



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Aalborg Universitet

Forskelle i beregnet og målt energiforbrug i energirenoeringsprojekter

Rose, Jørgen; Ørtoft, Lars; Sommer, David; Holck, Jakob

Publication date:
2015

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Rose, J., Ørtoft, L., Sommer, D., & Holck, J. (2015). *Forskelle i beregnet og målt energiforbrug i energirenoeringsprojekter*. SBI forlag. SBI Bind 2015 Nr. 14

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

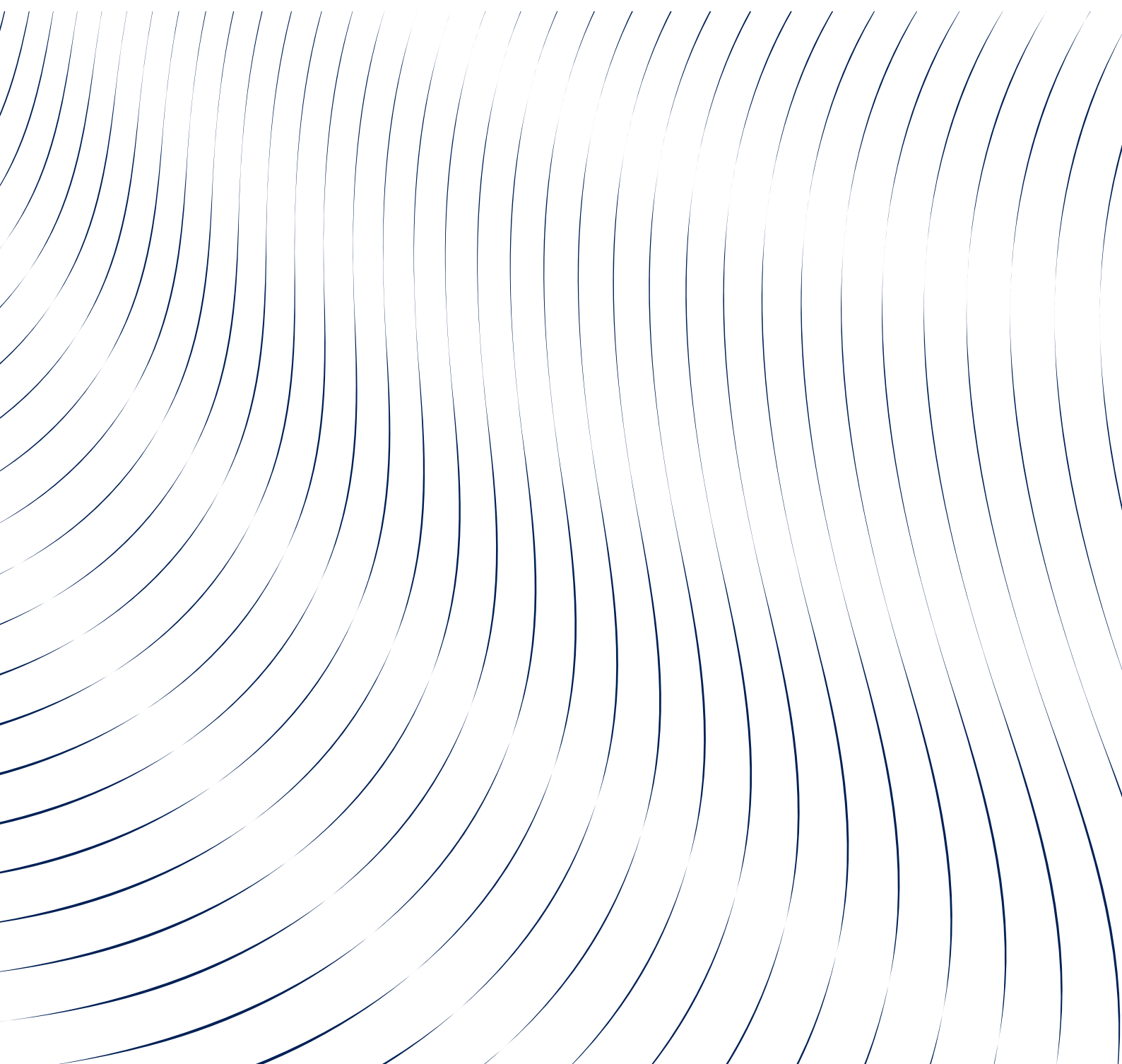
If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT
AALBORG UNIVERSITET KØBENHAVN

FORSKELLE I BEREGNET OG MÅLT ENERGIFORBRUG I ENERGIRENOVERINGSPROJEKTER

SBI 2015:14



Forskelle i beregnet og målt energiforbrug i energirenoveringsprojekter

Jørgen Rose
Lars Ørtoft
David Sommer
Jakob Holck

Titel	Forskelle i beregnet og målt energiforbrug i energirenovierungsprojekter
Serietitel	SBi 2015:14
Udgave	1. udgave
Udgivelsesår	2015
Forfattere	Jørgen Rose, Lars Ørtoft, David Sommer, Jakob Holck
Sprog	Dansk
Sidetæl	53
Litteratur-henvisninger	Side 50
Emneord	Energirenovierung, beregning af energiforbrug
ISBN	978-87-563-1682-8
Udgiver	Statens Byggeforskningsinstitut, A. C. Meyers Vænge 15, DK-2450 København SV E-post sbi@sbi.aau.dk www.sbi.dk

Der gøres opmærksom på, at denne publikation er omfattet af ophavsretsloven

Forord

Denne rapport er udarbejdet for Energistyrelsen.

Formålet med rapporten er, at analysere forskellige beregningsværktøjers resultater i forhold til realiserede energibesparelser i en reel case. Formålet er endvidere at belyse forskellige forudsætnings betydning for de realiserede energibesparelser.

Rapporten indledes med en sammenfatning af resultaterne. Herefter følger en kortfattet beskrivelse af formål og metode samt en gennemgang og analyse af de målinger som er foretaget for bygningen. Dernæst beskrives de gennemførte beregninger samt en følsomhedsanalyse for forskellige udvalgte inputparametre. Rapporten afsluttes med en sammenfatning af målinger, beregninger og analyser og en konklusion.

Projektet er udført af seniorforsker Jørgen Rose fra SBI samt direktør Lars Ørtoft, civilingeniør David Sommer og civilingeniør Jakob Holck fra Ørtoft A/S.

Arbejdet påbegyndtes primo november 2013.

Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet
Energi og miljø
Juni 2015

Søren Aggerholm
Forskningschef

Indholdsfortegnelse

Forord	3
Indholdsfortegnelse	4
Sammenfatning	5
Målt energiforbrug	5
Beregnet energiforbrug	6
Sammenligning af målt og beregnet energiforbrug	6
Følsomhedsanalyse	9
Konklusion.....	9
Brancheundersøgelse	9
Læringspunkter	10
Formål.....	11
Metode/baggrund	12
Beskrivelse af bygningen og historik	12
Målinger	16
Branchens brug af værktøjer	16
Beregningsmetoder.....	20
Målt energiforbrug	22
Varmeforbrug	22
Forbrug af varmt brugsvand.....	23
Elforbrug.....	24
Øvrige målinger på bygningen	25
Energisignatur	25
Beregnet energiforbrug.....	28
Beregningsforudsætninger.....	28
Indledende analyse.....	32
Be10 med standardforudsætninger	33
Be10 med tilpassede forudsætninger	34
PHPP med tilpassede forudsætninger.....	34
Følsomhedsanalyse for udvalgte parametre	36
Indetemperatur.....	36
Solafskærmningsfaktor	36
Internt varmetilskud.....	38
½ udnyttelse af solindfald og internt varmetilskud	39
Ventilationsrate (luftskifte).....	40
Infiltration.....	40
Kælder som opvarmet/uopvarmet rum	41
Varmekapacitet	42
Brugstid	42
Opsummering af resultater	44
Målt energiforbrug	44
Beregnet energiforbrug	44
Følsomhedsanalyse	47
Konklusion	49
Referencer	50
Bilag	51

Sammenfatning

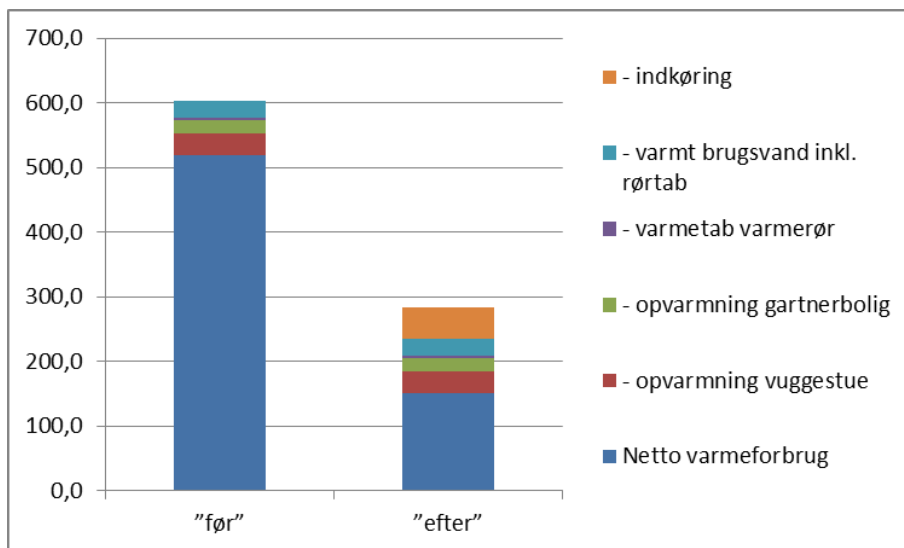
Der er gennemført målinger og beregninger af energiforbruget før og efter en omfattende energirenovering for kontorbygningen beliggende Vester Voldgade 123.

Målt energiforbrug

Det normaliserede (graddøgnkorrigerede) fjernvarmeforbrug til opvarmning og varmt brugsvand i bygningen er målt før og efter energirenoveringen til hhv. 602,7 MWh og 283,9 MWh pr. år.

Det har imidlertid vist sig, at bygningens varmecentral forsyner 2 andre bygninger på matriklen (børnehave og gartnerbolig) med varme og varmt brugsvand, og derfor er de målte fjernvarmeforbrug før og efter renoveringen korrigeret.

Efter energirenoveringen har der været en række forskellige indkøringsvanskeligheder i forbindelse med de installerede systemer (bl.a. har solvarmelageret ikke fungeret efter hensigten), og derfor er forbruget efter renoveringen højere end forventet. Der er foretaget en korrektion af det målte forbrug for at tage højde for dette forhold. I figur 1 er vist den samlede korrektion af det målte fjernvarmeforbrug før/efter energirenoveringen.



Figur 1. Korrektion af målt fjernvarmeforbrug, MWh.

Hermed er det endelige målte fjernvarmeforbrug til rumopvarmning før og efter energirenoveringen fastlagt som hhv. 519,3 MWh og 151,2 MWh.

Det samlede fjernvarmeforbrug til varmt brugsvand inklusive rørtab er vurderet til ca. 25,0 MWh både før og efter energirenoveringen. Denne vurdering er baseret på fjernvarmeforbruget i sommerperioden hvor bygningen ikke opvarmes.

Elforbruget i bygningen er også målt før og efter renoveringen. Det totale elforbrug før renoveringen er målt til 96,5 MWh pr. år og efter renoveringen 142,4 MWh pr. år. Stigningen i elforbruget skyldes bl.a. overgangen fra en-

keltmandskontorer til storrumskontorer, hvilket medfører at der er ca. 50 % flere personer i bygningen efter renoveringen.

Sammenfattende er der målt følgende korrigerede forbrug for bygningen:

MWh/år	Før renoveringen	Efter renoveringen	Besparelse
Målt forbrug			
Rumopvarmning	519,3	151,2	368,1
Varmt brugsvand	25,0	25,0	0,0
Elektricitet	96,5	142,4	-45,9

Beregnet energiforbrug

I projektet er der gennemført beregninger med en række forskellige metoder, herunder simple overslagsmæssige beregninger og beregninger hvor der anvendes standardparametre som input. Der er desuden lavet mere detaljerede beregninger, hvor inputparametrene så vidt muligt er kvalificeret i forhold til de faktiske forhold i bygningen. De anvendte beregningsmetoder er:

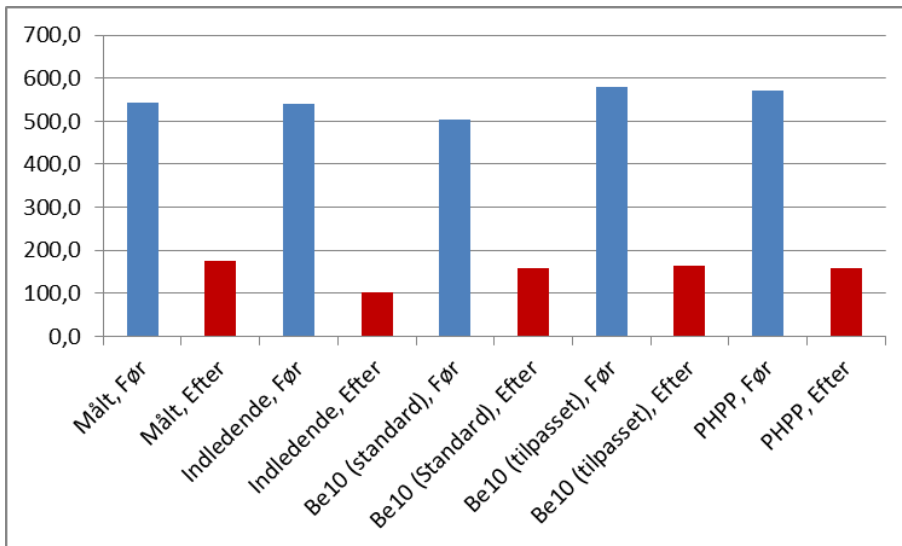
Indledende analyse:	Simpel beregning vha. f.eks. regneark eller lignende.
Be10 standard:	Be10 beregning hvor inputdata ikke kvalificeres, dvs. der anvendes standardværdier for f.eks. brugstid, indetemperatur, forbrug af varmt vand etc.
Be10 tilpasset:	Be10 beregning hvor inputdata er kvalificeret, således at der i videst muligt omfang benyttes faktiske værdier af f.eks. brugstid, indetemperatur, forbrug af varmt vand etc.
PHPP tilpasset:	PHPP beregning med samme inputparametre som i "Be10 tilpasset"

De beregnede energiforbrug for bygningen er sammenfattet herunder:

MWh/år	Før renoveringen	Efter renoveringen	Besparelse
Indledende analyse			
Rumopvarmning	519,3	81,9	437,4
Varmt brugsvand	21,5	21,5	0,0
Totalt elforbrug	-	-	-
Be10 med standardparametre			
Rumopvarmning	476,3	129,9	346,4
Varmt brugsvand	28,9	29,7	-0,8
Totalt elforbrug	163,0	164,6	-1,6
Be10 med tilpassede parametre			
Rumopvarmning	557,3	142,6	414,7
Varmt brugsvand	22,2	22,6	-0,4
Totalt elforbrug	97,5	141,5	-44,0
PHPP med tilpassede parametre			
Rumopvarmning	535,5	130,1	405,4
Varmt brugsvand	34,9	28,3	6,6
Totalt elforbrug	99,4	141,8	-42,4

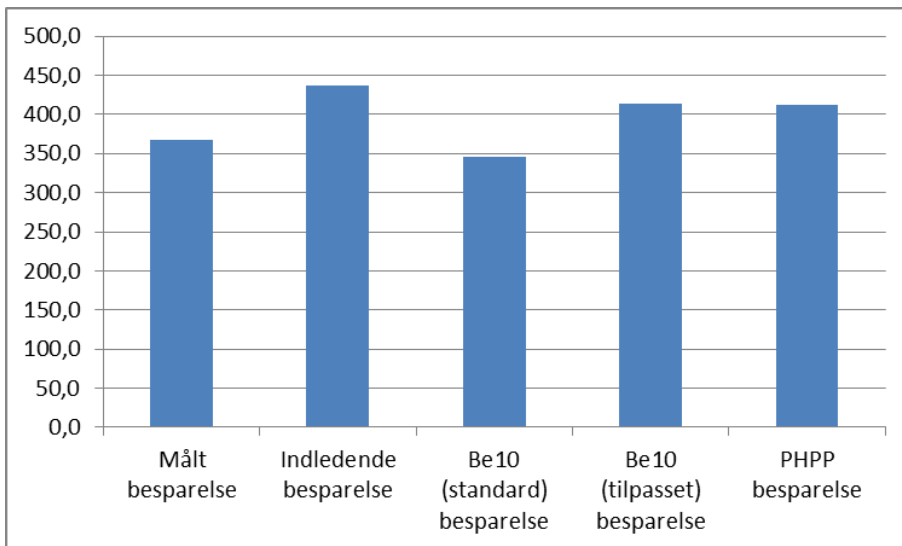
Sammenligning af målt og beregnet energiforbrug

I figur 2 er vist det beregnede og målte totale fjernvarmeforbrug før og efter energirenoveringen, svarende til summen af forbruget til rumopvarmning og varmt brugsvand.



Figur 2. Målt og beregnet fjernvarmeforbrug før og efter energirenovering i MWh.

Hvilket resulterer i energibesparelser som vist i figur 3.



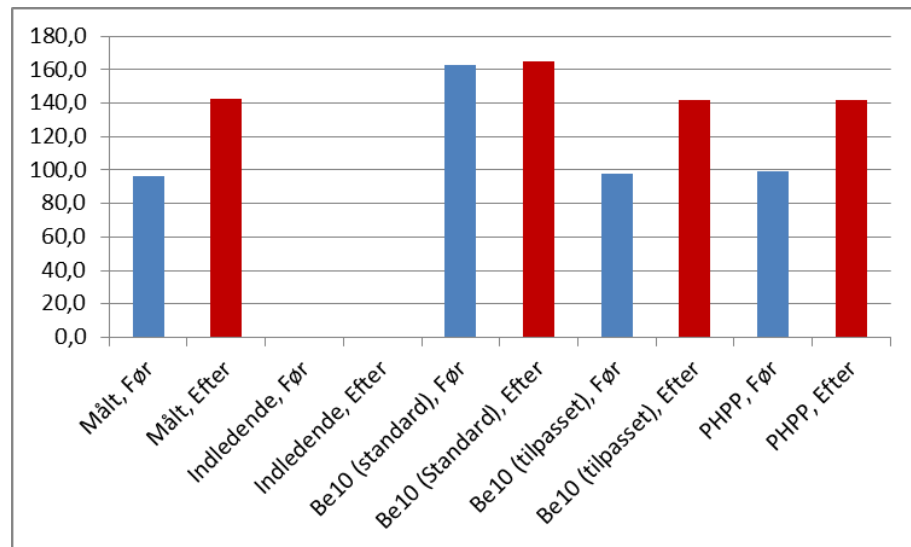
Figur 3. Målt og beregnet energibesparelse (fjernvarme) i MWh.

Hvis resultaterne i figur 2 betragtes, er det tydeligt at målingerne af fjernvarmeforbruget før og efter renoveringen, og dermed den opnåede energibesparelse i figur 3 stemmer rimeligt godt overens med de tilsvarende beregnede resultater.

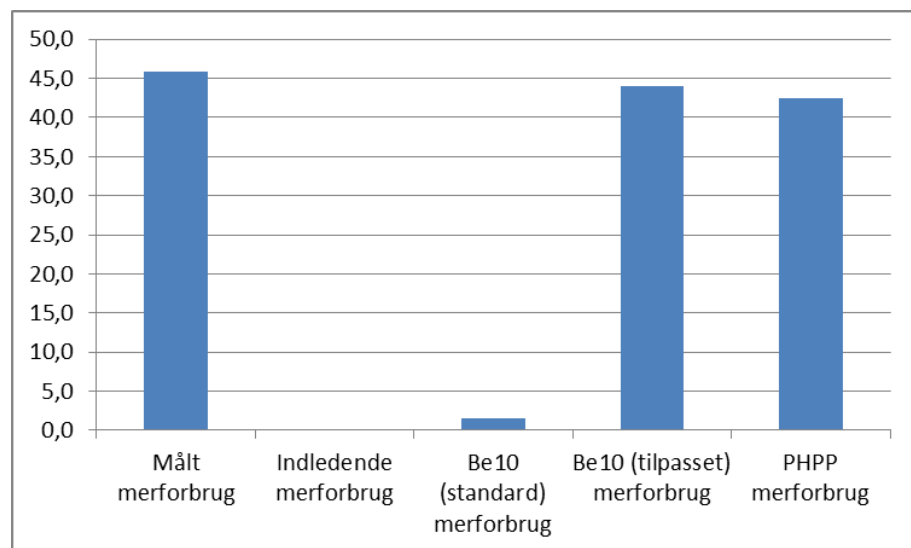
Beregningerne svarende til "Indledende analyse" og "Be10 med standardforudsætninger" giver naturligt resultater som vil afvige væsentligt fra målingerne – sidstnævnte fordi inputparametre til beregningerne ikke er tilpasset de faktiske forhold i bygningen (indetemperatur, internt varmetilskud osv.). Den beregnede energibesparelse for "Be10 med standardforudsætninger" er tilfældigvis tættest på den målte besparelse. Dette skyldes, at både før- og efterforbruget undervurderes i beregningen.

De to beregninger svarende til "Be10 med tilpassede parametre" og "PHPP med tilpassede parametre" giver rimeligt ens og retvisende resultater for fjernvarmeforbruget både før og efter energirenoveringen, men da forbruget før overvurderes med op til 6,5 % og forbruget efter undervurderes med op til 10 %, ender den beregnede energibesparelse med at blive ca. 12 % for høj.

Det totale elforbrug i bygningen er steget i forbindelse med energirenoeringen, og dette skyldes som nævnt primært at der efter renoveringen er ca. 50 % flere personer i bygningen. I figur 4 er vist det målte og beregnede totale elforbrug i bygningen før og efter energirenoeringen, og i figur 5 er vist de tilsvarende merforbrug. Bemærk at der ikke er lavet beregning af elforbrug i den indledende analyse.



Figur 4. Målt og beregnet totalt elforbrug før og efter energirenoering i MWh.



Figur 5. Målt og beregnet merforbrug (total el) i MWh.

Figur 4 viser, at "Be10 med standardforudsætninger" giver resultater som afviger væsentligt fra de målte data, specielt hvad angår forbruget før energirenoeringen. Dette skyldes bl.a. at elforbruget til udstyr (computere mv.), er fastsat til standardværdien for kontorbyggeri på 6 W/m^2 både før og efter renoveringen. Herved overvurderes forbruget kraftigt.

For de to beregninger med tilpassede parametre er de beregnede elforbrug både før og efter energirenoeringen rimeligt ens og stemmer godt overens med de tilsvarende målte værdier. Dette skyldes, at der i begge sæt af beregningsmodeller er indtastet elforbrug til udstyr, således at der netop bliver god overensstemmelse mellem beregnet og målt elforbrug. I situationen før energirenoeringen overvurderes elforbruget med op til 3 %, mens det undervurderes med ca. 0,5 % efter renoveringen. Merforbruget til el, vist i figur 5, undervurderes samlet set med op til 8 %.

Følsomhedsanalyse

Der er gennemført en følsomhedsanalyse for en lang række af de inputparametre der bruges i beregningsmodellerne. Følsomhedsanalysen viser, at det primært er variationer i hhv. indetemperaturen og størrelsen af det interne varmetilskud der har væsentlig indflydelse på bygningens samlede energiforbrug.

I modellerne er der regnet med en indetemperatur på 22 °C. For hver grad indetemperaturen stiger hhv. falder i bygningen, så stiger hhv. falder rumopvarmningsbehovet med 12 – 14 %.

I modellerne er der regnet med, at der gennemsnitligt er 150 personer til stede i bygningen i brugstiden. Hvis det gennemsnitlige antal personer kun er 100, så øges varmebehovet med ca. 8 % mens det totale elbehov reduceres med ca. 10 %. Omvendt, hvis der er 200 personer, så reduceres varmebehovet med ca. 8 % mens det totale elbehov stiger med ca. 10 %.

Mindre afvigelser mellem den faktiske indetemperatur og de 22 °C der er anvendt i beregningerne, eller afvigelser i det faktiske antal personer i bygningen og de 150 der er antaget i beregningerne, vil altså kunne forklare de små afvigelser der er mellem de målte og beregnede energiforbrug.

Konklusion

Sammenligninger af målt og beregnet energiforbrug viser, at der specielt med de beregningsmodeller hvor der benyttes tilpassede parametre opnås god overensstemmelse med de tilsvarende målte energiforbrug.

Sammenfattende kan det derfor konkluderes, at man gennem en detaljeret og omhyggelig kvalificering af inputdata til programmer som f.eks. Be10 og PHPP, kan gennemføre beregninger af energiforbrug før og efter en energirenovering, og dermed fastlægge en forventet energibesparelse rimeligt nøjagtigt. Det er i denne sammenhæng særdeles vigtigt at kende detaljerne vedrørende bygningen både før og efter energirenoveringen, således at samtlige inddata til modellerne kvalificeres mest muligt.

Det er vigtigt at pointere, at der forelå målinger af elforbruget før renoveringen. Disse målinger lå til grund for en stor del af indretningen af modellernes forbrug. Da især elforbruget til belysning og apparatur i ældre bygninger kan variere væsentligt, på baggrund af selve apparaturet, men i høj grad også på baggrund af brugsmønstret, ligger der en del arbejde i at tilpasse før modellen, så den stemmer overens med virkeligheden.

Be10 og PHPP kan dermed begge anvendes til fastlæggelse af energiforbruget i en bygning før og efter en energirenovering, men i forhold til garantistillelse, vil det ligeledes være en fordel at gennemføre en følsomhedsanalyse med modellerne. Herved kan der eventuelt fastlægges et interval for den forventede besparelse, som samtidig afspejler usikkerheden/kvaliteten på de anvendte inddata. I denne forbindelse er det primært indetemperaturen og det interne varmetilskud (bl.a. belysningen) der bør fokuseres på.

Brancheundersøgelse

En brancheundersøgelse viste, at hoveddelen af rådgiverene anvender energirammeberegninger (dvs. Be10) i større eller mindre grad til at estimere

forventede energibesparelser i forbindelse med energirenoveringer. Der er rimelig enighed i branchen om, at beregningerne som udgangspunkt danner et løst estimat og først giver et realistisk billede efter yderligere tilpasning af de anvendte inddata.

Der er ligeledes enighed i branchen om, at programmer som f.eks. Be10 og PHPP ikke bør anvendes til fastlæggelse af de indeklimamæssige parametre, da dette kræver mere detaljerede og dynamiske beregninger.

Læringspunkter

Projektet beskrevet i nærværende rapport, har affødt en række "læringspunkter" i forhold til hvordan man kan/bør gennemføre tilsvarende projekter i fremtiden. Rådgiver har i forbindelse med projektet sammenfattet følgende liste over læringspunkter:

Generelle Læringspunkter

- Det er vigtigt, at der er klarhed over energiforbruget før renovering (baseline) og at før-modellen kalibreres i forhold til dette.
- Da de interne belastninger, især ved lavenergiprojekter, har enorm indflydelse på det samlede forbrug, men også på den driftsmæssige funktionalitet af bygningen, er det nødvendigt at disse bliver præciseret i samarbejde med den fremtidige bruger. Ved udlejningsformål, kan det være nødvendigt at pålægge forbehold mht. persontætheden og mængden af apparatur.
- Det er vigtigt, at der, i forbindelse med projekteringen, ved særlig teknisk komplicerede anlæg, eller nye løsninger, er taget stilling til, hvordan disse anlæg skal afleveres til drift, samt hvordan de kan styres og overvåges. Det skal overvejes at lægge en fejlfri test periode ind i udbuddet, og eller udbyde første års drift til entreprenøren.
- Rådgiveren og eller entreprenør bør have haft adgang til CTS-anlæg tidligt efter afleveringen, for at kunne følge driften og bidrage med indkøring og fejlretning.
- Det kan være en fordel, at der ved udbud tages stilling til hvilke krav, der stilles til en fejlfri aflevering, samt sikre at der er tilstrækkelig krav til, og opfølgning på, særlig komplicerede anlæg. Her er det også vigtigt at vurdere hvilke installationer, der kan være nødvendige at kunne overvåge.
- I lavenergiprojekter udgør belysningen en stor del af det samlede elforbrug, og derfor er det vigtigt at overveje hvordan forbruget fastlægges. Be10 og PHPP bruger forskellige metoder til at estimere energiforbruget til belysning. Be10 bruger et eksternt estimeret dagslysniveau i zonen, og PHPP estimerer dagslysniveauet ud fra vinduesparametrene. Derfor kan energiforbruget til belysning ikke direkte sammenlignes.

Formål

Formålet med rapporten er, at analysere forskellige beregningsværktøjers resultater i forhold til realiserede energibesparelser i en reel case. De anvendte beregningsværktøjer skal afspejle hvad der typisk anvendes i branchen i forbindelse med fastlæggelse af forventede energibesparelser i energirenoveringsprojekter. Følgende beregningsværktøjer er benyttet:

- Indledende analyse (f.eks. målinger, regneark mv.)
- Be10 med standardforudsætninger
- Be10 med tilpassede forudsætninger
- PHPP med tilpassede forudsætninger

Oprindeligt var det tanken at gennemføre beregninger med simuleringssprogrammet IES-VE (Integrated Environmental Solutions Limited, 2012), for at medtage et eksempel på et program som anvender detaljeret dynamisk simulering. Desværre var det ikke muligt, at få lavet en tilstrækkeligt detaljeret model med tilpassede inputparametre i programmet til at resultaterne kunne anvendes i sammenligningerne.

På baggrund af sammenligninger mellem beregnet og målt energiforbrug skal det belyses hvorfor der ofte er forskelle mellem beregnede og realiserede energibesparelser i energirenoveringsprojekter.

Der gennemføres derudover en følsomhedsanalyse for en række udvalgte parametre for at belyse forskellige forudsætnings betydning for de realiserede energibesparelser. Parametrene er:

1. Indetemperatur
2. Solafskærmningsfaktor
3. Internt varmetilskud
4. Ventilationsrate (luftskifte)
5. Infiltration
6. Halv udnyttelse af varmetilskud
7. Kælder som opvarmet/uopvarmet rum
8. Varmekapacitet
9. Brugstid

Rapportens samlede analyser sammenfattes til en beskrivelse af hvordan man gennemfører realistiske beregninger af energibesparelser i forbindelse med større energirenoveringsopgaver.

Metode/baggrund

I det følgende beskrives kort metoder og baggrund for analysen. Først gives en detaljeret beskrivelse af bygningen samt den energirenovering der er gennemført. Herefter beskrives kort de målinger der foretages i bygningen, som benyttes til sammenligning med beregningerne samt de beregningsmetoder der anvendes i analyserne senere i rapporten.

Beskrivelse af bygningen og historik

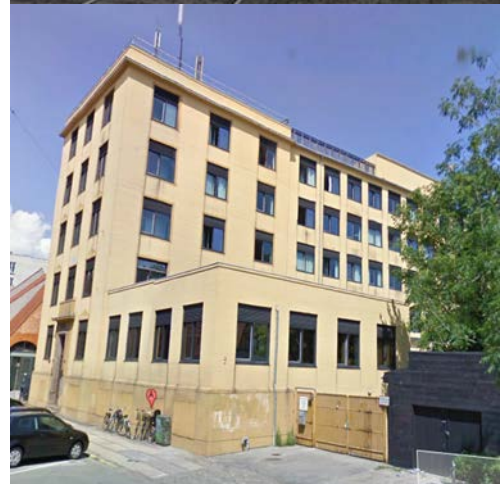
Den nyligt renoverede bygning beliggende på Vester Voldgade 123 blev opført i 1938 og anvendt som postterminal under navnet "Postgirohuset".

Bygningen blev opført som en af de første og største in-situ støbte betonbygninger. Bygningen er opført på gammel havbund og dermed opfyldt, og er således pælefunderet på betonpæle til ca. kote -7,5 m. Gulvet i kælderen er hårdt armeret betondæk spændende mellem pæle, der udgør kuldebroer til de underliggende koldere dybere jordlag. Under betondækket er der konstateret typisk luftlag på ca. 2-5 cm, der skyldes sætninger i den opfyldte jord.

Kort efter opførelsen blev bygningen stærkt kritiseret af lokalsamfundet da bygningen syntes at være malplaceret i forhold til omgivelserne. Geografisk er bygningen placeret midt i København. Fra Nordvest-facaden er der udsigt til rådhuset. Fra Sydøst-facaden er der udsigt til Københavns indre bådhavn og Christianshavn.

Bygningen blev opført med bærende plade-/bjælkesystem hvilket betød frie indretningsmuligheder af de indvendige arealer. Efter postterminalens flytning til anden adresse blev bygningen ombygget og indrettet som kontorbygning.

Bygningen er desuden dimensioneret som industribygning, hvilket medfører relativt tykke betondæk og dermed relativt stor termisk masse.



Udført af TNT Arkitekter A/S

Facader var oprindeligt opbygget af 150 mm armeret in-situ støbt beton isoleret med 40 mm træbeton afsluttet inderst med 10 mm puds.

Ejendommen er i dag ejet af Bygningsstyrelsen og var forinden anvendt af Undervisningsministeriet. I dag anvendes bygningen delvist af en undergruppe fra undervisningsministeriet UNI C og Ministeriet for IT og læring. Herudover anvendes haven mod havnen (sydøst) samt dele af stueetagen og kælderen af Ministeriernes børnehave.

Det oprindelige projekt bestod i udskiftning af vinduer samt udskiftning af tærende brugsvandsinstallationer i bygningen. Der blev imidlertid gennemført beregninger af rentabiliteten i tillægsinvesteringen ved alternativt at udføre en mere dybtgående energirenovering. Den dybtgående energirenovering bestod af følgende delelementer:

1. Kraftig udvendig isolering af facaden inkl. frigravning af kældervægge til underkant kantbjælker under gulve samt udførelse af yderligere skrå randisolering ved underkanten
2. Bortisolere kuldebroer ved tagstern, trapper og reducere øvrige eksisterende kuldebroer
3. Udførelse af generel lufttætning af bygningen samt efterfølgende test af tæthed ved blowerdoor (krav $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$) iht. Passivhus certificering.
4. Opsamling af regnvand til brug for toiletskyl fra ca. 1200 m² tag og udskiftning til 2-skyls toiletter og i alt 5 vandfrie toiletter
5. Etablering af helt nye vandrør inkl. teknisk isolering til skrappeste isoleringskrav opdelt på 3 rørføringer for brugsvand og 1 rørføring for genbrugt regnvand
6. Etablering af automatisk udvendig solafskærmning med faldarmsmarkiser/screens med mulighed for manuel overstyring på facader mod sydøst og sydvest. Solafskærmning er udeladt mod nordvest. Mod nordøst er der ikke vinduer
7. Etablering af komplet ny LED-belysning i gange og på kontorer. På kontorer styres belysningen efter behov vha. følere for PIR (bevægelsessensorer) og dagslys
8. Etablering af nyt CAV ventilationsanlæg VE01 for kontorer for luftskifte ca. 1,5 h⁻¹ i kontortiden
9. Etablering af nyt VAV ventilationsanlæg VE02 for intensive møderum for variable luftskifte ca. 0 – 5 h⁻¹ i kontortiden styret efter behov ud fra temperatur- og CO₂-sensorer
10. Etablering af "gratis" forvarmning og køling af ventilationsluft til VE01 ved anvendelse af vandrette jordslanger og 2 brønde med skrå dybe borer til ca. 21 meters dybde (toppen af kalklaget). Grundvandet er ca. 3,5 m under terræn. Virkningsgrad COP ca. 50
11. Etablering af solvarmeanlæg på ca. 35 m² forbundet til lagertank for solvarmelagring under bygningen. Formålet er at reducere varmetabet via dårligt isoleret kældergulv inkl. kuldebroer via randfundamenter og betonsøjler.

Allerede under registreringen af bygningen blev det konkluderet at de omtalte tiltag var energirigtige og rentable uden medregning af fremtidige omfattende betonreparation af facaden.

Ad 1 – 3. Rentabiliteten på baggrund af tilbagebetalingstiden for investeringen til efterisolering af vægkonstruktionerne, inklusiv udskiftning af vinduer og tætning af klimaskærmen, er udregnet til 6 år. For investeringen til tagsystemet er tilbagebetalingstiden udregnet til 22 år.

Ad 4. Tiltaget vedrørende genbrug af regnvand var ikke rentabelt på trods af tilskud fra HOFOR. Tiltaget blev fastholdt af helhedsmæssige årsager og pga. bæredygtigheden herunder reduceret afledning af regnvand og dermed risiko for oversvømmelser.

Ad 5. Installationer var teknisk nedslidt og skulle udskiftes

Ad 6. Grundet reducere af bygningens varmetab var det nødvendigt at reducere solbelastningen for at forbedre indeklimaet.

Ad 7. For investeringen til belysningsystemet er tilbagebetalingstiden udregnet til 10 år. Oprindeligt blev belysningsarmaturer i kontorer genanvendt, men forsynet med styring efter dagslys og PIR. I forbindelse med efterfølgende lejeindretning til UNI-C, og faldende priser på LED armaturer, blev armaturerne i denne fase udskiftet til LED. Lyset i gange var oprindeligt forudsat udskiftet til LED.

Ad 8. etablering af mekanisk ventilation, blev udført for at forbedre indeklimaet. Herudover er det nødvendigt for at opnå det lave energiforbrug.

Ad 9. i forbindelse med indretningen til UNI-C blev der indrettet intensive møderum mod vest, som krævede variabel luftmængde (VAV). Der er blevet etableret særskilt anlæg hertil. Samtidig hermed blev luftmængden til kontor anlægget fastholdt, men skulle herefter kun betjene 80 % af arealet (det resterende kontorareal eks. møderum). Herved blev luftskiftet for kontorer øget med ca. 20 %, hvilket i nogen træk kompenserede for en øget personbelastning på ca. 50 %.

Ad 10. for at opnå det lave energiforbrug viste vores beregninger, at vi skulle anvende forvarmning af ventilationsluft. Ventilationsanlægget i kontorer er derfor ikke forsynet med varmefflade. En indeklimasimulering i BSim baseret på den oprindelige varmebelastning i undervisningsministeriet viste, at der var behov for køling. Denne køling er tilvejebragt via de udførte jordbrønde.

Ad 11. der er ikke regnet særskilt rentabilitet på dette punkt. Løsningen er udført for at bringe den renoveret bygning ned på Passivhus-kravet, uden at skulle bruge enorme omkostninger på at opbryde kældergulvet. Gulvet er udført som hårdt armeret in Sito støbt betongulv som spænder mellem funderingspælene.

Tilbagebetalingstiderne er udregnet på baggrund af nutidsværdimetoden.

Rentabiliteten af renoveringen er baseret på besparelser inden for både bygningens varmeforbrug, elforbrug og vandforbrug. Desuden er der en direkte besparelse i en reduktion af den faste vandafledningsafgift. Da bygningens samlede elforbrug er steget grundet et væsentligt højere forbrug til internt apparatur, er dette ikke en direkte mærkbar besparelse. Beregningerne viser dog en besparelse i bygningens elforbrug til drift, som er medregnet i rentabiliteten.



Renoveringen startede i 2011 og blev afsluttet januar 2013. Da ambitionen med renoveringen var at reducere energibehovet kraftigt, blev tiltagene fysisk udført i overensstemmelse med ønsket om at opnå passivhus niveau.

Den væsentlige forøgelse af isoleringstykkelsen for klimaskærmen samt nøje planlagt installation af vinduer reducerede linjetabet omkring samlingerne til negligeable størrelser.

Foruden disse passive løsninger blev der også installeret aktive løsninger såsom nyt mekanisk ventilationsanlæg med varmegenvinding, regnvandsopsamling fra taget, forvarmning og nedkøling af ventilationsluft via jordbrønde, solfangerpaneler med lagring af solvarmen under bygningen. Herudover automatisk solafskærmning i form af udvendige screens og anvendelse af LED-belysning med automatisk dæmpning samt PIR detektering.

Tabel 1. Opsummering af oplysninger.

Ejer:	Byggeår:	Beliggenhed:
Bygningsstyrelsen	1938	Vester Voldgade 123, 1552 København V
Ingeniør:	Areal:	Energiklasse:
Lars Ørtoft Rådgivende Ingeniørfirma A/S, Jesper Strunge Jensen Rådgivende Ingeniørfirma A/S	Kælder: 1274 m ² Stue – 4. sal: 5460 m ² Rumhøjde: 2,85 m	Før: F Efter: A1
Arkitekt:	Omkostning:	Brugere:
tnt Arkitekter A/S	Planlagt renovering (opretning): 12 mio. Energirenovring: 10 mio. Total: 23 mio.	Ministeriernes Børnehushus og UNI-C.
Entreprenør:		
G.V.L. Entreprise A/S		

Målinger

I bygningen er der foretaget målinger af varmekonsumet, brugsvand (samlet forbrug af varmt og koldt vand) samt totalt elforbrug.

Udover hovedmålere for hhv. fjernvarme, brugsvand og el har bygherren installeret en række bimålere til brug for udarbejdelse af driftsregnskaber for tidligere og nuværende lejere:

Bimålere for varme med oprindelig navngivning:

Hovedmåler: Burde måle det samme som HOFORs fjernvarmemåler bortset fra ca. 0,5-1,5 % varmetab fra rør.

Børnehaven: Dækker over separat bygning for vuggestue i terræn, formodentlig tidligere gartner bolig, rør i jord til begge samt formodentlig også varmerør til børnehaven i stueplan, idet disse formodes afskilt fra den øvrige kontorejendom.

Ventilation: Dækker varmebehov i varmeplade i ventilationsanlæg for børnehaven.

Elforbrug:

Hovedmåler: NB: Kan ikke være ejendommens totale forbrug, da forbrug er for lavt

Fælles: Uklart hvad denne måler

Børnehaven: Børnehavenes forbrug. Uklart om det er summen af Børnehaven i VVG 123 og vuggestue og dermed bygning i terræn.

Rektorkollegie: Tidligere forbrug i kollegiebolig. Forbruget er 0 og boligen er oplyst nedlagt for mange år siden.

Vandmåler:

Hovedvandmåler: Måler ejendommens hovedforbrug, som består af brugsvand til opfyldning af regnvandstanken i perioder uden regn samt bygningens almindelige forbrug af brugsvand.

Bimåler: Regnvandstank. Måler genbrugt regnvand fra regnvandstank anvendt til toiletskyl af hensyn til afregning overfor HOFOR for betaling af 50 % vandafledningsafgift herfor mod normalt 100 %, som bonus pga. forsinket afledning.

Branchens brug af værktøjer

I forbindelse med at finde egnede EDB programmer til at beregne energibesparelser ved energirenoveringer til brug for bl.a. garantimodeller, ESCO mv. har Ørtoft A/S indhentet udtalelser fra betydende repræsentative aktører indenfor undervisning og rådgivende ingeniører i Danmark på baggrund af følgende spørgsmål:

"Jeg sidder i et projekt med Energistyrelsen, Bygningsstyrelsen og SBI hvor vi ønsker at vurdere og kalibrere Be10 til beregning af energibesparelser til brug for eks. garantimodeller, ESCO sager mv. Herved kunne rådgiver og bygherre mv. opnå at Be10 var blandt de "godkendte" programmer til beregning af energiforbrug og dermed også energibesparelser ved renovering.

For at sikre at vi bruger vores tid rigtigt optil nytår er jeg blevet bedt om at spørge de store aktører, herunder firma X om følgende:

1. Bruger i Be10 til energivurderinger?
2. Hvilke værktøjer bruger i alternativt (egne udviklede regneark, IES)?
3. Ville i bruge Be10 mere konsekvent hvis det var kalibreret til at give mere rigtige resultater?"

Større rådgivere:

Cowi A/S, Lyngby ved Peter Weitzmann:

Helt generelt er vi i COWI nok i den situation at vi bruger Be10 til energivurderinger af nød mere end af lyst. Det skyldes flere ting:

1. Vi skal jo alligevel lave energirammen – og bliver målt på netop denne. Der er derfor et naturligt stort fokus her.
2. der er typisk ikke fokus fra bygherre på det samlede ("rigtige") energibehov. Der ligger dog oftest en stor pædagogisk udfordring i at fortælle, at energirammen ikke repræsenterer virkeligheden særligt godt især i komplekse byggerier.
3. Der findes generelt ikke nogle gode (simple) værktøjer til at bestemme det samlede energibehov. Typisk har vi brug for en god overslagsvurdering af energibehovet i en tidlig fase. Her tænker vi på at benytte f.eks. Ecotect/Vasari, men er ikke kommet rigtigt i gang med det. Når så hele byggeriet er ved at være færdigdesignet, er fokus på indeklima og ikke på energibehov. Så når vi faktisk får opbygget gode simuleringmodeller i BSim eller IES-VE, bliver de ikke brugt til at trække energiforbrug ud, udelukkende til indeklima. Og så er der som sagt hverken tid i projektet eller fokus fra bygherre.
4. Erfaringsmæssigt kan vi bruge Be10 + "professionel vurdering" til en ret god samlet indsigt i bygningen på et tidligt tidspunkt i projekteringen. Det gøres f.eks. ved at lave parametervariationer med mere realistiske input end dem som vi skal bruge som standard i Be10.
5. Vi benytter ofte systemer der ikke kan rummes i energirammeberegningen, som f.eks. kombineret varmepumpe/kølemaskinedrift. Dette er vi nødvendigvis nødt til at lægge oveni beregningen via regneark baseret på egne beregningsmodeller.

Dermed tror jeg, at jeg er klar til at besvare spørgsmålene nedenfor:

1. Ja, men modvilligt. Det bliver dog brugt sammen med "Professionelle vurderinger" lagt oveni.
2. Vi bruger som udgangspunkt Be10 med yderligere input i et regneark for at tage højde for alt det øvrige forbrug, der er i bygningen. Det er f.eks. servere, procesudstyr m.m. Noget af dette vil naturligt ændre på bygningens energibehov til driften, mens andet ikke gør.
3. Formentlig. Men det kommer lidt an på hvordan denne kalibrering foretages. En relativt simpel måde at gøre det på ville også være, at Anvisning 213 blev opdateret til at have nogle lidt mere realistiske standardværdier. F.eks. angives en standardværdi for belysningsanlæg standby-forbrug på 2 W/m², hvor et mere realistisk bud nok er 0,25-0,5 W/m². Herudover er selvfølgelig indetemperaturen på 20 °C også langt fra virkeligheden. Mit bud på hvordan man kunne gøre Be10 mere anvendeligt er, hvis der blev indført en form for parametervariationsberegning (følsomhedsanalyse) i baggrunden, så Be10 i stedet for én værdi for energiforbruget blev givet som en middelværdi plus en variation.

Niras, Allerød ved Peter Noyé:

1. Bruger i BE10 til energivurderinger?

Ja vi kan blandt andet anvende tilrettede Be10 modeller til vurdering af energibesparelser ved renovering. Vi kalibrerer som regel modellen i forhold til mest betydende parametre for den enkelte bygning f.eks.

- Justerede setpunkter
- Justeret tæthed i forhold til målt eller forventet
- Justeret varmtvandsbehov
- Kvalificering af inputdata for ventilation ved at basere Be10 input på output fra dynamiske modeller ex. middelluftmængde over hhv. opvarmning og kølesæson. Hertil foretager vi på komplicerede bygninger vurdering af middel SEL værdi baseret på varighed for ventilationsdrift ligeledes fundet fra dynamisk modellering

2. Hvilke værktøjer bruger i alternativt (egne udviklede regneark, IES)?

Udover BSim til kvalificering af Be10 anvender vi typisk IES til dynamisk modellering af hele bygninger også hvad angår energiforbrug. Ex. iht. gældende ASHRAE standard. Enkelte gange har vi tillige benyttet ESP-r – IES forgænger i Linux version og med mulighed for større detaljeringsgrad, og netop en række regneark og håndberegninger baseret på månedsmiddelestimer, GD m.fl.

3. Ville i bruge Be10 mere konsekvent hvis det var kalibreret til at give mere rigtige resultater?

Ja – særligt savnes mulighed for helt at omgå den termiske knude i BE10 for så vidt angår overtemperatur og inddatere detaljer omkring ventilation og drift af solafskærmning manuelt

Rambøll Danmark A/S, Ørestaden ved Nikolaj Haaning:

Svarene på dine spørgsmål er desværre ikke entydige, mest af alt fordi optimeringsopgaverne ofte er mange artede.

Vi bruger generelt ikke Be10 til energioptimering, men primært til eftervisning af overholdelse af energirammer og i den forbindelse til indledende optimering af et byggeri eller en renovering.

For mere detaljeret optimering anvender vi typisk software som IES kombineret med Excel til beskrivelse af specifikke processer som ikke kan modelleres tilstrækkeligt i IES.

Umiddelbart tror jeg ikke at Be10 i en kalibreret form er vejen frem, mest af alt fordi jeg ikke kan se at Be10 kan udføres med en detaljering i det omfang som kræves uden at selve grundideen med Be10 går tabt. Det er i øvrigt vores erfaring, at Be10 er rigtigt godt til de inddelende optimeringer hvor der laves relative sammenligninger mellem forskellige løsningsmuligheder.

Mindre rådgivere:

Ørtoft A/S, Lyngby ved Lars Ørtoft:

Er man rimelig grundig med inddata bør et simpelt program med forenklede vejrdata kunne beregne års energiforbrug samt give advarsel om evt. overtemperaturer. I den forbindelse er det nødvendigt, at der, med rimelig nøjagtighed, tages hensyn til varmebelastning per m², varme-og ventilationstab, varmeakkumulering mv. så der kan bestemmes hvorvidt der er behov for eventuelle nærmere analyser.

PHPP kan anvendes eller Be10, hvis visse dele af programmet forbedres. Vi anvender egne Excel regneark, men så gerne der var en "branche-standard" i Excel så rådgiveren kunne bruge disse i ESCO og garantisager, så firma-

ets egenkapital ikke ryger ved første erstatningssag. Dette synspunkt deles også af de store rådgivere, der ikke tør ESCO af samme årsag.

IES er et dyrt program som mindre firmaer og energikonsulenter næppe investerer i grundet store forskelle i software omkostninger per medarbejder i store og mindre virksomheder, ligesom inddatamængden vurderes som for omfattende til de ofte lave honorarer.

Det bør derfor ved udbud åbnes op for metodefrihed blandt en del prægokendte programmer. Ved lavenergibyggeri er analyser af indeklimaet om sommeren ekstra vigtige, da risiko for overhedning er forøget ved forkert design.

DTU og Phd studerende:

BYG.DTU, Lyngby ved Professor Svend Svendsen:

Det vigtigste er at Be10 benyttes for hvert rum eller klimazone så man ikke midler solindfald over hele bygningen.

Da man jo normalt skal have indeklimaforhold med og normalt også skal styre solafskærmning og udluftning så indeklimaet sikres er der nok brug for en beregningsmodel/-program som kan regne rimelig rigtigt på indeklima og det kan kun ske ved timesimuleringer.

Derfor synes jeg man skal overveje at benytte en model som angivet i EN 13790 som timesimulering baseret på simple input. Derved bliver inddata opgaven ikke større end ved brug af Be10 men resultaterne meget mere brugbare mht. indeklimastyring. I forhold til kontrol af forventet og målt energiforbrug til optimering af driften vil det også være godt med en timemodel. Vi har jo lavet en version af 13970 timemodellen i WinDesign, men der nok brug for en videreudvikling så mere klimaanlæg medtages

Erhvervs Phd Alectia A/S, Virum ved Morten Vammen Vendelboe:

Jeg bruger programmet ofte (IES) og har tidligere undervist i anvendelse af det på et af BYGs kurser på DTU, så jeg kender det efterhånden ret godt. Normalt bruger vi dog kun programmet til vurdering af indeklimamæssige forhold og ikke til vurdering af energiforbrug, så det har jeg kun meget begrænset erfaring med.

I forbindelse med det kursus jeg underviste på brugte de studerende programmet til at regne på energiforbruget, men jeg har ikke brugt nok tid på HVAC-modulets mange indstillinger til at kunne gennemskue hvordan/hvor godt det virker til beregning af energiforbrug. Her tænker jeg især på indstillinger for kedler, varmepumper, køleanlæg, tab fra rør og kanaler mv.

Hvis man derimod "kun" vil benytte programmet til at beregning f.eks. varmebehovet i en lejlighed/et hus eller lignende, og selv vil estimere på rørtab, virkningsgrad for kedler etc. kan programmet fint benyttes.

I relativt simpelt byggeri vil jeg umiddelbart tro at man i mange tilfælde kan komme langt ved anvendelse af Be10. Jeg har godt hørt om eksempler på at estimerer har ramt en del ved siden af, men uden nærmere kendskab til disse sager, vil jeg tro at man kan eliminere de værste afvigelse ved at sætte sætninger for opvarmning, køling og driftstider mv. korrekt og at zoneopdele sin bygning så man ikke laver én samlet beregning for en hel bygning, men f.eks. beregner sydvendte og nordvendte kontorer i hver sin beregning.

Når man tit rammer en del ved siden af er det min fornemmelse af årsagen også ofte skal findes i varierende brugeradfærd, som jo generelt er meget svær at regne på. Jeg mener f.eks. at have læst om eksempler på at man i

helt ens boliger har målt variationer i energiforbruget på op til en faktor 4. Hvis man f.eks. ikke ved hvor meget folk luffer ud, eller hvor tit de går i bad, hvad de sætter termostaten på, hvor længe ventilationsanlægget reelt kører etc. kan det være lige meget hvor godt et beregningsprogram man anvender til at estimere energiforbruget.

Uden at have meget erfaring med området, vil jeg derfor tro at man bør kalibrere sin beregning så man omtrent rammer eksisterende forhold inden man begynder at beregne på besparelsetiltag, hvis det skal være rigtigt fint. I øvrigt synes jeg i skal overveje om anvendelse af programmer som IESVE ikke kræver et alt for stort timeforbrug til at der reelt er nogen bygherrer, der vil betale for det. Som nævnt er det ikke noget vores kunder normalt efterspørger, og jeg tvivler på at der er ret mange af dem der vil være villige til at betale for en fuld-bygnings-modellering i IESVE.

Beregningsmetoder

I forbindelse med beregning af bygningens energiforbrug, anvendes en række forskellige metoder som afspejler hvad branchen typisk anvender når der foretages beregning af forventede energibesparelser i energirenoveringsprojekter. I det følgende gives en kortfattet beskrivelse af de enkelte metoder.

Indledende analyse

I forbindelse med energirenoveringsprojekter laves typisk en indledende analyse, hvor der ved hjælp af simple metoder (f.eks. håndberegninger) laves overslagsberegninger på forventede energibesparelser for relevante tiltag. Metoderne anvendes typisk også i de meget tidlige faser af projekter for at rangordne forskellige tiltag i forhold til omkostninger og besparelser, f.eks. i forbindelse med at fastlægge hvilke tiltag der giver den korteste tilbagebetalingstid eller lignende.

Metoderne er normalt baseret på f.eks. Excel-regneark, og der er normalt tale om individuelt udviklede værktøjer (hos de enkelte rådgivere og virksomheder) og ikke kommercielt tilgængelige værktøjer.

Fordelen ved den indledende analyse er, at man hurtigt og med en relativt beskedne indsats kan fastlægge omkostninger og besparelser for energibesparende tiltag. Ulempen er, at man sjældent er i stand til at tage højde for mere komplicerede teknologier eller kombinationer af tiltag, og dermed er de ikke anvendelige til fastlæggelse af samlede energibesparelser i sager med omfattende energirenovering.

Be10 med standardforudsætninger

Be10 (Aggerholm og Grau, 2011) er et beregningsprogram som i udgangspunktet anvendes til beregning af bygningers samlede energibehov, f.eks. i forbindelse med myndighedsgodkendelse af nybyggeri. Programmet kan også anvendes til fastlæggelse af energibesparelspotentiale i forbindelse med energirenovering, både for de simple tilfælde hvor der er tale om enkelte eller få tiltag, eller de komplicerede tilfælde hvor der er tale om gennemgribende energirenovering.

Be10 er baseret på energibalancen for bygningen på månedsbasis, og programmet udvikles og vedligeholdes af Statens Byggeforskningsinstitut, AAU.

Fordelen ved Be10 er, at detaljeringsgraden i beregningen er på et niveau hvor man med relativt stor nøjagtighed kan fastlægge bygningens samlede energibehov. Ulempen er, at der kræves en del input for at beskrive bygning-

gen, og dermed egner programmet sig mindre godt til bestemmelse af f.eks. energibesparelser ved simple enkelttiltag.

I forbindelse med beregning af energibesparelser ved energirenovering, er det nødvendigt at fastlægge en række af inputparametrene ret præcist for at få realistiske vurderinger af energibesparelserne. I Be10 beregningen med standardforudsætninger er der benyttet standardværdier for alle parametre, for at vise hvor stor en betydning det har at inputparametrene kvalificeres.

Be10 med tilpassede forudsætninger

I Be10 beregningen med tilpassede forudsætninger er samtlige inputparametre i beregningen kvalificeret i videst mulig udstrækning, således at beregningen giver en realistisk vurdering af energibesparelsen

PHPP med tilpassede forudsætninger

PHPP (Passive House Institute, 2013) er et beregningsprogram, som i udgangspunktet anvendes til certificering af Passivhuse (efter den tyske definition). På samme måde som i Be10 kan programmet også anvendes til at fastlægge energibesparelspotentiale i forbindelse med energirenovering.

PHPP er lavet i Excel, men har en kompleksitet på niveau med Be10's, og beregningen baseres ligesom Be10 også på energibalancen for bygningen på månedsbasis. Programmet udvikles og vedligeholdes af PassivhausInstitut.

Fordele og ulemper ved PHPP er de samme som for Be10.

I PHPP beregningen benyttes samme kvalificerede inputparametre i beregningen som nævnt under "Be10 med tilpassede forudsætninger", således at beregningen i videst mulig udstrækning giver en realistisk vurdering af energibesparelsen.

Målt energiforbrug

Energiforbruget er målt før og efter renoveringen. Målingerne er imidlertid forbundet med ret store usikkerheder, idet det har vist sig at bygningens fjernvarmeinstallation, udover at forsyne bygningen med varme og varmt brugsvand, ligeledes forsyner to andre bygninger på matriklen; en vuggestue på 203 m² og en gartnerbolig på 127 m². For at isolere forbruget til varme og varmt brugsvand for kontorbygningen, er der derfor gennemført en overslagsmæssig korrektion, som er nærmere beskrevet i det følgende.

Bygningen er imidlertid i processen ombygget fra tidligere lejer: Undervisningsministeriet til ny lejer: UNI-C. Den indvendige ombygning svarer til en ændring fra 1 personers cellekontorer til mere intensivt udnyttede stor-rumskontorer (typisk med 4 personer) på samme areal som 2 personer før benyttede. Udover denne fordobling af persontætheden er varmekapaciteten reduceret i forbindelse med fjernelse af de indvendige gipsvægge. Bygningen er dog stadig tung med eksponerede tykke betondæk.

Varmeforbrug

Det målte varmeforbrug skal korrigeres for diverse indkøringsforhold samt 2 eksterne bygninger (gartnerbolig og vuggestue) der ligeledes forsynes fra den fælles dampcentral tilsluttet HOFOR. Herudover skal der korrigeres for graddøgn.

Korrigeret forbrug

Det totale varmeforbrug aflæst på bygningens hovedmåler er angivet i nedenstående tabel, svarende til 3 år inden renoveringen og året efter renoveringen. I tabellen er angivet dels det faktisk målte forbrug og dels det graddagekorrigerede forbrug. Graddagekorrektionen er foretaget på baggrund af skyggegraddage fra Teknologisk Institut.

Tabel 2. Målt og graddagekorrigeret varmeforbrug i MWh før/efter energirenovering

	Målt	Korr.	Målt	Korr.	Målt	Korr.	Målt	Korr.
	"9/10		"10/11		"11/12		"13/14	
Brutto Fjernvarmeaftag	548,0	573,8	660,0	604,3	540,0	630,1	254,2	283,9

Forbruget i 2012/2013 er ikke medtaget, da bygningen i denne periode var under ombygning og uden lejer.

Det målte energiforbrug dækker over en række forskellige del-energiforbrug, som ikke er direkte relateret til bygningen Vester Voldgade 123, herunder opvarmning af to separate bygninger; vuggestue og gartnerbolig. For at fastlægge varmeforbruget for Vester Voldgade 123 er der derfor beregnet fradrag for opvarmning af hver af de to bygninger mv.

Varmeforbruget "efter" har herudover også været påvirket af diverse indkøringsforhold som bl.a. omfatter:

1. Solvarmesystemet har ikke lagret solvarme korrekt i tanken, hvorved det ikke har kunnet lagre i jorden. Dette medfører et ekstra varmeforbrug på ca. 3,44 kWh/m² år.

2. Fremløbstemperaturen for vuggestuen har generelt været ca. 20-25 grader forhøjet, hvilket resulterer i et forøget forbrug ved rørtab på ca. 2,63 kWh/m² år.
3. Kælderdøren i bygningen står normalt åben ca. 4 timer per arbejdsdag. Årsagen er at kælderen anvendes til intensive arkiver tilhørende Undervisningsministeriet. Af logistik- og energimæssige hensyn virker dette ikke hensigtsmæssigt. Det resulterende ekstra varmetab fra kælderen skønnes til forbrug ca. 0,81 kWh/m² år.
4. Grundet forøgelsen af persontætheden i bygningen, har der været ønske om at forøge infiltrationen i bygningen ved at lade vinduer stå på klem store dele af året. Det skønnes at dette har medført en forøgelse af infiltrationen på ca. 0,3 h⁻¹, hvilket svarer til ca. 2,07 kWh/m² år.

Indkøringsforholdene har altså forøget varmeforbruget med ca. 8,95 kWh/m² pr. år, hvilket svarer til ca. 49,3 MWh.

I tabel 3 er vist det graddagekorrigerede målte forbrug (fra tabel 2) og ud-specificerede fradrag, svarende til de to andre bygninger koblet på varmesforsyningen samt indkøringsforhold for "efter"-situationen. Forbruget til varmt vand betragtes samlet for alle bygninger. For situationen "før" er anvendt en middelværdi for de tre årsmålinger.

Tabel 3. Målt brutto fjernvarmeforbrug før/efter samt fradrag for andre bygninger mv.

	"før"	"efter"
Brutto fjernvarmeforbrug	602,7	283,9
- opvarmning vuggestue	34,0	34,0
- opvarmning gartnerbolig	19,1	19,1
- varmetab varmerør	5,3	5,3
- varmt brugsvand inkl. rørtab	25,0	25,0
- indkøringsforhold "efter"	0,0	49,3
Netto fjernvarmeforbrug	519,3	151,2

I det følgende er givet en kort forklaring på de øvrige fradrag:

Opvarmning vuggestue: Varmeforbruget er skønnet til 170 kWh/m² pr. år og vuggestuen har et areal på 203 m².

Opvarmning gartnerbolig: Varmeforbruget er skønnet til 150 kWh/m² pr. år og gartnerboligen har et areal på 127 m².

Varmetab varmerør: Varmetabet fra varmerør i jord til hhv. vuggestue og gartnerbolig er skønnet til 0,8 kW i opvarmningsperioden, dvs. ca. 9 måneder pr. år.

Varmt brugsvand inkl. rørtab: Varmeforbruget til varmt brugsvand inklusiv tabet fra rør kan bestemmes af målinger fra sommerperioden, hvor der ikke er varmeforbrug til opvarmning af bygningen. Herved er forbruget aflæst til ca. 3 kW, hvilket antages for rimeligt konstant over året. Det samlede forbrug til varmt brugsvand bliver således ca. 25 MWh pr. år.

Forbrug af varmt brugsvand

Der er ikke opsat særskilt måler på forbrug af varmt brugsvand eller fordeling mellem lejere. Fastlæggelse af forbruget til varmt brugsvand er derfor foretaget på baggrund af målinger af det samlede fjernvarmeforbrug i sommer-

perioden, hvor der ikke er behov for opvarmning af bygningen (som beskrevet tidligere).

Korrigeret forbrug

Forbruget til varmt brugsvand inklusive rørtab mv. er endeligt fastlagt til ca. 25 MWh pr. år (se ovenfor), hvilket omtrent svarer til at der anvendes ca. 75 l/m² pr. år som opvarmes fra 10 °C til 55 °C.

Elforbrug

Der er målt et elforbrug på 142.385 kWh/år for 2013, dvs. forbruget svarende til efter energirenoveringen. Før energirenoveringen har det gennemsnitlige årlige elforbrug været 96.540 kWh/år (gennemsnit for årene 2008-2009).

Korrigeret forbrug

Der foretages ingen korrektion af elforbrugene, og dermed anvendes hhv. 142.385 kWh/år og 96.540 kWh/år for "efter" og "før" energirenoveringen.

Elforbruget er steget med næsten 50 % efter energirenoveringen, og dette til trods for at der er anvendt en mere energieffektiv belysning samt behovsstyring af lyset efter både dagslys og vha. PIR-sensorer. Årsagen til forøgelsen er primært overgangen fra enkeltmandskontorer til storrumskontorer, således at bygningen nu huser væsentligt flere mennesker.

Bygningen har efter renoveringen fået følgende ændringer af elforbrug:

Tillæg:

- 2 nye større mekaniske ventilationsanlæg
- Pumpe til solvarme
- Pumpe til jordboringer
- Flere medarbejdere med arbejdslampe og PC
- Flere medarbejdere med 2 skærme
- Uheldig IT løsning hvor flere medarbejdere har deres PC kørende konstant for at kunne tilgå serveren i UNI-C hjemmefra.
- Øget køkkendrift og opvask til flere ansatte samt kursister mm.
- 2 sodavandsmaskiner i kantine
- Øget ventilatordrift grundet den øgede varmebelastning

Besparelser:

- Mere effektiv belysning
- Behovsstyring af lys efter dagslys og PIR

Det er estimeret, at bygningen huser ca. 150 personer efter renoveringen, mod ca. 100 personer før renovering.

På trods af antallet af personer er steget, og at apparaturret generelt er fornyet, er elforbruget pr. person reelt steget.

Dette kan ved første øjekast undre, men forklaringen er den, at den nye lejer, i højere grad, beskæftiger sig med IT, som har medført højere forbrug elforbrug. Dette bevirker, at det samlede elforbrug pr. person er forøget efter renoveringen. Dette må ikke ses som et udtryk for, at bygningens elforbrug til bygningsdrift er steget. Det har dog ikke været muligt at dokumentere dette ved målinger, da en direkte separation af elforbruget til hhv. drift af bygningen og forbrug til udstyr, da der ikke er monteret separate forbrugsmålere.

Øvrige målinger på bygningen

Der har været udført omfattende målinger på bygningen før og efter renoveringen i samarbejde med DTU Byg herunder delvist som led i et afgangspjækt i foråret 2013 på DTU Byg. Disse består af termofotograferinger, langtidsmålinger i kontorer af luft temperatur og fugtighed samt CO₂ niveau.

Herudover er der målt luftkvalitet, herunder CO₂ og partikeltælling samt udført en anonym spørgeundersøgelse af indeklimaet via internettet.

Af hensyn til validiteten af målingen er den desværre udført på 2 forskellige kontrolgrupper.

Måling af indeklima før renoveringen blev udført på lejer fra Undervisningsministeriet. De sad i cellekontorer og var delvist udflyttet på tidspunktet for målingen. Flytning til nyt kontor kan påvirke tilfredsheden i både positiv og negativ retning.

Måling af indeklima efter renoveringen blev udført på lejer fra UNI-C, der ligeledes var flyttet til ny location (VVG 123). Tilfredsheden med indeklimaet skønnes påvirket, at der pga. indkøringsforhold var ca. 1,5 grader for varmt i lokalene. Herudover var påbegyndt et stort anlægsprojekt 150 m syd for bygningen med omfattende spunsning og kørsel, hvilket medførte et ikke uvæsentligt støjniveau herfra. Disse forhold skønnes at påvirke tilfredsheden i negativ retning.

Hovedkonklusionen for de øvrige målinger er følgende:

Klimaskærmen er yderst godt isoleret. Ingen kuldebroer eller svækkelser ved vakuumisolering udført på lavtliggende del mod Vester Voldgade af pladsmæssige årsager. Luftkvalitet og udefrakommende støj er forbedret. Indeklimaet er forbedret bortset fra der har været for varmt i 2013 grundet tidligere nævnte indkøringsproblemer.

Energisignatur

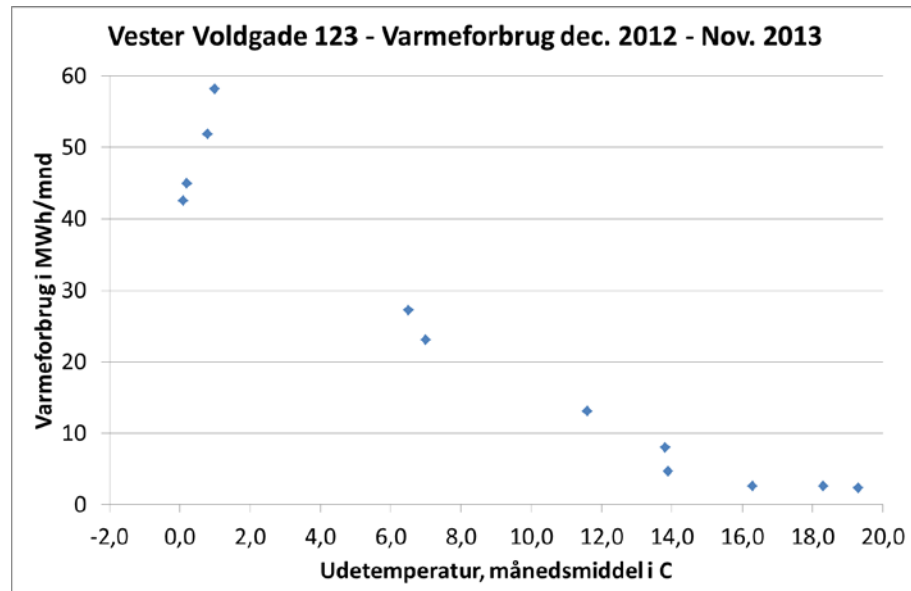
Målingerne af bygningens energiforbrug sammenholdt med udetemperaturen og antallet af solskinstimer, kan benyttes til at opstille en energisignatur for bygningen, dvs. en sammenhæng mellem udeklima og energiforbrug. Energisignaturen kan anvendes til at analysere sammenhængen mellem varmetab og varmetilskud.

I tabellen nedenfor er opstillet sammenhængende værdier af aflæst energiforbrug (fra HOFOR), udetemperatur (DMI, Landbohøjskolen) og antallet af solskinstimer (DMI, Toldboden).

Tabel 4. Målt energiforbrug samt udetemperatur og solskinstimer fra DMI for dec 2012 – nov 2013

	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov
MWh	59,2	51,9	45,0	42,6	23,0	8,0	2,6	2,3	2,6	4,7	13,1	27,2
°C	1,0	0,8	0,2	0,1	7,0	13,8	16,3	19,3	18,3	13,9	11,6	6,5
-	25	52	41	203	216	251	262	270	206	181	92	59

Bygningens energisignatur svarer til sammenhængen mellem varmeforbruget i MWh og udetemperaturen i °C, som optegnet i figur 6.



Figur 6. Vester Voldgade 123, energisignatur.

Basis varmförbruget fastlægges som det gennemsnitlige forbrug i juni – august, idet disse måneder afspejler bygningens varmförbruk udenfor den normale opvarmningssæson. Basisforbruget bliver herved 2,50 MWh.

Der regnes i øvrigt med en gennemsnitlig indetemperatur for perioden på 22 °C, svarende nogenlunde til de målte værdier fra ventilationsanlægget mv.

Med udgangspunkt i de faste parametre og målinger fra ovenstående tabel (ekskl. december og januar, som har et indlysende overforbrug), opstilles en lineær regressionsmodel, hvor parametrene fastlægges på baggrund af mindste kvadraters metode. Varmeförbruget kan udtrykkes ved følgende ligning:

$$Q = Q_{basis} - Q_{int\ vt} + (22 - T_u) \cdot k_{temp} - n_{sol} \cdot k_{sol}$$

Hvor

- Q er varmförbruget pr. måned i MWh
- Q_{basis} er basisforbruget pr. måned i MWh (2,50 MWh)
- Q_{int vt} er det interne varmetilskud pr. måned i MWh
- T_u er udetemperaturen i °C
- k_{temp} er temperaturfølsomheden for bygningen i MWh/K
- n_{sol} er antallet af solskinstimer pr. måned
- k_{sol} er solfølsomheden for bygningen i MWh/h

De tre ubekendte (Q_{int vt}, k_{temp} og k_{sol}) kan nu bestemmes på baggrund af måledata for februar – november (tabel 4) og mindste kvadraters metode. Herved fås følgende sammenhæng:

Tabel 5. Regressionsmodellens parametre

Temperaturfølsomhed	2,667	MWh/mnd. pr. °C
Solfølsomhed	0,0102	MWh/h
Internt tilskud	16,06	MWh/mnd.

Tallene i tabel 5 afspejler de faktiske forhold i bygningen herunder den registrerbare udnyttelse af solindfaldet og det interne varmetilskud. I tabel 6 er opstillet regressionsmodellens beregnede varmförbruk til sammenligning med de tilsvarende målte værdier.

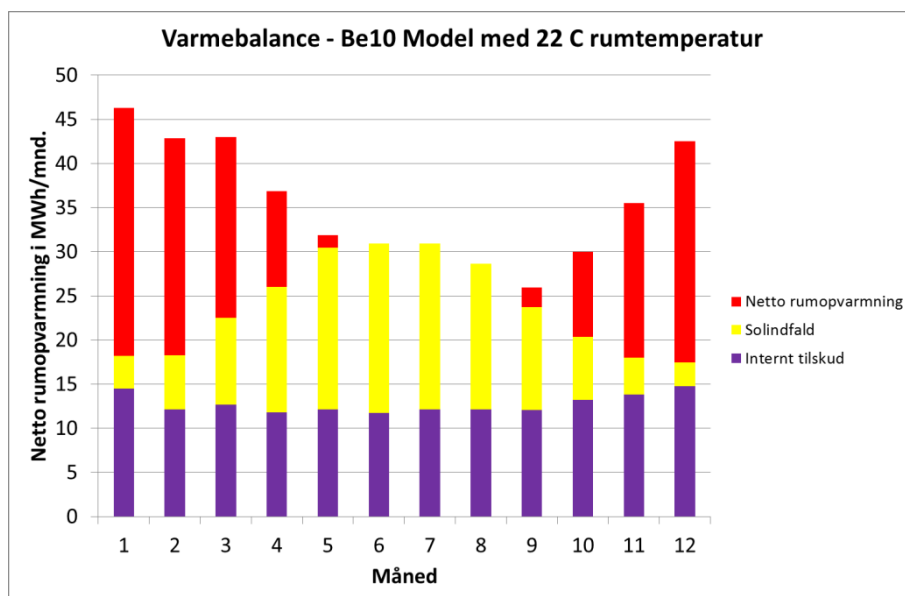
Tabel 6. Målt og beregnet varmebehov for dec 2012 – nov 2013

	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov
Målt, MWh	58,2	51,9	45,0	42,6	23,0	8,0	2,6	2,3	2,6	4,7	13,1	27,2
Beregnet, MWh	42,2	42,5	44,2	42,8	24,2	5,8	2,6	2,3	2,6	6,2	13,2	27,2

Tabellen viser en rimeligt god overensstemmelse mellem de målte resultater og den fastlagte regressionsmodel for perioden februar – november.

Når der laves en tilsvarende analyse for Be10 beregningsmodellen viser det sig, at der i Be10 modellen forventes en næsten 4x større solfølsomhed svarende til ca. 0,038 MWh pr. solskinstime. Solindfaldet udnyttes således ikke i forventet grad til opvarmning af bygningen i opvarmningssæsonen. Det kan bl.a. skyldes brugerreaktioner og forhold ved den automatiske styring af f.eks. solafskærmningen.

Varmebalancen for bygningen i Be10 modellen er vist i figur 7.



Figur 7. Varmebalance for Be10 beregningsmodel.

Figuren viser, at varmebalancen for bygningen er kraftigt domineret af det interne varmetilskud og solindfaldet i en stor del af året. Varmebehovet i bygningen vil derfor være meget følsomt for både den faktiske rumtemperatur og den faktiske udnyttelse af henholdsvis det interne varmetilskud og solindfald. I den senere følsomhedsanalyse, gennemføres derfor to analyser hvor udnyttelsen af internt varmetilskud og solindfald er væsentligt reduceret.

Beregnet energiforbrug

Beregningsforudsætninger

Dette afsnit omhandler de generelle beregningsforudsætninger som er anvendt i beregningerne af energiforbruget før og efter energirenoveringen. De forskellige beregningsmetoder anvender forskellige definitioner af f.eks. arealer mv. og derfor er der i det følgende gennemgået de parametre hvor beregningsforudsætningerne varierer.

Etageareal

For Be10s vedkommende fastlægges det opvarmede etageareal som beskrevet i DS418, 7. udgave (Dansk Standard, 2011), dvs. ved de udvendige mål. Dette medfører at bygningens opvarmede etageareal bliver større efter renoveringen.

I PHPP regnes efter tyske regler for nyttiggjort areal kun med indvendigt areal fratrukket "spild arealer" til bl.a. indvendige vægge, skakter, teknikrum og delvist trapper og gange.

I nedenstående tabel er vist en opgørelse over det opvarmede etageareal i for hver af beregningsmetoderne. For Be10s vedkommende er der angivet opvarmet etageareal både med og uden indregning af opvarmet kælder.

Tabel 7. Opvarmet etageareal anvendt i beregninger [m²]

Etage	Be10 før	Be10 efter	PHPP
Kælder	1204	1255	-
Stueetage	1204	1273	-
1. sal	989	1058	-
2. sal	989	1058	-
3. sal	989	1058	-
4. sal	989	1058	-
Total ex. kælder	5160	5505	5005
Total incl. kælder	-	6760	-

Klimaskærmen

I bilagssektionen er opstillet tabeller for beskrivelsen af bygningens klimaskærm, svarende til det input der er anvendt i hhv. Be10 og PHPP. I tabellen er givet en kort beskrivelse af data i bilagssektionen.

Tabel 8. Oversigt over indholdet i bilagssektion.

Inddata	Tabel	Program	Situation
Klimaskærm	A1	Be10	Efter
Klimaskærm	A2	Be10	Før
Klimaskærm	A3	PHPP	Efter
Klimaskærm	A4	PHPP	Før
Vinduer	A5	Be10	Efter
Vinduer	A6	Be10	Før
Skygger	A7	Be10	Før/efter

Tæthed

Infiltrationsluftmængderne er angivet på baggrund af resultater fra tryktest som er bestilt for eftervisning af bygningens tæthed. Et af kravene for at en

bygning skal kunne få et passivhus certifikat er, at infiltrationen ikke må overstige $0,6 \text{ h}^{-1}$ ved en 50 Pa tryktest. Da resultatet af tryktesten er kvantificeret ved overtryk og undertryk (50 Pa) skal denne konverteres til en værdi som repræsenterer infiltrationen i de forskellige programmer.. I nedenstående tabel er opstillet resultatet af målingen samt resulterende infiltration som anvendes ved beregningerne med Be10.

Tabel 9. Oversigt for resultater af Blowerdoor test samt infiltration anvendt i Be10.

OT, infiltration 50Pa, overtryk		1632,6	l/s
UT, infiltration 50Pa, undertryk		1879,9	l/s
Gennemsnit		1756,3	l/s
Luftskifte i l/s pr. m ² opv. etageareal (50 Pa)	1756,3 l/s pr. m ² / 5505 m ²	0,32	l/s pr. m ²
Infiltration anvendt i Be10	$0,04 + 0,322 \cdot 0,06 =$	0,059	l/s pr. m ²

Udenfor brugstiden anvendes derfor $0,019 \text{ l/s pr. m}^2$ ($0,059 - 0,040$).

For PHPP fastlægges infiltrationen som følger:

$$q_{\text{inf}} = e \cdot n_{50} \cdot V_{\text{PHPP}} / V_{n50}$$

hvor

$e = 0,07$ (vindkoefficient)

$n_{50} = 0,45 \text{ h}^{-1}$ (luftskifte ved 50 Pa)

$V_{n50} = 12.513 \text{ m}^3$ (nettovolumen ved tryktest)

$V_{\text{PHPP}} = 14.829 \text{ m}^3$ (nettovolumen)

Hermed fås infiltrationen i PHPP til $0,037 \text{ l/s pr. m}^2$.

Sammenfattende er der anvendt følgende data i beregningerne:

Tabel 10. Infiltration i l/s pr. m² anvendt i beregningerne.

Parameter	Be10		PHPP	
	Før	Efter	Før	Efter
Infiltration i brugstid	0,313	0,059	0,332	0,037
Infiltration uden for brugstiden	0,090	0,019	-	-

Ventilation

Før renoveringen blev luftskiftet tilvejebragt vha. mekanisk udsugning fra toiletter i kombination med væsentlig infiltration fra vinduer samt balanceret mekanisk ventilation i kantine og børnehave.

I forbindelse med renoveringen af bygningen bibeholdtes de 2 eksisterende anlæg pga. økonomi, lav driftstid og luftmængde mv. Energiforbruget til drift er medtaget. Når disse udskiftes vil energiforbruget falde yderligere. Efter sikring af forøget tæthed af bygningen blev etableres et nyt ventilationsanlæg til kontorer med konstant luftmængde VE-01. Anlægget er etableret uden varmefflade men kun med effektiv genvinding og med forvarmning og jordkøling via jordbrønde. Forvarmning af indblæsningsluften bidrager positivt til varmegenvindingen på ventilationsanlægget som i forvejen har et varmegenvinding på 85 %. Herved øges varmegenvindingen til ca. 90 %.

Herudover er der etableret ventilationsanlæg til intensive møderum med variabel luftmængde VE-02, styret af CO₂ niveau og temperaturer i de forskellige møderum. Anlægget er forsynet med effektiv energigenvinding men kun forberedt for forvarmning og jordkøling via jordbrønde af økonomiske og kapacitetsmæssige årsager.

I Be10 opdeles bygningen i ventilationszoner, og den relative driftstid F_o , som er ventilationssystemets driftstid set i forhold til bygningens brugstid, angives. Dernæst angives ventilationssystemets øvrige specifikationer samt infiltrationen. Ventilationstabt beregnes på baggrund af månedmiddeltemperaturer.

I PHPP er ventilationsarket bedre egnet til beboelse end til en bygning med flere ventilationsanlæg. For at medtage flere ventilationsanlæg må der foretages beregninger svarende til at der fastlægges middelværdier for hhv. SEL-værdien, luftskiftet, brugstiden mv. Desuden er der ikke mulighed for at justere på indblæsningstemperaturen. Indblæsningstemperaturen afhænger af varmegenvindingens effektivitet som følger:

$$T_i = \eta_{HR,eff} \cdot (T_{ind} - T_{ude}) + T_{ude}$$

hvor

T_i	= indblæsningstemperaturen
$\eta_{HR,eff}$	= varmegenvindingen, 0,804 (80,4 %)
T_{ind}	= indetemperatur, 20,0 °C
T_{ude}	= middel udetemperatur i opvarmningssæson, 3,2 °C

Ud over virkningsgraden på ventilationen er der en jordkreds, som reelt forøger den samlede temperaturvirkningsgrad, specielt i kolde perioder.

Herved kan indblæsningstemperaturen fastlægges som 16,6 °C. Inkluderes jordkredsen vil indblæsningstemperaturen reelt være en smule højere.

T_{ude} på 3,2°C fastsættes på baggrund af klimadata og kan ikke ændres ved brugerinput. I passivhuse er opvarmingsperioden kortere end normalt hvorved den gennemsnitlige udetemperatur bliver lavere end de normale 5,4°C.

I Be10 er anvendt en indblæsningstemperatur på 18 °C for at kompencere for at der anvendes for-varmning og -køling af ventilationsluften. dette er estimeret på baggrund af den opnåelige effekt af jordslanger.

Sammenfattende er der anvendt følgende data i beregningerne:

Tabel 11. Ventilationsparametre anvendt i beregningerne (middelværdier for bygningen over hele døgn).

Parameter	Be10		PHPP	
	Før	Efter	Før	Efter
Mekanisk ventilation, l/s pr. m ²	0,10	0,25	0,08	0,20
Naturlig ventilation, l/s pr. m ²	0,34	0,29	0,50	0,50
η_{vgv} , -	0,62	0,83	0,62	0,83
SEL, kJ/m ³	1,69	1,58	1,69	1,58

Køling

På Vester Voldgade er der oprindeligt ikke installeret mekanisk køling i bygningen. I den energirenoverede bygning er der anvendt jordbrønde, som giver mulighed for forvarmning og -køling af ventilationsluften. Af den grund er der ikke tale om en køleflade med en fast maksimal køleeffekt, men et system hvor køleeffekten variere med den aktuelle omkringliggende jord- og luft-temperatur. Af den grund er det derfor ikke direkte muligt at indtaste systemet optimalt i begge programmer.

Jordbrøndene kan sammenlignes med frikølingsprincippet, hvor energien fra den varme ventilationsluft overføres til den køligere jord i sommer perioden, ved hjælp af nedborede rørkredse.

I Be10 beregningen anvendes "mekanisk køling" med en høj tilhørende COP på 50. COP-værdien udtrykker den reciprokke værdi af hvor meget energi der skal tilføre pr. udnyttet kWh køling. En høj COP-værdi er dermed et tegn på et effektivt system.

PHPP anbefaler som udgangspunkt at mekanisk køling helt undgås og indtastningsmulighederne inden for mekanisk køling er begrænsede. Anvendes mekanisk køling, udregnes den nødvendige køleeffekt på baggrund af en simpel varmebalance mellem varmetab fra bygningen og den interne varmebelastning og der tages ikke højde for effektiviteten af kølesystemet.

Det er som udgangspunkt samme procedure i Be10 hvor mekaniske køling kan til- eller fravælges. Tilvælges den mekaniske køling, vil eventuelle beregnede overtemperaturer blive summeret op og der vil blive tilført et tilsvarende energiforbrug til køling baseret på den angivne COP faktor for køleanlægget.

El-forbrug

I Be10 medtages kun en del af elforbruget i beregningen af energibehovet, svarende til den del som benyttes til bygningsdrift og belysning. Derudover beregnes ligeledes et elbehov til øvrige apparater, svarende til elforbruget til øvrigt apparatur mv. som indtastes under "internt varmetilskud".

I PHPP medtages alt el-forbrug i beregningen, både indenfor og udenfor bygningens klimaskærm. Der er fastlagt en grænse for hvor meget primærenergi der må anvendes, svarende til 120 kWh/m² år. De 120 kWh/m² år dækker altså elforbrug til bygningsdrift og belysning samt elforbruget til husholdning i øvrigt. Til gengæld medvirker elforbruget ikke som en kilde til intern belastning.

Elforbruget til belysning i både PHPP og i Be10 indtastes ved den totale installeret effekt, men udregningen af det totale forbrug til belysning er forskelligt. I Be10 indtastes en eksternt beregnet dagslysfaktor, hvorimod PHPP selv estimerer en dagslysfaktor på baggrund af vinduesinformationerne.

Da elbehovet specielt for apparatur ikke siger noget om elforbruget uden den tilsvarende brugstid, er det valgt at vise det totale forbrug i MWh pr. år

Sammenfattende er der anvendt følgende data i beregningerne:

Tabel 12. Elforbrug fra resultater af beregninger.

Parameter	Be10		PHPP	
	Før	Efter	Før	Efter
Elforbrug til belysning, MWh pr. år	65,5	34,1	67,4	21,1
Elforbrug til apparatur, MWh pr. år	13,9	83,7	13,9	76,0
Elforbrug til øvrig drift, MWh pr. år	18,1	23,7	18,1	44,7
Total, W/m ²	97,5	141,5	99,4	141,8

Fordi der i PHPP er sat en grænse for elforbruget er det i beregningen specificeret nøje hvilket apparatur der indgår i bygningen. Resultatet for elberegning i PHPP giver derfor et mere realistisk billede af de faktiske forhold forudsat at beregningskernen formår at beregne i så detaljeret grad som det kræves for indtastningen.

Dette betyder endvidere, at hvis der skal indtastes værdier fra PHPP til Be10 skal det gøres med omhu da programmerne regner forskelligt.

Uopvarmede rum

Samtlige ydervægge er efterisoleret udvendigt i forbindelse med energirenoveringen. Ligeledes er kælderydervæggene over og under terræn blevet efterisoleret med min. 260 mm EPS plader og ført ca. 0,5 m under kælderydervægsfundamentet for at sikre en god randisolering. Dette kunne udføres uden problemer og udgjorde ingen fare for fundamenters stabilitet, da bygningen er pælefunderet til kote -7,4. Herudover regnes der generelt med en højere jordtemperatur under kælderterrændækket pga. solvarmelagringen.

Energibalancen i det uopvarmede rum beregnes dels for at udregne en reduktionsfaktor, b-faktor. I energibalancen sammenholdes energitab via klimaskærmen samt ventilation mod energitilskud i form af solindfald gennem vinduer i det uopvarmede rum. I Be10 beregnes b-faktoren således på baggrund af kælderydervæggens U-værdi, ventilation samt arealer.

Den samlede ventilation i kælderen er fastsat til 0,30 l/s pr. m² (kombineret mekanisk ventilation med varmegenvinding og naturlig ventilation). Størrelsen har en væsentlig betydning for bygningens samlede rumopvarmningsbehov, da b-faktoren i kælderen påvirker transmissionstabet gennem etageadskillelsen til kælderen. Det har imidlertid ikke været muligt at fastlægge den samlede ventilationsmængde mere præcist, men det vurderes at den kunne være højere som følge af at kælderen anvendes som arkiv, og at kælderdøren ofte står åben i flere timer dagligt.

Med udgangspunkt i en samlet ventilation i kælderen på 0,3 l/s pr. m² fastlægges b-faktoren for kælderen som 0,30.

Be10 regner varmetabet på baggrund af gennemsnitligt udetemperatur måned for måned og konstant jordtemperatur. I PHPP regnes med varierende jordtemperatur som er baseret på månedlig gennemsnitstemperatur samt bygningsfundamentets udformning. I PHPP er jordtemperaturen derfor noget højere da der indregnes at jorden bliver opvarmet af bygningen. Jordtemperaturen fremgår af tabel 13.

Tabel 13. Gennemsnitlige månedlige jordtemperaturer anvendt i PHPP.

Måned	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
T _{jord} [°C]	17,8	17,8	17,9	18,0	18,2	22,6	22,7	22,8	18,5	18,3	18,1	18,0
Gt (kKh)	1,6	1,5	1,6	1,4	1,3	-1,9	-2,0	-2,1	1,1	1,2	1,2	1,5

I PHPP er varmetabet gennem kælderdækket til jorden ca. 36 MWh/år forudsat en varmeperiode på 205 dage/. De 205 dage er bestemt ud fra det samlede antal dage pr. år i forhold til andel at det totale varmetab som sker gennem kælderterrændækket.

Indledende analyse

Brug af egne beregningsmodeller som regneark er meget udbredt og vurderes som en udmærket metode til simple opgaver. I større og mere komplekse bygninger, som f.eks. bygningen i nærværende sammenhæng, påvirker de energibesparende tiltag hinanden, hvorfor man i disse situationer bør anvende mere detaljerede værktøjer.

I den aktuelle sag var rådgiveren overbevist om, at man ved omhyggelig projektering kunne nå et varmeforbrug på passivhus niveau (15 kWh/m² år svarende til 81,9 MWh pr. år for bygningen).

I forbindelse med beslutningen om gennemførelsen af den aktuelle energirenovering, er energibesparelser vurderet tiltag for tiltag ved beregning af hhv. varme- og elbesparelser.

I forhold til varmebesparelsen var "før situationen" kendt i kraft af målinger af bygningens faktiske varmeforbrug og hvis man derfor var i stand til at ramme certificeret passivhus niveau med et netto varmeforbrug på max 15 kWh/m², ville besparelsen svare til differensen.

Den eneste usikre parameter var den nødvendige isoleringstykkelse for at nå dette energiforbrug. Herudover var der også en usikkerhed i hvor meget man kunne reducere den faste fjernvarmeafgift. Den faste afgift var kontraktmæssigt bundet før renoveringen blev igangsat.

Energiforbruget for den indledende analyse er opstillet i tabel 14.

Tabel 14. Energiforbrug i MWh før/efter renovering. Indledende analyse

Model	Varmebehov			Elbehov		
	Rumopv.	VBV	Total	Bygningsdrift	Øvrig	Total
Indledende analyse, før	519,3	21,5	540,8	-	-	-
Indledende analyse, efter	81,9	21,5	103,4	-	-	-
Energibesparelse	437,4	0,0	437,4	-	-	-

Den indledende analyse antager altså et målt forbrug før og et forventet forbrug efter for rumopvarmningsbehovets vedkommende. For det varme vand er der alene medtaget energiforbruget til opvarmning af vandet fra 10 °C til 55 °C. Der er altså i højere grad tale om en projekteret besparelse end egentlige beregninger.

Be10 med standardforudsætninger

I Be10 beregningen med standardforudsætninger er der benyttet standardværdier for alle parametre, for at vise hvor stor en betydning det har at inputparametrene kvalificeres. I Be10 beregningen med standardforudsætninger er der benyttet standardværdier som vist i tabel 15. Til sammenligning er vist tilsvarende tilpassede værdier.

Tabel 15. Standardforudsætninger og tilpassede forudsætninger for Be10 beregningerne.

Parameter	Be10		
	Standard	Tilpasset/før	Tilpasset/efter
Indetemperatur, °C	20,0	20,0	22,0
Internt vts. personer, W/m ²	4,00	1,60	2,45
Internt vts. apparatur, W/m ²	6,00	0,60	3,50
Infiltration i brugstid, l/s pr. m ²	0,130	0,313	0,059
Infiltration u. brugstid, l/s pr. m ²	0,090	0,090	0,019
Brugstid, timer/uge	45	45	50
Varmt brugsvand, l/m ² pr. år	100	75	75

I Be10 modellen med standardforudsætninger er kælderen regnet som uopvarmet. Energiforbruget for Be10 med standardforudsætninger er opstillet i tabel 16.

Tabel 16. Energiforbrug i MWh før/efter renovering. Be10 standardforudsætninger

Model	Varmebehov			Elbehov		
	Rumopv.	VBV	Total	Bygningsdrift	Øvrig	Total
Standard Be10, før	476,3	28,9	505,2	84,1	78,9	163,0
Standard Be10, efter	129,9	29,7	159,6	79,8	84,8	164,6
Energibesparelse	346,4	-0,8	345,6	4,3	-5,9	-1,6

Forøgelsen i elbehovet til øvrig el skyldes, at den udvendige efterisolering af bygningen medfører en arealforøgelse og dermed en forøgelse af det interne varmetilskud fra apparatur.

Be10 med tilpassede forudsætninger

I Be10 beregningen med tilpassede forudsætninger er der benyttet tilpassede værdier for de parametre som har væsentlig betydning for bygningens energiforbrug, dvs. indetemperatur, internt varmetilskud, infiltration, varmt brugsvand og brugstid. Energiforbruget for Be10 med tilpassede forudsætninger er vist i tabel 17.

Tabel 17. Energiforbrug i MWh før/efter renovering. Be10 tilpassede forudsætninger

Model	Varmebehov			Elbehov		
	Rumopv.	VBV	Total	Bygningsdrift	Øvrig	Total
Be10 tilpasset, før	557,3	22,2	579,5	83,6	13,9	97,5
Be10 tilpasset, efter	142,6	22,6	165,2	57,8	83,7	141,5
Energibesparelse	414,7	-0,4	414,3	25,8	-69,8	-44,0

PHPP med tilpassede forudsætninger

I afsnittet vedrørende beregningsforudsætninger er beskrevet på hvilke punkter input til de forskellige beregningsmetoder afviger. PHPP modellen er naturligvis i videst mulig grad tilpasset, således at input stemmer overens med input anvendt i Be10 modellen med tilpassede parametre. Der er imidlertid en række dele af Be10 modellen, som ikke umiddelbart kan oversættes direkte til input i PHPP. Eksempler på dette er elforbruget til belysning, hvor der i Be10 indtastes en dagslysfaktor som en standard værdi eller værdien kan hentes fra en ekstern beregning. I PHPP estimerer programmet selv et illuminans-niveau på baggrund af data for ruderne.

Infiltrationen, som i Be10 indtastes simpelt som en luftmængde i $l/(s \cdot m^2)$, indtastes i PHPP som luftskiftet (h^{-1}), ved et tryk på 50 Pa, med værdien taget fra den påkrævede trykprøvning af bygningen. PHPP omregner den indtastede værdi om til et resulterende luftskifte i henhold til EN 13790.

Under ventilation er det i Be10 muligt at indtaste forskellige zoner med tilhørende individuel styring og data for aggregatet. I PHPP er det kun muligt, at indtaste ét anlæg og luftskiftet må derfor udregnes som en middelværdi for alle anlæg. Programmet regner derefter en resulterende middelværdi over et døgn og bruger dette til at fastlægge den resulterende ventilationsmængde, opdelt i henholdsvis en sommersituation og en vintersituation. Det er ikke muligt at køre andre variationer i løbet af året.

Bygningens energiforbrug er dokumenteret som certificeret passivhus med programmet PHPP. Der er gennemført beregninger af kuldebroer i HEAT2 samt simulering af reduceret varmetab med dynamisk HEAT2 beregning ved patenteret solvarmelagring.

Energiforbruget for PHPP med tilpassede forudsætninger er vist i tabel 18. Udoover de beregnede resultater er ligeledes angivet de resultater der oprindeligt var forventet i forbindelse med PHPP-certificeringen af bygningen.

Tabel 18. Energiforbrug i MWh før/efter reovering. PHPP tilpassede forudsætninger

Model	Varmebehov			Elbehov		
	Rumopv.	VBV	Total	Bygningsdrift	Øvrig	Total
Tilpasset PHPP, før	535,5	34,9	570,4	85,5	13,9	99,4
Tilpasset PHPP, efter	130,1	28,3	158,4	65,8	76,0	141,8
Energibesparelse	405,4	6,6	412,0	19,7	-62,1	-42,4
Certificeret PHPP	76,0	48,0	124,0	57,8	58,2	116,0

Følsomhedsanalyse for udvalgte parametre

En række af de grundlæggende inputparametre som anvendes i Be10 og PHPP er forbundet med visse usikkerheder, og derfor er det relevant at undersøge hvordan de enkelte parametre påvirker beregningen af energiforbruget for bygningen.

I det følgende gennemføres derfor en analyse af beregningsresultaternes følsomhed overfor afvigelser/ændringer i en række relevante inputparametre. Beregningerne gennemføres udelukkende for Be10 modellen, idet det antages at de øvrige beregningsprogrammer og –metoder vil afspejle samme niveau af følsomhed for de individuelle parametre.

Energiforbruget for grundmodellen er opstillet i tabel 20, svarende til Be10 modellen med tilpassede inputparametre.

Tabel 20. Energiforbrug i MWh.

Model	Varmebehov			Elbehov		
	Rumopv.	VBV	Total	Bygningsdrift	Øvrig	Total
Grundmodel	142,6	22,6	165,2	57,8	83,7	141,5

Indetemperatur

I den konkrete bygning er indetemperaturen i beregningerne som udgangspunkt fastsat til 22 °C (tilpassede forudsætninger). Der gennemføres en beregning af hvor meget energibehovet for bygningen påvirkes hvis indetemperaturen er hhv. 1-3 °C lavere eller 1 °C højere end antaget.

Tabel 21. Energiforbrug i MWh som funktion af indetemperaturen.

Model	Varmebehov			Elbehov		
	Rumopv.	VBV	Total	Bygningsdrift	Øvrig	Total
Indetemperatur 19 °C	97,5	22,6	120,0	55,6	84,2	139,9
Indetemperatur 20 °C	109,6	22,6	132,1	56,2	84,2	140,4
Indetemperatur 21 °C	125,0	22,6	147,6	57,3	83,7	141,0
Grundmodel 22 °C	142,6	22,6	165,2	57,8	83,7	141,5
Indetemperatur 23 °C	162,4	22,6	185,0	58,4	84,2 ¹⁾	142,6

¹⁾ Variationen under 'øvrig' skyldes afrunding – dette forekommer flere steder i rapporten.

Tabellen viser at rumopvarmningsbehovet falder med ca. 12 % hvis indetemperaturen sænkes med 1 °C, mens det stiger med ca. 14 % hvis indetemperaturen stiger med 1 °C. De øvrige dele af det samlede energibehov er stort set uændrede. Indetemperaturen har dermed en væsentlig betydning for bygningens rumopvarmningsbehov.

Solafskærmningsfaktor

Solafskærmning i kontorbyggeri anvendes typisk for at reducere solindfaldet til bygningen på tidspunkter hvor den ekstra varme ellers ville føre til overtemperaturer, dvs. i kølesituationen. Samtidig er det naturligvis vigtigt at solafskærmningen ikke blokerer for solindfald på tidspunkter hvor solvarmen

kunne bidrage til bygningens opvarmning. Derfor kan effektiviteten af en solafskærmning spille en væsentlig rolle for bygningens energibehov.

Beregningsteknisk angiver solafskærmningsfaktoren hvor stor en del af den samlede solstråling der passerer forbi solafskærmningen og videre til bygningen. Faktoren skal derfor afspejle solafskærmningens placering (udvendig, mellem glas eller indvendig). Solafskærmningen antages at være i brug, når der er direkte sol på vinduet, uanset om der er opvarmnings- eller kølebehov i rummet.

I den konkrete bygning er der anvendt en automatisk solafskærmning med faldarmsmarkise, der både kan gå lodret for vinduerne og vippe op, f.eks. for at afskærme for høj sol om sommeren uden at lukke for udsynet. Der er manuel overstyring, så brugerne selv kan styre markiserne efter behov. Dette resulterer i solafskærmningsfaktorer, som vist i tabellen.

Tabel 22. Solafskærmningsfaktorer.

Retning	$F_c (-)$
Nord	0,52
Øst	0,36
Syd	0,24
Vest	0,17

For at vurdere i hvilken udstrækning solafskærmningen påvirker resultatet af beregningen, gennemføres der to beregninger hvor de enkelte solafskærmningsfaktorer reduceres med hhv. 15 og 30 %, således at solindfaldet i bygningen forøges, f.eks. øges solafskærmningsfaktoren for nordvendte vinduer fra 0,52 til hhv. 0,59 og 0,66 i de to varianter.

Tabel 23. Energiforbrug i MWh som funktion af solafskærmningen.

Model	Varmebehov			Elbehov		
	Rumopv.	VBV	Total	Bygningsdrift	Øvrig	Total
Grundmodel	142,6	22,6	165,2	57,8	83,7	141,5
Solafskærmning -15 %	140,4	22,6	163,0	57,8	83,7	141,5
Solafskærmning -30 %	138,2	22,6	160,8	57,3	84,2	141,5

Tabellen viser at rumopvarmningsbehovet falder ganske lidt når solafskærmningsfaktorerne stiger. Dette skyldes at køleanlægget er så effektivt (se beskrivelsen tidligere i rapporten), at selvom der kommer mere sol ind i bygningen og kølebehovet stiger, så falder opvarmningsbehovet samtidig, og resulterer i et lavere energibehov totalt set.

Det samlede energiforbrug falder med ca. 1,5 % for hvert step ændringen af solafskærmningen, og dermed viser analysen at solafskærmningen har relativt lille betydning for bygningens samlede energiforbrug.

I praksis bør automatikken til solafskærmningen justeres så der i de 4-5 vinter måneder tillades en større solintensitet før solafskærmningen kører ned, da solindfaldet i denne periode er ønskeligt.

Analysen af solafskærmningsfaktorens betydning for bygningens energiforbrug er kraftigt påvirket af køleanlæggets høje COP, og dermed kan analysens resultater ikke umiddelbart overføres til andre bygninger.

Internt varmetilskud

Antallet af personer i bygningen påvirker det interne varmetilskud, dels pga. den varme personerne i sig selv afgiver og dels via det varmetilskud der kommer fra apparater mv. som personerne benytter. Ved beregning af kontorbygningers energiforbrug anvendes normalt $4,0 \text{ W/m}^2$ for personer og $6,0 \text{ W/m}^2$ for apparatur mv., dvs. totalt 10 W/m^2 . Hvis det interne varmetilskud er lavere end 10 W/m^2 , f.eks. fordi der er færre personer i bygningen, de er mindre til stede end antaget eller hvis apparaterne i bygningen afgiver mindre varme end antaget, så vil den tilsvarende varmemængde (i fyringssæsonen) skulle leveres af varmeanlægget.

En reduktion af det interne varmetilskud på 1 W/m^2 svarer for en bygning på 5506 m^2 til 5506 W , hvilket over et år bliver til ca. 48.000 kWh , eller ca. $8,8 \text{ kWh/m}^2$ uafhængigt af bygningens samlede energiforbrug. Afvigelser i det interne varmetilskud vil dermed have en relativt større indflydelse i bygninger med lavt energiforbrug, og derfor er parameteren af større betydning i lavenergibyggeri som f.eks. nybyggeri eller i byggeri som energirenoveres.

I udgangspunktet er der for bygningen anvendt et internt varmetilskud på $2,45 \text{ W/m}^2$ for personer (ca. 150 personer) og $3,50 \text{ W/m}^2$ for apparatur i brugstiden samt et varmetilskud på $1,00 \text{ W/m}^2$ for apparatur om natten.

De $3,50 \text{ W/m}^2$ der anvendes for apparatur er fastlagt ved at sammenholde beregningen med målingen af det totale elforbrug. Der er altså først lagt belysning samt øvrige elforbrug ind i beregningsmodellen, og derefter er niveauet for det interne varmetilskud tilpasset således at det totale beregnede elforbrug passer med det totale målte. Det interne varmetilskud fra apparatur i brugstiden er i virkeligheden nok en smule lavere, idet der ikke er taget højde for de dele af elforbruget som ligger udenfor den normale energiberegning (f.eks. elevatorer, udendørs belysning mv.).

Bygningen indeholder både en kontordel og en daginstitutionsdel. Kontor delen benyttes af UNI•C, som har ca. 190 medarbejdere tilknyttet bygningen. Institutionen består af en vuggestue med 12 børn og to børnehavegrupper med hver 20 børn. Det antages at der er ca. 14 pædagoger i institutionen.

I analyserne varieres det samlede interne varmetilskud i brugstiden fra $4,15 \text{ W/m}^2$ til $7,80 \text{ W/m}^2$, og der anvendes en fordelingsnøgle som vist i tabellen nedenfor. Fordelingen har ingen indflydelse på resultaterne så længe der ikke er installeret el-producerende enheder som f.eks. solceller vindmøller.

Tabel 24. Fordelingsnøgle for internt varmetilskud.

Internt varmetilskud [W/m ²]	I brugstiden		Udenfor brugstiden
	Personer [W/m ²]	Apparatur [W/m ²]	Apparatur [W/m ²]
4,15	1,65	2,50	1,00
5,95	2,45	3,50	1,00
7,80	3,30	4,50	1,00

For personer svarer værdierne i tabellen til at der er ca. 100, 150 eller 200 personer til stede i gennemsnit i brugstiden, og for apparatur svarer værdierne til at der er 25 % mere eller mindre varmeafgivelse end for en gennemsnitlig kontorbygning.

Tabel 25. Energiforbrug i MWh som funktion af det interne varmetilskud.

Model	Varmebehov			Elbehov		
	Rumopv.	VBV	Total	Bygningsdrift	Øvrig	Total
4,15 W/m ²	155,8	22,6	178,4	57,8	69,9	127,7
Grundmodel, 5,95 W/m ²	142,6	22,6	165,2	57,8	83,7	141,5
7,80 W/m ²	129,9	22,6	152,5	57,3	98,6	155,8

Tabellen viser at det interne varmetilskud, dvs. bl.a. hvor mange personer der er til stede i bygningen i gennemsnit i brugstiden, påvirker energiforbruget i bygningen væsentligt. Hvis det interne varmetilskud er på et niveau svarende til 100 personer i stedet for 150 personer og der samtidig er ca. 25 % mindre varmeafgivelse fra apparatur end for en gennemsnitlig kontorbygning, så stiger rumopvarmningsbehovet med ca. 9 %, men samtidig falder elbehovet til øvrig el med næsten 16 %. Omvendt falder rumopvarmningsbehovet med ca. 9 % og elbehovet til øvrig el stiger med ca. 18 %, hvis der er 200 personer til stede i gennemsnit og varmeafgivelsen fra apparatur er 25 % højere end for en gennemsnitlig kontorbygning.

Analysen viser dermed at det interne varmetilskud har stor betydning for opvarmningsbehov og elforbrug i bygningen, men at de påvirkes "modsat", dvs. når elforbruget stiger så falder rumopvarmningsbehovet og omvendt. Dette er altså væsentligt i forhold til at forudsige balancen mellem varmebehov og elbehov for bygningen før/efter en energirenovering.

½ udnyttelse af solindfald og internt varmetilskud

På baggrund af målinger af energiforbruget, er der lavet en energisignatur for bygningen, se tidligere i rapporten. Energisignaturen peger på, at der er væsentligt dårligere udnyttelse af solindfaldet i bygningen end det som forudsættes i Be10 beregningen. Ud fra målingerne er solfølsomheden 0,010 MWh-varme/solskinstime, mens den er 0,038 MWh-varme/solskinstime i Be10 modellen. Det kan både skyldes mindre solindfald i bygningen, brugernes reaktioner på overtemperatur i lokalerne og mangelfuld automatisk regulering. Tilsvarende gør sig gældende for udnyttelsen af det interne varmetilskud.

Der gennemføres derfor beregninger af to situationer; én hvor solindfaldet udnyttes halvt og én hvor det interne varmetilskud udnyttes halvt. Herved belyses betydningen af, at udnyttelsen af solindfald og internt varmetilskud er væsentligt lavere end forventet.

Tabel 26. Energiforbrug i MWh som funktion af udnyttelsen af solindfald/internt varmetilskud.

Model	Varmebehov			Elbehov		
	Rumopv.	VBV	Total	Bygningsdrift	Øvrig	Total
Grundmodel,	142,6	22,6	165,2	57,8	83,7	141,5
½ udnyttelse af solindfald	169,0	22,6	191,6	58,4	84,2	142,6
½ udnyttelse af internt vts.	165,7	22,6	188,3	58,4	84,2	142,6

Resultaterne i tabellen viser, at rumopvarmningsbehovet stiger med 18 % hvis solindfaldet kun udnyttes halvt. Hvis det interne varmetilskud kun udnyttes halvt stiger rumopvarmningsbehovet med ca. 16 %. Det er altså tydeligt at udnyttelsen af gratisvarmen (solindfald og internt varmetilskud) påvirker rumopvarmningsbehovet væsentligt. Hvis udnyttelsen af varmetilskuddene reduceres yderligere, svarende til de 25 % for solfølsomheden som energisignaturen antyder, så vil rumopvarmningsbehovet også stige yderligere.

Ventilationsrate (luftskifte)

Ventilationsraten (luftskiftet) i bygningen har naturligvis en betydning for det samlede energibehov, men i bygninger med varmegenvinding vil den primære ændring i energibehovet være påvirkningen af el-behovet til driften af ventilatorer og ikke i særlig høj grad påvirkningen af varmebehovet.

I den konkrete bygning er ventilationsraten fastsat ud fra behov herunder CO₂ niveau for bygningen med tidligere anvendelse som cellekontorer. Luftskiftet er dog i forbindelse med ændring til 4 personers kontorer øget fra ca. 1,2 til ca. 1,5 h⁻¹ i kontorområder beregnet i henhold til lofthøjde på 2,5 m, hvilket er muligt da indretning af mødecenter i den vestlige ende frigjorde kapacitet. Friskluftmængden per ansat er reduceret og endnu mere i forhold til intern varmelast.

Tabel 27. Ventilationsrater.

Zone	q _m (l/s pr. m ²)
Kontorer mv.	0,62
Mødelokaler	4,27 (behovstyret)
Børnehave	0,62
Kantine	1,83

Der gennemføres beregning af to alternative scenarier, svarende til at ventilationsraten er hhv. 10 % højere eller lavere end antaget.

Tabel 28. Energiforbrug i MWh som funktion af ventilationsraten i bygningen.

Model	Varmebehov			Elbehov		
	Rumopv.	VBV	Total	Bygningsdrift	Øvrig	Total
-10 %	139,3	22,6	161,9	56,2	84,2	140,4
Grundmodel,	142,6	22,6	165,2	57,8	83,7	141,5
+10 %	145,9	22,6	168,5	58,9	84,2	143,2

Tabellen viser at rumopvarmningsbehovet hhv. stiger/falder med ca. 2 % hvis ventilationsraten stiger/falder med 10 %, og samtidig stiger/falder elbehovet til bygningsdrift med ca. 3 %. Bygningens samlede energiforbrug er altså kun i beskedent omfang afhængig af eventuelle afvigelser i ventilationsraten.

Infiltration

Bygningens lufttæthed har væsentlig betydning for energibehovet, specielt i bygninger med balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding. Hvis infiltrationen er for stor, svarer det til at ventilationsanlægget "kortsluttes" og der kan ikke opnås den forventede varmegenvinding på ventilationsluften.

I den konkrete bygning er der lavet en trykprøvning for at fastlægge bygningens tæthed. Denne prøve viser at q₅₀ = 0,32 l/s pr. m² opvarmet etageareal, hvilket svarer til en infiltration på 0,0593 l/s pr. m² i brugstiden og 0,0193 l/s pr. m² udenfor brugstiden. Der hvor der kan være en usikkerhed på størrelsen af infiltrationen er altså primært på de 0,04 l/s pr. m², som dækker over åbning af døre og vinduer brugstiden.

I analyserne varierer infiltrationen i brugstiden derfor fra 0,0393 – 0,0793 l/s pr. m², svarende til at det faste bidrag er hhv. 50 % lavere eller højere end forventet. Til sammenligning er der gennemført en beregning hvor infiltrationen er fastsat til 0,13 l/s pr. m² i brugstiden og 0,09 l/s pr. m² udenfor brugs-

tiden, svarende til det nu gældende krav i Bygningsreglementet til bygningslufttæthed.

Tabel 29. Energiforbrug i MWh som funktion af infiltrationen (bygningens lufttæthed).

Model	Varmebehov			Elbehov		
	Rumopv.	VBV	Total	Bygningsdrift	Øvrig	Total
0,0393 l/s pr. m ²	138,2	22,6	160,8	57,8	83,7	141,5
Grundmod., 0,0593 l/s pr. m ²	142,6	22,6	165,2	57,8	83,7	141,5
0,0793 l/s pr. m ²	146,5	22,6	169,0	57,8	84,2	142,1
0,13 / 0,09 l/s pr. m ²	193,3	22,6	215,9	58,4	84,2	142,6

Resultaterne i tabellen viser, at afvigelser i infiltrationen, svarende til om vinduer og døre åbnes 50 % mere eller mindre end normalt antaget, får rumopvarmningsbehovet til at stige/falde med ca. 3 %. Infiltrationen har i denne analyse kun en begrænset betydning for bygningens samlede energiforbrug. Havde bygningen kun lige opfyldt kravene til lufttæthed i Bygningsreglementet, ville rumopvarmningsbehovet have været 36 % højere. Bygningens lufttæthed har altså væsentlig betydning for bygningens samlede energiforbrug – specielt når der som her er tale om en bygning som er energirenoveret til et meget lavt energiforbrug.

Kælder som opvarmet/uopvarmet rum

I bygninger med kælder er der mulighed for at medtage kælderen som opvarmet eller uopvarmet rum i bygningen. Hvis kælderen er uopvarmet er det naturligvis vigtigt at konstruktionen mellem den opvarmede del af bygningen og den ikke opvarmede del er velisoleret, så transmissionstabet reduceres mest muligt.

I den konkrete bygning er der fuld kælder, hvori bl.a. fjernvarmeveksler, varmtvandsproduktion, varmfordelingsanlæg mv. er placeret. Fjernvarmeinstallationen i bygningen er lidt speciel, idet der fra HOFORs side leveres fjernvarmedamp fremfor -vand. Via en varmeveksler placeret i kælderen, konverteres dampen til varmt vand. Denne installation er forbundet med et væsentligt varmetab, idet der før varmeveksleren er monteret en sikkerhedsventil, som sikrer at trykket i installationen ikke skaber problemer. Ventilen afgiver en væsentlig varmemængde til rummet pga. transmissionstab og stråling fra de varme damp rør. Rådgiveren har valgt ikke at bruge penge på dette nu, da det dels er ikke-målt forbrug og da centralen overgår til vandbaseret fjernvarme indenfor ca. 2-10 år.

Der gennemføres beregninger af to situationer; én hvor kælderen betragtes som uopvarmet (referencesituationen) en én hvor kælderen betragtes som opvarmet, for at belyse hvordan dette påvirker bygningens samlede energibehov.

Tabel 30. Energiforbrug i MWh i afhængighed af om kælderen regnes opvarmet/uopvarmet.

Model	Varmebehov			Elbehov		
	Rumopv.	VBV	Total	Bygningsdrift	Øvrig	Total
Grundmodel, uopv. kælder	142,6	22,6	165,2	57,8	83,7	141,5
Opvarmet kælder	148,7	22,3	171,0	58,1	83,8	142,0

Tabellen viser at bygningens rumopvarmningsbehov stiger med ca. 4 % hvis kælderen er opvarmet. Dette er selvfølgelig under forudsætning af, at det er bygningens varmeanlæg der skal opvarme kælderen. Hvis sikkerhedsventil og den øvrige installation (før måleren for fjernvarmen) leverer en væsentlig del af opvarmningen, så vil varmebehovet i kælderen være lavere.

Varmekapacitet

Bygningens varmekapacitet spiller en væsentlig rolle for hvor stor en del af det interne varmetilskud samt solindfaldet der kan nyttiggøres i forbindelse med opvarmningen af bygningen. Samtidig medfører en højere varmekapacitet også, at man på varme dage vil have mindre behov for køling. Begge disse forhold medfører, at jo større bygningens varmekapacitet er, jo lavere bliver bygningens samlede energibehov.

I den konkrete bygning, er der som udgangspunkt regnet med en varmekapacitet på 90 Wh/K pr. m². I Be10 er typiske niveauer for varmekapaciteten defineret som vist i tabel 32.

Tabel 31. Varmekapacitet for bygninger, typiske niveauer.

Beskrivelse	Indvendige konstruktioner	Varmekapacitet Wh/K m ²
Ekstra let	Lette vægge, gulve og lofter, f.eks. skelet med plader eller brædder, helt uden tunge dele	40
Middel let	Enkelte tungere dele, f.eks. betondæk med trægulv eller porebetonvægge	80
Middel tung	Flere tunge dele, f.eks. betondæk med klinker og tegl- eller klinkebetonvægge	120
Ekstra tung	Tunge vægge, gulve og lofter i beton, tegl og klinker	160

Der gennemføres beregninger hvor varmekapaciteten er hhv. lavere eller højere end udgangspunktet, svarende til hhv. 70 Wh/K pr. m² og 110 Wh/K pr. m². Det antages at bygningens effektive varmekapacitet vil ligge i dette interval, hvor sammenhængen mellem varmekapaciteten og energibehovet er tilnærmelsesvis lineær, da der ikke forekommer overtemperaturer i bygningen.

Tabel 32. Energiforbrug i MWh som funktion af bygningens varmekapacitet.

Model	Varmebehov			Elbehov		
	Rumopv.	VBV	Total	Bygningsdrift	Øvrig	Total
70 Wh/K m ²	148,1	22,6	170,7	57,8	84,2	142,1
Grundmodel, 90 Wh/K m ²	142,6	22,6	165,2	57,8	83,7	141,5
110 Wh/K m ²	138,8	22,6	161,3	57,3	84,2	141,5

Tabellen viser at bygningens varmekapacitet har en relativt lille betydning for det samlede energiforbrug. Hvis den effektive varmekapacitet er lavere end antaget stiger rumopvarmningsbehovet med ca. 4 % mens det falder med ca. 3 % hvis varmekapaciteten er højere end antaget.

Brugstid

Energiforbruget i bygningen til opvarmning, ventilation, køling, varmt brugsvand og belysning er naturligvis væsentligt større i brugstiden end uden for brugstiden. Derfor er bygningens brugstid af væsentlig betydning for det samlede energibehov.

Den konkrete bygning har to anvendelser; kontorbygning og daginstitution. Daginstitutionen (børnehave og vuggestue) er åben på hverdage fra 7.30 – 17.15, svarende til en brugstid på ca. 49 timer pr. uge. Det antages at brugstiden for kontordelen er ca. den samme, og derfor er der som udgangspunkt regnet med en brugstid pr. uge på 50 timer, fra 7.00 – 17.00.

Der gennemføres beregninger af to alternative scenarier; én hvor brugstiden er mindre, svarende til 45 timer pr. uge fra 8.00 – 17.00 og én hvor den er højere, svarende til 55 timer pr. uge fra 7.00 – 18.00.

Tabel 33. Energiforbrug i MWh som funktion af bygningens brugstid.

Model	Varmebehov			Elbehov		
	Rumopv.	VBV	Total	Bygningsdrift	Øvrig	Total
Brugstid 8.00 – 17.00	144,3	22,6	166,8	52,3	80,9	133,2
Grundmodel, 7.00 – 17.00	142,6	22,6	165,2	57,8	83,7	141,5
Brugstid 7.00 – 18.00	140,4	22,6	163,0	63,3	87,5	150,9

Tabellen viser at rumopvarmningsbehovet stiger/falder med ca. 1,5 %, når brugstiden hhv. falder/stiger med 5 timer pr. uge. Årsagen til dette er at det interne varmetilskud falder når brugstiden reduceres, og dermed stiger rumopvarmningsbehovet. Til gengæld stiger/falder det samlede elbehov med ca. 6 % når brugstiden stiger/falder, og dermed falder det samlede energibehov for bygningen når brugstiden reduceres og stiger når den forøges. Afvigelser i bygningens brugstid påvirker altså primært elbehovet i bygningen, og har en relativt beskedne indflydelse på det samlede energiforbrug.

Opsummering af resultater

I det følgende opsummeres rapportens resultater.

Målt energiforbrug

For at kunne lave en sammenligning af det beregnede og målte energiforbrug for bygningen, er det nødvendigt at tage udgangspunkt i de "rensede" måledata for bygningen, dvs. måledata som er kvalificeret således at de udelukkende dækker det faktiske forbrug for Vester Voldgade 123, uden energiforbrug for andre bygninger, rørtab i jord mellem bygninger osv. Fra kapitlet vedrørende målingerne, kan følgende data derfor anvendes:

Tabel 34. Målt energiforbrug i MWh før/efter renovering.

Model	Rumopv.	VBV	Total el.
Måling, før	519,3	25,0	96,5
Måling, efter	151,2	25,0	142,4
Energibesparelse	368,1	0,00	-45,9

Beregnet energiforbrug

De beregnede energiforbrug og –besparelser er givet i afsnittet vedrørende beregninger, og i det følgende analyseres delresultaterne i beregningerne.

Rumopvarmning

I tabel 35 er opstillet beregningsresultater for rumopvarmningsbehovet før og efter energirenoveringen samt den resulterende energibesparelse. Det målte forbrug og tilhørende energibesparelse er medtaget til sammenligning.

Tabel 35. Målt/beregnet rumopvarmningsbehov før/efter energirenovering i MWh.

	Rumopv. (før)	Rumopv. (efter)	Besparelse
Målt	519,3	151,2	368,1
Indledende analyse	519,3	81,9	437,4
Be10 med standardforudsætninger	476,3	129,9	346,4
Be10 med tilpassede forudsætninger	557,3	142,6	414,7
PHPP med tilpassede forudsætninger	535,5	130,1	405,4

Betragtes resultaterne i tabellen, er det tydeligt at der er nogen forskel på de beregnede og det målte rumopvarmningsbehov, både "før" og "efter". Dette medfører naturligvis også afvigelser i de beregnede energibesparelser.

For håndberegningens vedkommende undervurderes rumopvarmningsbehovet efter energirenoveringen med ca. 48 %. Dette medfører at den beregnede energibesparelse overvurderes med ca. 45 %. Dette afspejler naturligvis at rumopvarmningsbehovet efter var et forventet forbrug og ikke et egentligt beregnet forbrug.

Be10 med standardforudsætninger giver naturligvis resultater som afspejler, at der netop benyttes standardforudsætninger for en række parametre, se tidligere i rapporten. Det beregnede forbrug inden renoveringen undervurderes med ca. 9 % og det beregnede forbrug efter undervurderes med ca. 17

% . Afvigelserne trækker (tilfældigvis) i hver sin retning, og dermed fås en beregnet forventet besparelse på rumopvarmningen som lander rimeligt præcist, svarende til en undervurdering på ca. 6 %.

Be10 med tilpassede parametre og PHPP giver nogenlunde sammenlignelige resultater (som forventet). Be10 giver generelt lidt højere rumopvarmningsbehov både før og efter energirenoveringen. Sammenlignes med de målte resultater, overvurderer begge metoder forbruget før renoveringen og de undervurderer begge forbruget efter renoveringen. I modsætning til hvad der gjorde sig gældende for Be10 med standardforudsætninger, trækker disse resultater i samme retning, og afvigelsen på den beregnede energibesparelse bliver derfor ca. 9 – 10 %. Beregningerne med hhv. Be10 med tilpassede parametre og tilsvarende for PHPP, giver altså resultater som er tættere på de målte værdier, men den beregnede besparelse får en større afvigelse end for Be10 med standardparametre.

Varmt brugsvand

I tabel 36 er opstillet beregningsresultater for forbruget af varmt brugsvand før og efter energirenoveringen samt den resulterende beregnede energibesparelse.

Tabel 36. Målt/beregnet energibehov til varmt brugsvand før/efter energirenovering i MWh.

	VBV (før)	VBV (efter)	Besparelse
Målt	25,0	25,0	0,0
Indledende analyse	21,5	21,5	0,0
Be10 med standardforudsætninger	28,9	29,7	-0,8
Be10 med tilpassede forudsætninger	22,2	22,6	-0,4
PHPP med tilpassede forudsætninger	34,9	28,3	6,6

For den indledende analyses vedkommende, er der alene regnet på energiforbruget til opvarmning af det varme brugsvand fra 10 °C til 55 °C, og et forbrug svarende til 75 l/år pr. m² for bygningens 5505 m². Dermed er det klart at denne beregning vil give et lavere forbrug end de øvrige beregninger, hvor der også medtages tab fra varmtvandsbeholder og den øvrige varmtvandsinstallation.

Be10 med standardforudsætninger vil naturligt give et større energiforbrug til varmt brugsvand, idet der i denne model er antaget et varmtvandsforbrug på 100 l/år pr. m² opvarmet etageareal, mod 75 l/år pr. m² i Be10 modellen med tilpassede forudsætninger.

Be10 med tilpassede forudsætninger giver et energiforbrug til varmt brugsvand som ligger lidt under det målte forbrug. Her kunne man overveje om modellen burde have været tilpasset yderligere, f.eks. ved at hæve varmtvandsforbruget fra 75 l/år pr. m² til 82 l/år pr. m². Dette er dog ikke gjort, da det er vanskeligt at vurdere om det er mængden af varmt vand eller de øvrige dele af energiforbruget der i givet fald skal korrigeres. Samtidig skal det nævnes, at det målte forbrug til varmt brugsvand er vurderet ud fra relativt simple overvejelser, så det kan sagtens have været lidt højere eller lavere end 25,0 MWh.

PHPP beregningen giver et relativt højt energiforbrug til varmt brugsvand både før og efter renoveringen, og der opnås en besparelse på ca. 19 % i forbindelse med renoveringen. Der er flere grunde til at energiforbruget bliver højere for denne beregning. For det første regner PHPP med at det varme brugsvand skal opvarmes til 60 °C i stedet for 55 °C som i de øvrige metoder. Hvis man korrigerer herfor, bliver det korrigerede forbrug som vist i tabel 37.

Tabel 37. Korrigeret målt/beregnet energibehov til varmt brugsvand før/efter energirenovering i MWh.

	VBV (før)	VBV (efter)	Besparelse
Målt	25,0	25,0	25,0
Indledende analyse	21,5	21,5	0,0
Be10 med standardforudsætninger	28,9	29,7	-0,8
Be10 med tilpassede forudsætninger	22,2	22,6	-0,4
PHPP med tilpassede forudsætninger	32,5	25,4	7,1

Ændringen er altså relativt beskeden.

Hvis man opdeler beregningen af energiforbruget til varmt brugsvand for PHPP beregningen, så er det rene forbrug til opvarmning af vandet ca. 21,5 MWh før energirenoveringen og ca. 21,7 MWh efter energirenoveringen. Det resterende energiforbrug skyldes altså tab fra installationen.

I Be10 med tilpassede parametre er der kun medtaget tab fra varmtvandsbeholderen på ca. 1,8 MWh før og 0,8 MWh efter energirenoveringen, idet de øvrige tab fra installationen indgår i bygningens varmebalance. Hvis man skal sammenligne de to beregninger, bør man altså kun medtage den tilsvarende del fra PHPP, dvs. ca. 0,3 MWh både før og efter energirenoveringen, og dermed giver PHPP ca. 22,0 MWh før og 21,8 MWh efter.

Elforbrug

I tabel 38 er opstillet beregningsresultater for elforbruget før og efter energirenovering samt den resulterende beregnede energibesparelse.

Tabel 38. Beregnet totalt elforbrug før/efter energirenovering i MWh.

	Total el. (før)	Total el. (efter)	Besparelse
Målt	96,5	142,4	-45,9
Indledende analyse	-	-	-
Be10 med standardforudsætninger	163,0	164,6	-1,6
Be10 med tilpassede forudsætninger	97,5	141,5	-44,0
PHPP med tilpassede forudsætninger	99,4	141,8	-42,4

Betragtes resultaterne i tabellen, kan det ses at der er rimeligt god overensstemmelse mellem det målte og de beregnede forbrug med tilpassede parametre. Modellen hvor der benyttes standardforudsætninger giver forventeligt resultater som afviger væsentligt fra de øvrige.

Sammenligning mellem målt og beregnet energiforbrug

I tabel 39 og 40 er opstillet korrigeret beregnet og målt energiforbrug for bygningen Vester Voldgade 123 før og efter renoveringen, samt den resulterende energibesparelse. Opgørelserne er opdelt i fjernvarmeforbrug og elforbrug og er angivet i MWh, da de forskellige værktøjer benytter forskellige definitioner af arealer, og der er ikke benyttet energifaktorer for forskellige energiformer.

Tabel 39. Korrigeret målt og beregnet fjernvarmeforbrug samt energibesparelse i MWh.

	Måling	Indledende analyse	Be10 med standardforudsætninger	Be10 med tilpassede forudsætninger	PHPP med tilpassede forudsætninger
Energiforbrug før	544,3	546,4	505,2	579,5	570,4
Energiforbrug efter	176,2	103,4	159,6	165,2	158,4
Energibesparelse	368,1	437,4	345,6	414,3	412,0

Tabel 39 viser at modellerne svarende til Be10 med tilpassede parametre og PHPP med tilpassede parametre generelt giver resultater som stemmer godt overens med de tilsvarende målinger, både før og efter energirenoeringen. Før-forbruget overvurderes med ca. 3 % mens efter-forbruget undervurderes med ca. 9 %.

Be10 med standardforudsætninger giver faktisk den "bedste" vurdering af energibesparelsen, idet beregningen undervurderer energiforbruget både før og efter energirenoeringen. Afvigelserne på hhv. før-forbruget og efterforbruget er hhv. 8 % og 12 %, men det at de "trækker" i modsat retning ift. beregningen af den opnåede besparelse giver altså et "bedre" resultat. Dette må dog anses for at være rent tilfælde.

Den indledende analyse giver en væsentlig overvurdering af energibesparelsen, på trods af at der i før-situationen anvendes det faktisk målte forbrug. Dette skyldes naturligvis at efter-forbruget er væsentligt undervurderet.

Tabel 40. Korrigeret målt og beregnet elforbrug samt energibesparelse i MWh.

	Måling	Indledende analyse	Be10 med standardforudsætninger	Be10 med tilpassede forudsætninger	PHPP med tilpassede forudsætninger
Energiforbrug før	96,5	-	163,0	97,5	99,4
Energiforbrug efter	142,4	-	164,6	141,5	141,8
Energibesparelse	-45,9	-	-1,6	-44,0	-42,4

For elforbrugets vedkommende er afvigelserne mellem det målte og beregnede (tilpassede modeller) forbrug relativt små. Afvigelserne i "før-" og "efter"-forbruget er relativt beskedne, hvilket naturligvis skyldes at der i beregningsmodellerne er lavet en tilpasning af forbruget som er afstemt med det målte elforbrug.

I situationen hvor der anvendes standardparametre, giver beregningen stort set intet merforbrug af el, og de beregnede resultater ligger generelt meget langt fra de målte. Dette skyldes naturligvis at der er anvendt standardforudsætninger, svarende til f.eks. et elforbrug til apparatur på 6 W/m^2 i både før- og efter-situationen.

Sammenholder man resultaterne i tabel 39 og 40, er det tydeligt at Be10 med standardforudsætninger generelt giver misvisende resultater, mens der er god overensstemmelse mellem de målte og beregnede forbrug når man betragter Be10 og PHPP med tilpassede parametre.

Følsomhedsanalyse

Følsomhedsanalysen havde til formål at vurdere hvilke parametre der var mest betydende i forbindelse med de gennemførte beregninger.

Analysen viser, at den faktiske indetemperatur før og efter er en af de vigtigste parametre. For hver grad temperaturen er højere end $20 \text{ }^\circ\text{C}$, stiger det samlede energiforbrug med ca. 12 %.

Størrelsen af det interne varmetilskud har også væsentlig betydning, og hvis der f.eks. er 25 personer færre eller mere end antaget i beregningen, svarer

dette til en forøgelse/reduktion af det samlede energibehov på ca. 5 %. Jo færre personer jo højere rumopvarmningsbehov men samtidig reduceres el-behovet, og elbehovet påvirkes i højere grad end rumopvarmningsbehovet.

Udnyttelsen af "gratisvarmen" er også af væsentlig betydning, og analysen af bygningens energisignatur antyder netop at bygningen ikke har udnyttet solindfald og internt varmetilskud fra personer og udstyr optimalt i første år efter energirenoveringen. Beregningerne i følsomhedsanalysen viser, at hvis varmetilskuddene kun udnyttes halvt, så stiger det samlede energibehov med ca. 18 % når der er tale om solindfald og ca. 16 % når der er tale om det interne varmetilskud fra personer og udstyr. Denne stigning i rumopvarmningsbehovet overstiger imidlertid langt afvigelsen mellem det beregnede og målte rumopvarmningsbehov, og dermed kan udnyttelsesgraden af "gratisvarmen" ikke have været helt så dårlig som energisignaturen antyder. På baggrund af de tilgængelige data er det umiddelbart vanskeligt at konkludere yderligere.

Kælderen i bygningen er som udgangspunkt regnet som uopvarmet. Hvis man i stedet regner kælderen som opvarmet, så stiger det samlede energiforbrug i bygningen kun med ca. 2 %. Det er altså mindre væsentligt i nærværende sammenhæng om kælderen regnes opvarmet eller uopvarmet.

Konklusion

Der er gennemført målinger og beregninger af energiforbruget før og efter en omfattende energirenovering for kontorbygningen beliggende Vester Voldgade 123. I tabel 41 er opstillet det faktisk målte energiforbrug og tilsvarende energibesparelse i bygningen til sammenligning med de teoretisk beregnede forbrug og besparelser.

Tabel 41. Beregnet og målt energiforbrug før/efter energirenovering.

	Før		Efter		Besparelse	
	Fjernvarme	El	Fjernvarme	El	Fjernvarme	El
Målt	544,3	96,5	176,2	142,4	368,1	-45,8
Indledende analyse	540,8	-	103,4	-	437,4	-
Be10 standard	505,2	163,0	159,6	164,6	345,6	-1,6
Be10 tilpasset	579,5	97,5	165,2	141,5	414,3	-44,0
PHPP tilpasset	570,4	99,4	158,4	141,8	412,0	-42,4

Målingerne af energiforbruget før og efter renoveringen, og dermed den opnåede energibesparelse afviger fra de tilsvarende beregnede resultater, men specielt i de to modeller hvor inddata er tilpasset til de faktiske forhold er der en rimeligt god overensstemmelse mellem målt og beregnet energiforbrug.

Beregningerne svarende til "Indledende analyse" og "Be10 med standardforudsætninger" giver naturligt resultater som vil afvige væsentligt fra målingerne – sidstnævnte fordi inputparametre til beregningerne ikke er tilstrækkeligt kvalificerede, og ikke svarede til de input som er benyttet i de andre to beregningsværktøjer med "tilpassede parametre".

De to beregninger svarende til Be10 med tilpassede parametre og PHPP med tilpassede parametre giver rimeligt ens og retvisende resultater for fjernvarmeforbruget før og efter energirenoveringen, men da forbruget før overvurderes med op til 6,5 % og forbruget efter undervurderes med op til 10 %, ender den beregnede energibesparelse med at blive ca. 12 % for høj. For det totale elforbrugs vedkommende overvurderer beregningerne førforbruget med op til 3 %, og undervurderer efter-forbruget med ca. 0,5 %. Dette betyder at det beregnede merforbrug undervurderes med op til 7,5 %.

Sammenholdes afvigelserne mellem de beregnede og det målte energiforbrug med følsomhedsanalysens resultater, er det tydeligt at afvigelserne mellem beregnet (tilpassede modeller) og målt forbrug sagtens kan forklares gennem yderligere tilpasning af inddata til programmerne. Dette er ikke gjort i nærværende analyse, da der ikke er data som kan underbygge yderligere tilpasning af modellerne. Det bemærkes i denne sammenhæng, at det netop er i før-situationen at de største (numeriske) afvigelser forekommer, og at det netop er denne situation som er beskrevet mindst detaljeret i det tilgængelige materiale.

Sammenfattende kan det altså konkluderes, at man gennem en detaljeret og omhyggelig kvalificering af inputdata til programmer som f.eks. Be10 og PHPP, kan gennemføre beregninger af energiforbrug før og efter en energirenovering, og dermed fastlægge en forventet energibesparelse rimeligt nøjagtigt.

Referencer

2011. **Bygningers energibehov (Be10)**. SBI-anvisning 213, 2. udgave. Søren Aggerholm og Karl Grau, SBI, Aalborg Universitet.

2010. **Bygningsreglement 2010**. (24.08.2011), Erhvervs- og Byggestyrelsen.

2011. **Dansk Standard 418 (DS418)**, 7. udgave, Dansk Standard.

2012 **IES Virtual Environment (IES-VE)**, Integrated Environmental Solutions Limited, Glasgow, Scotland.

2013. **Passivhaus Projektierungs-Paket (PHPP)**, Passive House Institute, Darmstadt, Germany.

Bilag

Ydervægge, tage og gulve	Areal (m ²)	U (W/m ² K)	b-faktor	T _{Dim.Ude} (°C)
Ydervæg Nordfacade med 350 mm isolering	742	0,098	1	-
Ydervæg Sydfacade med 350 mm isolering	729	0,098	1	-
Ydervæg Vestfacade 430 mm isolering, knasten, stueetage	19,1	0,081	1	-
Ydervæg Vestfacade 50 mm vacum-isolering, stueetage	21	0,38	1	-
Ydervæg Vestfacade 300 mm isolering 0-4.sal	80	0,113	1	-
Ydervæg Vestfacade 400 mm isolering, 1-4.sal	100	0,087	1	-
Ydervæg Østgavl 350 mm isolering, 0-4.sal	340	0,098	1	-
Tag med 200 mm iso	812,7	0,184	1	-
Tag mod teknikhus TN	41,2	2,264	0,7	15
Tag mod teknikhus Ventilationsrum	72,4	2,264	0,7	15
Tag mod teknikhus SF	85,7	2,264	0,7	15
Tag mod glasgang	38,3	2,264	0,7	15
Etageadskillelse mod uopvarmet kælder	1273	2,0	0,30	18,5

Tabel A1 Ydervæg specifikationer i Be10 beregning. Efter renovering.

Ydervægge, tage og gulve	Areal(m ²)	U(W/m ² K)	b-faktor	T _{Dim.Ude} (°C)
Ydervæg Nordfacade	730	1,318	1	-
Ydervæg Sydfacade	717	1,318	1	-
Ydervæg Vestfacade , knasten, stueetage	18	1,318	1	-
Ydervæg Vestfacade , stueetage	19	1,318	1	-
Ydervæg Vestfacade 0-4.sal	68	1,318	1	-
Ydervæg Vestfacade, 1-4.sal	88	1,318	1	-
Tag med 200 mm iso	812,7	0,184	1	-
Tag mod teknikhus TN	41,2	2,264	0,7	15
Tag mod teknikhus Ventilationsrum	72,4	2,264	0,7	15
Tag mod teknikhus SF	85,7	2,264	0,7	15
Tag mod glasgang	38,3	2,264	0,7	15
Etageadskillelse mod uopvarmet kælder	1204	2,0	0,41	10
Ydervæg Østgavl, 0-4.sal	330	1,318	1	-

Tabel A2. Ydervæg specifikationer i Be10. Før renovering.

Ydervægge, tage og gulve	Areal (m ²)	U (W/m ² K)
YV nord 350 mm iso	814,9	0,098
YV syd 350 mm iso	877,4	0,098
YV øst 350 mm iso	318,6	0,098
YV vest 50 mm iso	51,9	0,380
YV vest 300 mm iso	61,8	0,113
YV vest 400 mm iso	127,5	0,087
YV vest 430 mm iso	52,0	0,081
YV vest 350 mm iso	7,5	0,098
Tag over tilbygning	192,0	0,171
Tag med 200 mm iso	812,7	0,184
Kældergulv	1258,0	2,920
Tag mod teknikhus TN	41,2	2,264
Tag mod teknikhus vent	72,4	2,264
Tag mod teknikhus SF	85,7	2,264
Tag mod glasgang	38,3	2,264

Tabel A3. Ydervæg specifikationer i PHPP. Efter renovering.

Ydervægge, tage og gulve	Areal (m ²)	U (W/m ² K)
YV nord	729,9	1,318
YV syd	716,4	1,318
YV øst	330	1,318
YV vest	68,0	1,318
YV vest	88,0	1,318
YV vest	18,0	1,318
YV vest	19,0	1,318
Tag over tilbygning	192,0	0,171
Tag med 200 mm iso	812,7	0,184
Kældergulv	1258,0	2,920
Tag mod teknikhus TN	41,2	2,264
Tag mod teknikhus vent	72,4	2,264
Tag mod teknikhus SF	85,7	2,264
Tag mod glasgang	38,3	2,264

Tabel A4. Specifikationer af ydervægge i PHPP. Før renovering.

Vinduer og yderdøre	Antal	Orient	Areal (m ²)	U (W/m ² K)	b- faktor	Ff (-)	g (-)	Fc (-)
Nord vindue stuen	19	N	4,93	0,79	1	0,83	0,49	0,33
Nord vindue 1.sal	20	N	3,03	0,79	1	0,82	0,49	0,33
Nord vindue 2,3,4.Sal	60	N	4,77	0,79	1	0,82	0,49	0,33
Syd vindue 0 (stue)	17	S	2,53	0,79	1	0,832	0,49	0,16
Syd vindue 1,2,3,4	72	S	4,75	0,79	1	0,832	0,49	0,16
Vest vindue 0 (stue)	7	V	2,53	0,79	1	0,814	0,49	0,48
Vest vindue 1,2,3,4	12	V	4,75	0,79	1	0,814	0,49	0,48
Øst vindue stuen	4	Ø	4,75	0,79	1	0,814	0,49	0,33

Tabel A5. Vinduer i Be10. Efter renovering.

Vinduer og yderdøre	Antal	Orient	Areal (m ²)	U (W/m ² K)	b-faktor	Ff (-)	g (-)	Fc (-)
Nord vindue stuen	19	N	4,93	2	1	0,75	0,7	0,7
Nord vindue 1.sal	20	N	4,93	2	1	0,75	0,7	0,7
Nord vindue 2,3,4.Sal	60	N	4,93	2	1	0,75	0,7	0,7
Syd vindue 0 (stue)	17	S	4,77	2	1	0,75	0,45	0,7
Syd vindue 1,2,3,4	72	S	4,77	2	1	0,75	0,45	0,7
Vest vindue 0 (stue)	7	V	4,75	2	1	0,75	0,7	0,7
Vest vindue 1,2,3,4	12	V	4,75	2	1	0,75	0,7	0,7
Øst vindue 0(stue)	4	Ø	4,75	2	1	0,75	0,7	0,7

Tabel A6. Vinduer i Be10. Før renovering.

Skygger	Horisont (°)	Udhæng (°)	Venstre (°)	Højre (°)	Vindueshul (%)
Default	15	0	0	0	7,5
Nord facade, stuen	33	0	12	23	7,5
Nord facade, 1-sal	20	0	12	23	10
Syd facade stue	7	0	33	35	7,5
Syd facade 1-4. sal	0	0	33	35	7,5
Øst gavl, stue	35	0	7	6	7,5
Øst gavl, 1sal-4. sal	20	0	7	6	7,5
Vest gavl, stuen	56	0	40	51	7,5
Vest gavl, 1.sal	42	0	40	51	7,5
Vest gavl, resten	15	0	40	51	7,5

Tabel A7. Højre, venstre, horisontal vinkler til skyggekastende objekter i Be10. Før/efter renoveringen.

Sammenligning af beregnet og målt energiforbrug efter renovering af en stor kontorbygning viser, at det er muligt at opnå en rimeligt præcis forudsigtelse af det faktiske energiforbrug. Forudsætningen er, at man foretager en detaljeret og omhyggelig kvalificering af inputdata til det anvendte beregningsprogram. I rapporten anvendes beregningsprogrammerne Be10 og PHPP, som begge giver konsistente resultater. Det anbefales, at man ved eventuel garantistillelse gennemfører en følsomhedsanalyse, så man kan fastlægge et interval for den forventede besparelse. Rapportens beregninger og målinger er foretaget på ejendommen Vester Voldgade 123, opført i 1938 og gennemgribende renoveret i 2011.

1. udgave, 2015
ISBN 978-87-563-1682-8