre hensyn end energioptimering tænkes specielt på en bygning som skal renoveres, for at kunne leve op til dagens standard og krav til behov og funktion, som i yderste konsekvens kan medføre lukning af bygningen hvis renovering undlades.

Da det kan være svært, præcis at sige hvor stor en andel af investeringen i den planlagte renovering der går til energioptimering, vil det være nærliggende at bruge den opnåede besparelse på energiforbrug til investering i nye energibesparende tiltag.

Hermed menes, at de foreslåede energibesparende tiltag for opgradering af bygningen til lavenergiklasse kan tilbagebetales med besparelserne herfra sammen med besparelserne fra den planlagte renovering af bygningen.

Ved en beregning af rentabiliteten hvor alle besparelserne fra det samlede renoveringsprojekt medregnes ved en ekstra investering på opgradering til BK2020, fås en diskonteret tilbagebetalingstid på 4,5% og en tilbagebetalingstid på 15 år. Eller hvis alle besparelserne fra det samlede projekt medregnes ved en ekstra investering på opgradering til LE2015, fås en diskonteret tilbagebetalingstid på 5,7% og en tilbagebetalingstid på 14 år.

Det kan derfor med rette siges at være meget ambitiøst, at bruge den anvendte metode til opgradering af eksisterende bygninger til de frivillige lavenergiklasser, da det er meget dyrere at energioptimere ved renovering end at energioptimere ved nybyggeri. Det der giver den største udfordring ved denne metode, er helt klart at opfylde kravet til det dimensionerende transmissionstab for klimaskærm. Dette krav medfører i nærværende projekt, at det mest omkostningstunge tiltag som er udskiftning af terrændæk ikke kan udelades.

Det må derfor siges at være godt, at der med det nye Bygningsreglement 2015 kommer alternative muligheder for klassificering af eksisterende bygninger som renoveres. Her vil bygningen med den planlagte renovering kunne klassificeres som Renoveringsklasse 2 og opgraderes til Renoveringsklasse 1, ved at installere et solcelleanlæg på 600 m² på taget, set ud fra en energimæssig betragtning. Det anførte krav om reduktion af tilført energibehov på mindst 30 kWh/m² pr. år, er opfyldt ved den planlagte renovering af bygningen.

7. – Konklusion

Starten til den planlagte ombygning og tilbygning var oprindeligt et indeklimaproblem som udløste et pålæg fra Arbejdstilsynet til forbedring af luftskiftet. I forbindelse med arbejdet på forbedring af indeklimaet, viste det sig hurtigt at der også var andre problemer med bygningen som trængte sig på. Her kan især nævnes at bygningen flere steder trængte til renovering på grund af nedslidning samt at der er problemerne med at holde en jævn og stabil temperatur i lokalerne og at der er behov for flere lokaler på grund af væksten i tilgangen af studerende. Der blev derfor iværksat et større projekt som omfatter tilbygninger og ombygning af den eksisterende bygning.

Som det fremgår af simuleringerne i Be10, så er det store energibesparelser der kan opnås ved den planlagte ombygning og tilbygning, selv om det måske ikke var det der var det oprindelige mål. Simuleringer i BSim viser også at de valgte løsninger giver de forventede forbedringer med hensyn til indeklimaet, så det primære mål kan hermed siges at være opfyldt.

Ved bygningsrenovering hvor målet er energibesparelser, vil der normalt også være en vis grad af indeklimaforbedringer, forlængelse af bygningslevetid, forbedring af miljøet, forøgelse af bygningsværdi, m.m. som ofte betragtes som co-benefits. Ved at værdisætte disse co-benefits vil investeringen i energibesparende tiltag kunne gøres mere rentable. I nærværende bygningsprojekt er det nærmere den omvendte situation, hvor målet er indeklimaforbedringer, opfyldelse af nye krav og opgradering af bygningen til et moderne, lyst og behageligt studie- og arbejdsmiljø. Disse tiltag medfører så, at der kan opnås store energibesparelser som kan værdisættes og medvirke til finansieringen af projektet.

Så tanken er hermed, at hvis de opnåede besparelser på driften der kommer fra lavere energiforbrug ved gennemførelse af den planlagte ombygning og tilbygning, bruges til at finansiere ekstra energibesparende tiltag, så vil det være muligt at sætte højere mål for klassificering af bygningen på energi.

Det der står tilbage, er så at finde den nødvendige kapital til investeringen. I nærværende projekt vil en opgradering af bygningen til en lavenergiklasse medføre en forøget investering på ca. 15%. Her kan det også være af stor betydning, hvis Martec kan bryde sig med at være på forkant med udviklingen, som også ville kunne bidrage til et gøre Martec til et endnu mere attraktiv studie- og arbejdsmiljø.

8. – Litteraturliste

- [1]: SBI, Beregningsprogrammet Be10 og beregningsvejledning SBI-anvisning 213
- [2]: SBI-anvisning 230, "Anvisning om Bygningsreglementet 2010"
- [3]: SBI-anvisning 213, "Bygningers energibehov".
- [4]: DS418 "Beregning af bygningers varmetab".
- [5]: DMI, Klima- og Energiministeriet, Teknisk Rapport 13-18, "2001 – 2010 Dansk Design Reference Year", datafilnavn: "Danmark_2013.DRY"
- [6]: Frederikshavn Kommunes matrikelkort (www.kort.frederikshavn.dk)
- [7]: SBI-anvisning 224, "Fugt i bygninger"
- [8]: P.O. Christensen og Bjarne G. Sørensen, Virksomhedsøkonomi nr. 3: Rentesregning, Udgivelsesår: 2001.
- [9]: SBI, Integreret edb-værktøj til analyse af bygningers energi og indeklimateforhold.

9. – Indhold i bilagsmappe

- Bilag 1. Beregning af U-værdier.
- Bilag 2. Skyggepåvirkninger af vinduer.
- Bilag 3. Met- og clo-værdier i henhold til DS 7730.
- Bilag 4. EMD's Skyggegraddøgn for Nordjylland.
- Bilag 5. Beregning af U-værdi for nyt terrændæk.
- Bilag 6. Datablad på belysningsarmaturer.
- Bilag 7. Energifriser fra forsyningsselskaber.
- Bilag 8. Økonomiberegning for terrændæk.
- Bilag 9. Økonomiberegning for ydervæg forslag A.
- Bilag 10. Økonomiberegning for ydervæg forslag B.
- Bilag 11. Økonomiberegning for belysning med LED-lyskilder.
- Bilag 12. Økonomiberegning for solcelleanlæg.
- Bilag 13. Økonomiberegning for varmepumpeanlæg.
- Bilag 14. Målinger af indeluftens CO₂-indhold m.m.