

Elforsk projekt 345-002: Energisyndere i lavenergibyggeri

Spor 1: Metode til estimat af faktisk energiforbrug i designfasen og sammenligning af beregnet energibehov med faktisk målt energiforbrug.

Resume

Denne rapport beskriver en metode der kan bruges til 1) at foretage et realistisk estimat af det faktiske energiforbrug i designfasen, og 2) at foretage en fair sammenligning af beregnet energibehov med faktisk målt energiforbrug. Metoden er baseret på et sandsynlighedsprincip kaldet trepunktsestimat som er kendt fra bl.a. successiv kalkulation.

Metoden kan give et realistisk estimat af det faktiske energiforbrug til bygningsdrift i design og projekteringsfasen, men det kræver at man er velovervejende når man fastsætter det forventede, optimistiske og pessimistiske forbrug i forbindelse med trepunktsestimatet. Gør man det, er den yderligere fordel ved trepunktsestimatet, at man kan liste inputparametrene efter faldende varians (følsomhed for stigning/fald i energiforbrug) og derigennem få en prioriteret liste over hvilke parametre man bør være mest opmærksom på gennem den videre byggeproces – fra de indledende faser af designprocessen til afleveringen.

Metoden fungerer desuden som en "converter" der gør det muligt at foretage en fair sammenligning af beregnet energiforbrug (Be10) og faktisk energiforbrug. Det har i praksis vist sig vanskeligt at fremskaffe faktisk data for kommunale bygninger, primært fordi data ikke eksisterer. Hvis en bygningsejer ønsker at kunne foretage denne sammenligning skal der foregå en løbende logning af bestemte driftsdata. For at få en fornuftig sammenligning skal der foreligge et sæt driftsdata som lever op til et minimumskrav. En sammenligning der baserer sig på data der lever op til dette krav vil være behæftet med en større usikkerhed end hvis sammenligningen beror på data fra bimålere som løbende logger forbruget mere detaljeret. Bygningsejere bør medtage erfaringer fra dette projekt hvis de ønsker at eftervise om deres bygning lever op til det forventede energiforbrug, og til at forklare og udbedre eventuelle afvigelser mellem det forventede og faktisk forbrug – "energisynderne".

Forord

Denne rapport er en del af afrapporteringen for Elforsk-projektet 345-002 "Energisyndere i lavenergibyggeri". Rapporten beskæftiger sig med projektets Spor 1: Metode til estimat af faktisk energiforbrug i designfasen og sammenligning af beregnet energibehov med faktisk målt energiforbrug.

Afrapporteringen af spor 1 omfatter ud over denne rapport følgende:

- Et regneark der operationaliserer metoden beskrevet i denne rapport (NB: brugen af regnearket er en manuel og tidskrævende proces).
- Programmet Vejr10, som kan generere vejrdatafiler til Be10 ud fra timebaseret data. Det er muligt at få historisk vejrdata fra 1970 og op til i dag for et hvilken som helst globalt koordinat ved at kontakte stp@eng.au.dk.
- En rapport omhandlende en eksplicit beskrivelse beregningskernen som den er implementeret i Be10.
- En rapport omhandlende en BESTEST af Be10.
- To internationale videnskabelige conferenceartikler.

Rapporten er udarbejdet af Steffen Petersen, Aarhus Universitet (AU), stp@eng.au.dk.

Der rettes en tak til Bo Holst-Mikkelsen (projektleder, Living Strategy), Olaf Bruun Jørgensen (projektdeltager, Esbensen Rådgivende ingeniører), Navid Khalili-Tabrizi Jensen (forskningsassistent, AU), Michael Dahl Knudsen (PhD studerende, Aarhus Universitet), Thomas Jørgensen og Andreas Mølsted (tidligere studerende på AU) for deres arbejde relateret til indholdet i denne rapport. Derudover takkes Albertslund kommune, Frederiksberg Kommune, Hillerød Kommune, Horsens Kommune, Ikast-Brande Kommune, Ishøj Kommune, Silkeborg Kommune og Skanderborg Kommune for indsamling og udlevering af driftsdata fra en række af deres kommunale byggerier.

Aarhus Universitet, april 2015

Indholdsfortegnelse

Indledning	5
Metode til estimat af det faktiske energiforbrug	7
1. Fremgangsmåde	7
2. Usikkerhedsanalyse	8
2.1. Følsomhedsanalyse	10
2.1.1. OAT analyse	11
2.1.2. Vurdering af værdier til følsomheds- og usikkerhedsanalyse	12
3. Eksempel	15
Metode til sammenligning af faktisk og beregnet energiforbrug	16
4. Fremgangsmåde	16
5. Typer af driftsdata	17
5.1. Minimum data	17
5.2. Ønskedata	17
5.3. Data fra projekter	18
6. Korrektioner og usikkerheder	20
6.1. Klimadata	20
6.2. Brugeradfærd	20
6.2.1. Opvarmningssetpunkt	20
6.2.2. Brugstid og driftsfaktorer	20
6.2.3. Intern last	20
6.2.4. Ventilationsmængder	21
6.2.5. Varmtvandsforbrug	21
6.3. Beregningstekniske	21
6.3.1. Varmekapacitet	21
6.3.2. Ruders U-værdi	21
6.3.3. Infiltration	21
6.3.4. Varmeflade og varmegenvinding	21
6.3.5. Elektrisk belysning	21
6.4. Udførelse og drift	22
6.4.1. Specifikt elforbrug til lufttransport (SEL)	22
7. Eksempel	23
Konklusion	24
Referencer	25
Bilag	27

Indledning

Det har siden 2006 været et lovkrav, at nye bygningers energibehov skal leve op til bygningsreglementets energiramme. Eftervisningen af dette krav skal ske med beregningsprogrammet Be10 [1] ud fra forskellige informationer om bygningens konstruktioner og systemer, samt en række standardforudsætninger om bl.a. interne belastninger, brugstider og diverse sætpunkter. Intentionen med en Be10-beregning er at have et teoretisk benchmark til byggesagsbehandlingen, og til relativ sammenligning af forskellige bygningers energi-performance. Som sådan er Be10 ikke udviklet til at være et designværktøj, og beregningen er ikke et forsøg på at bestemme bygningers faktiske energiforbrug.

Stik imod formålet med Be10 ser man ofte, at Be10 alligevel i praksis benyttes som et designværktøj. Potentielle designbeslutninger vedrørende fx vinduesstørrelser, mængde af isolering afprøves i Be10 for at sikre at energirammen overholdes. Dermed bliver Be10-beregningen bestemmende for bygningens geometri, isoleringsevne og indeklimasystemer. Denne brug af Be10 kan være meget uheldig især hvis man ikke parallelt med Be10-beregningen også tester potentielle designbeslutningers indvirkning på krav til termisk indeklima, luftkvalitet og dagslys i et mere sofistikeret, timebaseret simuleringsværktøj.

En anden tendens fra praksis, som strider imod det oprindelige formål med Be10, er at mange bygningsejere forventer at det faktiske energiforbrug i deres bygning svarer overens med Be10-beregningen fra projekteringen af bygningen. Med andre ord, hvis Be10-beregningen kommer frem til et energibehov på 50 kWh/m² pr. år, så er det også det energiforbrug bygningsejeren forventer at bygningen har i virkeligheden. Bygningsejere bliver ofte skuffet når de foretager en sammenligning af deres beregnede energiforbrug og det de kan aflæse på deres målere. Denne sammenligning er midlertidig en meget godt eksempel på den populære talemåde "sammenligning af pærer og æbler"...

Det svært at kæmpe imod ovenstående praksis med argumenter om Be10's oprindelige intention. "Skaden er sket", og Be10 bør derfor i højere grad udvikles for at imødekomme tendenserne fra praksis. Tendenserne er et udtryk for et praktisk behov i byggebranchen: 1) et behov for simple værktøjer til design og projektering af energirigtigt byggeri med godt indeklima, 2) et behov for et værktøj der kan give et realistisk estimat af bygningers forventede energiforbrug i designfasen, og 3) et værktøj der kan foretage en fair sammenligning af det beregnede energiforbrug og det faktiske energiforbrug. Denne rapport beskæftiger sig med de to sidstnævnte behov med udgangspunkt i Be10-beregningskernen som det er i dag (kvasi-statisk beregning jf. ISO 13790 [2]). Målet er at udvikle et Be10-baseret værktøj der:

- 1) kan give et realistisk estimat af det faktiske energiforbrug til bygningsdrift i design og projekteringsfasen. Formålet er at imødegå den frustration, der findes hos bl.a. bygningsejere (eller lejere) når det går op for dem, at Be10 ikke nødvendigvis afspejler deres faktiske energiforbrug til bygningsdrift.
- 2) fungerer som "converter" der gør det muligt at foretage en fair sammenligning af beregnet energiforbrug (Be10) og faktisk energiforbrug. Denne sammenligning kan også bruges til at

forklare eventuelle afvigelser mellem det realistiske estimat og faktisk forbrug –
"energisynderne".

Rapporten giver et bud på metoder til at opnå de to ovenstående mål, og beskriver en række forudsætninger og beregningstekniker som er fundet nødvendige for at opnå målene. Brugen af metoderne illustreres gennem cases baseret på fire faktiske bygninger: tre børnehaver og en skole.

Metode til estimat af det faktiske energiforbrug

1. Fremgangsmåde

I dette afsnit beskrives den stepvise fremgangsmåde til at estimere bygningens faktiske energiforbrug ved brug af Be10 i forbindelse med design- og projekteringsfaserne.

1. Inden analysen kan gennemføres skal der foreligge en komplet Be10-beregning for bygningen. Input i denne beregning betragtes som den sandsynlige værdi, dvs. det bedste estimat af virkeligheden.
2. For hver inputparameter til Be10 identificeres der:
 - a. En værdi for parameteren der er højere end den sandsynlige værdi. Denne værdi skal være den mest pessimistiske værdi.
 - b. En værdi for parameteren der er lavere end den sandsynlige værdi. Denne værdi skal være den mest optimistiske værdi.
3. For hver inputparameter beregnes der et forventet, maksimum og minimum varme- og elbehov. Dette gøres ved at indsætte værdierne fra punkt 2 en ad gangen i Be10-beregning:
 - a. Forventet: Det forventede energibehov registreres for den oprindelige Be10-beregning fra punkt 1.
 - b. Maksimum: Indtast værdien for punkt 2a i Be10 og registrér energibehov.
 - c. Minimum: Indtast værdien for punkt 2b i Be10 og registrér energibehov.

Man kan vælge at registrere det samlede varmebehov og det samlede elbehov, eller registrere de enkelte elementer der indgår i de samlede behov. For begge tilfælde gælder det, at det skal være værdierne før de er multipliceret med primærenergifaktorerne.

NB: Husk at "nulstille" Be10-beregningen til den oprindelige Be10-beregning fra punkt 1 efter punkt 3c.

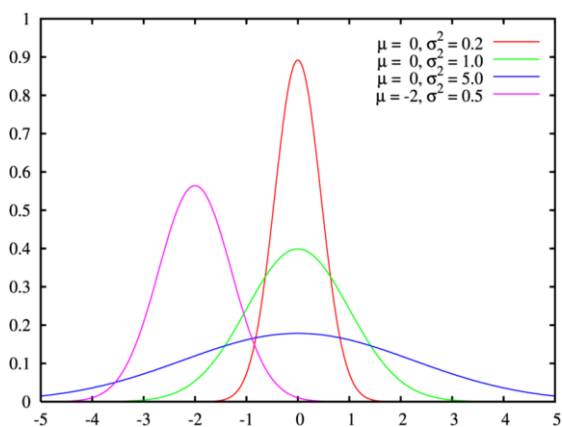
4. Resultaterne fra punkt 3 benyttes i en sandsynlighedsberegning:
 - a. Værdierne fra punkt 3 benyttes til at beregnes en middelværdi jf. ligning 1 (hvor C er punkt 3a, B er punkt 3b og A er punkt 3c), en standardafvigelse jf. ligning 2, og en varians jf. i ligning 3. Se afsnit 2 for detaljer og rationale for denne tilgang.
 - b. En samlet middelværdi, M_{total} , og en samlet standardafvigelse, S_{total} , for varme, el- og totale energibehov beregnes jf. ligning 4 og 5.
 - c. Der vælges et konfidensinterval fra Tabel 1 som vil være afhængigt af den ønskede sandsynlighed for om beregningen holder vi virkeligheden. Da det ofte er overskridelse af energirammen der er fokus på, anbefales konfidensintervallet $<M_{total} + 2S_{total}$ som med 97 % sandsynlighed er den øvre grænse for hvor bygningens totale, faktiske energiforbrug med ligger.
5. Ekstra analyse: sorter efter varians: Disse lister kan også bruges i projektering og udførelse til at holde fokus på de mest betydende parametre.

De efterfølgende afsnit præciserer indholdet at de ovennævnte trin.

2. Usikkerhedsanalyse

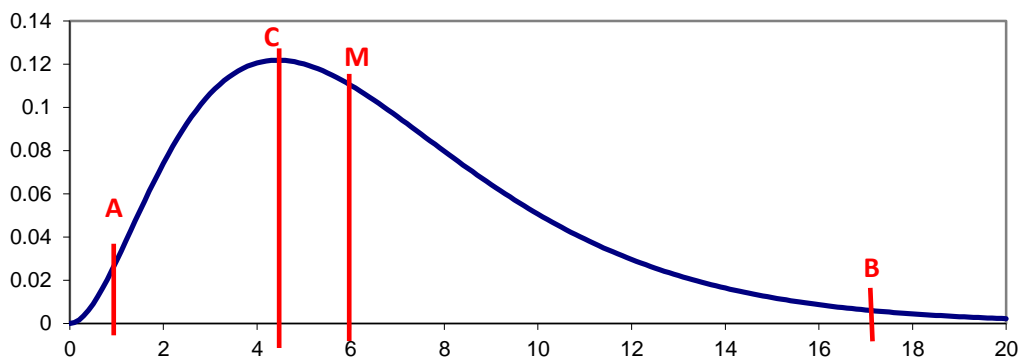
Det er ikke muligt at beregne sig frem til en eksakt værdi for en bygnings årlige energiforbrug i design- og projekteringsfasen, da et hvert bud på dette vil være behæftet med en vis usikkerhed grundet fravigelser fra beregningernes antagelser. Eksempelvis er vejrdata umuligt at forudsige præcist, og den præcise brugeradfærd vil typisk også være svær at spå om. En anden type usikkerhed er en mulig diskrepans mellem teoretisk beregnede input (fx U-værdier for konstruktioner) og de faktiske forhold i den færdige bygning.

Denne metode benytter sig derfor af en klassisk usikkerhedsanalyse til estimat af det faktiske energiforbrug. En klassisk usikkerhedsanalyse kvantificerer og fordeler usikkerheden af output fra fx en matematisk model på forskellige kilder til usikkerhed i modellens inputs. I en klassisk usikkerhedsanalyse accepterer man at fordelingsfunktionens form med god tilnærmelse kan opfattes som en Gauss-funktion eller normalfordeling (se Figur 1). Med andre ord, så accepterer man denne fordeling som en "model" for hvordan en stor mængde statistisk data er distribueret omkring deres gennemsnit.



Figur 1. Princip for Gauss-funktion eller normalfordeling. μ er middelværdi og σ er spredningen.

Desuden har det i praksis vist sig hensigtsmæssigt at anvende et såkaldt tredobbelt skøn, som i PERT metoden (Program (or Project) Evaluation and Review Technique) [3]. Men i stedet for en såkaldt beta-fordeling af data som i den oprindelige PERT metode er der en række grunde der taler for at antage den såkaldte ERLANG fordeling som en approksimation til fordelingsfunktionen [4]. ERLANG fordelingen kan igen generaliseres som en gamma distribution. Fordelingsfunktionen giver ofte en "skæv" kurve, hvor middelværdien er til højre for toppunktet, se Figur 2.



Figur 2. ERLANG fordeling generaliseret som en gamma distribution.

Heraf følger:

$$M = \frac{A + 2,9C + B}{4,9} \sim \frac{A + 3C + B}{5} \quad [1]$$

hvor M er middelværdien, A er det mest optimistiske estimat (1 % fraktilen), B er den mest pessimistiske estimat (99 % fraktilen), og C er den mest sandsynlige estimat (må ikke forveksles med 50 % fraktilen). For yderligere detaljer om denne approksimation, se [4].

Ydermere følger:

$$S = \frac{B - A}{4,6} \sim \frac{B - A}{5} \quad [2]$$

$$V = S^2 \quad [3]$$

hvor S er standard afvigelsen, og V er variansen.

Som beskrevet i indledningen af dette afsnit, så er alle input (poster) i en energiberegning som udgangspunkt behæftet med en vis usikkerhed. Ved brug af tredobbelt skøn-metoden kan beregning af den totale middelværdi og standardafvigelse for en energiberegning ske ved sammenlægninger af værdier fra usikkerhedsberegningen for de enkelte poster. Dette kan dog kun lade sig gøre hvis posterne er indbyrdes uafhængige. Undersøgelser af korrelationer mellem input parametre til Be10-beregningen har vist at disse input med god tilnærmelse kan betragtes som uafhængige af hinanden [5] [6], og dermed kan den totale middelværdi og standard afvigelse med god tilnærmelse beregnes ud fra summen af de enkelte poster¹. Heraf følger:

$$M_{total} = \sum M \quad [4]$$

$$S_{total} = \sqrt{\sum V} \quad [5]$$

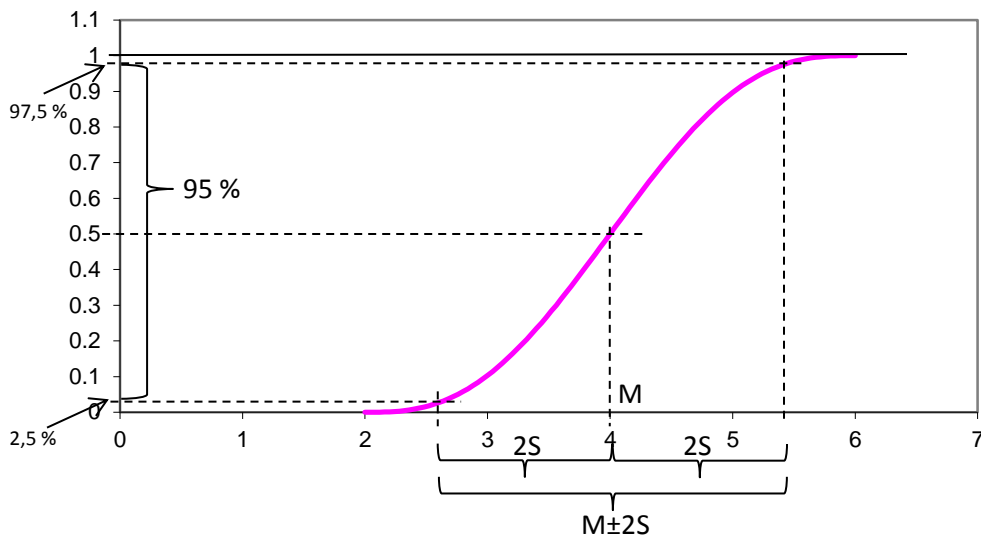
hvor M_{total} er summen af alle posters middelværdi, og S_{total} er standardafvigelsen for den totale energiberegning.

Ud fra formel 4 og 5 kan man nu opsætte forskellige (konfidens)intervaller hvoraf der kan udledes sandsynligheder, se Tabel 1. Tabellen viser, at hvis intervallet er $M_{total} \pm 2S_{total}$ vil det sige at tredobbelt skøn-metoden med 95 % sandsynlighed vil give et interval, hvori en bygnings totale energiforbrug ligger. En mere populær måde at sige det samme på er, at der er 95 % sandsynlighed for at en bygnings totale energiforbrug ligger i det fremkomne interval.

Tabel 1. Konfidensintervaller og sandsynligheder.

Interval	$M_{total} \pm S_{total}$	$< M_{total} + 2S_{total}$	$M_{total} \pm 2S_{total}$	$< M_{total} + 2S_{total}$	$M_{total} \pm 3S_{total}$	$< M_{total} + 3S_{total}$
Sandsynlighed	68 %	84 %	95 %	97 %	99 %	99,5 %

¹ Man kan overveje at medtage en vis usikkerhed i det samlede resultat grundet de mindre korrelationer mellem parametrene, men det kræver en mere udførlig analyse som sandsynligvis ikke ændrer resultatet af den samlede analyse signifikant.



For at bestemme A og B i ligning 1, benyttes en følsomhedsanalyse, se afsnit 2.1.

Metodekritik

- Der er en teoretisk risiko for at både den højere og den lavere U-værdi begge giver et højere eller lavere energiforbrug i forhold til den sandsynlige U-værdi. Eksempel: En højere U-værdi giver "højere varmekonservering – lavere køleforbrug = et højere samlet energiforbrug", en lavere U-værdi giver "lavere varmekonservering – højere køleforbrug = et højere samlet energiforbrug".
- Metoden indregner usikkerheder som er sandsynlige kan opstå i udførelsen. Der er dog stadig en risiko for dårlige estimater eller større (usandsynlige) fejl eller svigt i udførelsen som vil betyde at beregningen ikke holder.

2.1. Følsomhedsanalyse

Input-parametre til en Be10-beregning har varierende betydning for størrelsen af det samlede, beregnede energiforbrug. Nogle parametre er med til at definere en stor del af det samlede energiforbrug, fx parametre der definerer behovet for belysning og ventilation, mens andre blot definerer en lille del, fx pumper til cirkulationsledning. Men det er ikke sikkert, at de parametre der indgår i defineringen af en stor andel af energiforbruget også er de parametre som outputtet er mest følsomme over for. En sensitivitetsanalyse (eller følsomhedsanalyse) er derfor oplagt.

Følsomhedsanalyse (eller sensitivitetsanalyse) er formelt set studiet af hvordan usikkerheden af output fra fx en matematisk model kan fordeles til forskellige kilder til usikkerhed i modellens inputs. I denne metode anvendes følsomhedsanalyse til at bestemme konsekvenserne af Be10-inputparametre på outputtet i Be10-beregningen. Fremgangsmåden er som følger:

1. Bestem variationen af inputparametre

For hver inputparameter til Be10 identificeres der:

- a. En værdi for parameteren der er højere end den sandsynlige værdi. Denne værdi skal være den mest pessimistiske værdi. Den sandsynlige værdi er den oprindelige værdi i Be10-beregningen.

- b. En værdi for parameteren der er lavere end den sandsynlige værdi. Denne værdi skal være den mest optimistiske værdi. Den sandsynlige værdi er den oprindelige værdi i Be10-beregningen.

2. Udfør OAT analyse

For hver inputparameter beregnes der et forventet, maksimum og minimum varme- og elbehov. Dette gøres ved at indsætte værdierne fra punkt 1 en ad gangen i Be10-beregning:

- a. Forventet: Det forventede energibehov registreres for den oprindelige Be10-beregning.
- b. Maksimum: Indtast værdien for punkt 1a i Be10 og registrér energibehov.
- c. Minimum: Indtast værdien for punkt 1b i Be10 og registrér energibehov.

Man kan vælge at registrere det samlede varmebehov og det samlede elbehov, eller registrere de enkelte elementer der indgår i de samlede behov. For begge tilfælde gælder det, at det skal være værdierne for de er multipliceret med primærenergifaktorerne.

NB: Husk at "nulstille" Be10-beregningen til den oprindelige Be10-beregning fra punkt 1 efter punkt 2c.

2.1.1. OAT analyse

Der findes en del forskellige metoder til følsomhedsanalyse. Det vurderes at den såkaldte One-At-the-Time (OAT) analyse [7] er hensigtsmæssig til formålet i denne metode. Fremgangsmåden for OAT analyse er beskrevet i trin 2 i afsnit 1. Denne metode er blandt de mest simple sensitivitetsanalyser, og foregår ved at ændre én inputparameter ad gangen fra et bestemt minimum til et bestemt maksimum, mens øvrige inputparametre holdes konstante. Dette kaldes en lokal sensitivitetsanalyse [8] (i modsætning til en global sensitivitetsanalyse).

En potentiel svaghed ved OAT analyse er at der kan være tilfælde hvor inputværdier der ligger mellem minimum og maksimum kan give anledning til et ikke-lineært forløb af output mellem minimum- og maksimumsværdi. Et studie af Lomas og Eppel [9] viser midlertidig gennem finite difference modellering at bygningers termiske forhold praktisk taget opfører sig som lineære/superposition systemer. Der er dermed rimeligt at antage at OAT analyser i forbindelse med Be10-beregninger ikke giver anledning til usikkerhed grundet denne generelle svaghed ved OAT analyse.

En anden potentiel svaghed ved OAT analyse er at den ikke medtager, at inputparametre kan interagere. Med andre ord, kan der ske "noget"² i energibalancen i en bygning som betyder, at summen af resultater fra to forskellige OAT variationer ikke nødvendigvis er den samme som hvis begge parametre ændres samtidigt i Be10-beregningen. Som nævnt tidligere, kan input til Be10-beregningen med rimelighed betragtes uafhængige³, og derfor har denne svaghed heller ikke nævneværdig betydning for resultatet af sensitivitetsanalysen.

² Den afhængighed der kan gøre sig gældende i praksis er hvor vidt energitilskud fra sol og interne laster udnyttes mere eller mindre positivt. Problemstillingen beskrives bl.a. i [10] og behandles ikke nærmere her.

³ Det kan diskuteres om posterne i en energiberegning er "uafhængige nok". Der er en risiko for at den simplificerede beregningskerne i Be10 ignorerer reelle afhængigheder. Dette er ikke undersøgt nærmere. Erfaringsmæssigt mener vi dog at disse afhængigheder ikke mere betydende end at posterne kan betragtes som uafhængige.

En komplet OAT analyse af alle inputparametre til Be10 er en ret omfattende opgave. Der er i alt 269 parametre, og erfaringen fra dette projekt er, at det tager 8-10 timer at gennemføre denne analyse manuelt for en normal bygning. En automatiseret proces vil dog reducere tidsforbruget til få minutter, men det ligger uden for dette projekt at implementere dette. Som alternativ ses der i

Bilag

Bilag 1 et bud på hvordan man med tiden måske kan undgå en fuld parameteranalyse i forbindelse med et byggeri af samme type ved at skabe lister over betydende parametre. Lister som disse kan også bruges i hele byggeprocessen – fra de indledende faser af designprocessen til afleveringen – til at holde fokus på de mest betydende parametre.

2.1.2. Vurdering af værdier til følsomheds- og usikkerhedsanalyse

Følsomhed/usikkerhed opdeles overordnet i tre kategorier:

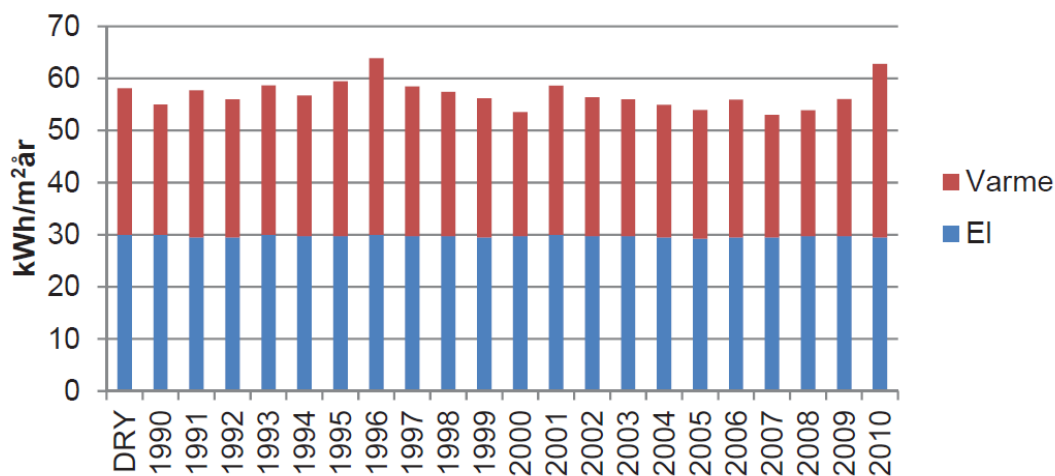
1. *Parametre* – hvor præcise/usikre er inputparametrene til Be10-beregningen?
2. *Beregningskerne* – er bygningsfysikken repræsenteret tilstrækkeligt præcist i Be10-beregningen?
3. *Fuldstændighed* – er analysen fyldestgørende og dybdegående nok? Indgår alle mekanismer og potentielle fejlkilder i analysen?

I de følgende afsnit beskrives hvordan værdier til usikkerhedsberegningen kan etableres.

2.1.2.1. Parametre

Hvad angår parametre (punkt 1), så er samtlige 269 inputparametre opremset i bilag A (elektronisk). Parametrene er for et overblik skyld inddelt i tre kategorier: "Konstruktion", "Systemer" og "Bruger". For hver af parametre er der angivet forslag til hvordan den nedre og øvre værdi (jf. punkt 1 i afsnit 2.1) kan bestemmes for den enkelte parameter.

En speciel inputparameter er vejrdata. I forbindelse med en Be10-beregning i design- og projekteringsfasen benytter man sig af en design vejrdata fil, DRY, som er et kunstigt vejrdatasæt som skal repræsentere en række forskellige kritiske situationer i det danske vejrlig. Filosofien bag brugen af DRY er, at hvis bygningen kan tilvejebringe et tilfredsstillende termisk indeklima i løbet af et DRY år, så har bygningen forudsætning for generelt at kunne tilvejebringe et godt termisk indeklima. En beregning med DRY giver i bedste fald et gennemsnitlig forventet energiforbrug for en bygning set over mange år, men det faktiske energiforbrug vil i praksis variere fra år til år. Figur 3 viser resultaterne fra Be10-beregninger for en børnehave, hvor der er benyttet hhv. DRY-vejrdata og faktisk vejrdata fra 1990-2010. Her ses et udsving på -16,4 % til +20,6 % (eller -5,1 til +5,7 kWh/m²år) for energi til varme, og tæt på 0 % for elforbruget (hvilket skyldes at der ikke er aktiv køling af bygningen).



Figur 3. Resultaterne fra Be10-beregninger med årsbestemte vejrdata for en børnehave.

Der er i dette projekt udviklet et værktøj til generering af vejrdatabaser til Be10. Værktøjet kaldes Vejr10 og kan baggrund af årligt timedata for udetemperatur, relativ fugtighed og global solindstråling skabe en inputfil til Be10. Det er muligt at få historisk vejrdatabaser fra 1970 og op til i dag for et hvilket som helst globalt koordinat ved at kontakte stp@eng.au.dk. Dermed kan man få et fornuftigt estimat af usikkerheden i energiforbrug grundet vejrdatabaser for den konkrete bygning i projekteringsfasen.

2.1.2.2. Beregningskerne

Beregningskernen i Be10 er baseret på den kvasi-stationære beregningsmetode beskrevet i ISO 13790 [2], og er derfor grundlæggende en simplificeret repræsentation af bygningsfysikken. I dette projekt er der udført en såkaldt BESTEST i henhold til ASHRAE standard 140-2011 [11] for at kvalitetssikre implementeringen af den kvasi-stationære beregningsmetode i Be10 i forhold til andre implementeringer af simplificerede algoritmer. Den samlede BESTEST fremgår af elektronisk bilag B. Konklusionen på BESTEST af Be10 er:

1. Det årlige rumopvarmningsbehov beregnet med Be10 ligger generelt inden for den opstillede usikkerhed i BESTEST – dog generelt i den lidt høje ende. Det statistiske grundlag for sammenligning i BESTESTEN er dog for svagt til at fastslå om det rent faktisk er tilfældet. Der er noget der tyder på, at Be10 overestimerer soltilskuddet, da ISO 13790 [2] tilsyneladende overestimerer den gennemsnitlige årlige g-værdi for vinduer. Det lader dog til at der kompenseres for dette gennem udnyttelsesfaktoren for varmebalancen.
Konklusion: Det vurderes at implementeringen af den kvasi-stationære model mht. beregning af energi til rumopvarmning ikke giver anledning til at tilføje beregningen nogen yderligere usikkerhed.
2. BESTEST viser, at Be10 (afhængigt af bygningens geometri og soltilskud) kan undervurdere kølebehov med op til 28 % sammenlignet med minimumgrænsen i BESTEST og overvurdere det med op til 31 % i forhold til maksimumgrænsen. Dette tyder på at implementeringen af den kvasi-stationære model er følsom når det kommer til beregning af energi til køling. Det skyldes brugen af månedsmiddelbetragtninger og udnyttelsesfaktorer i den kvasi-stationære model – især i overgangsperioderne.
Konklusion: Implementeringen af den kvasi-stationære model mht. beregning af energi til køling giver anledning til at tilføje en vis usikkerhed på Be10-beregningens resultat. Det vurderes at overskridelserne nævnt herover er det indtil videre bedste bud på denne usikkerhed. Derfor tillægges det beregnede kølebehov en usikkerhed på +31%/-28%. Omregningen af disse usikkerheder til energibehov afhænger af den konkrete bygningens kølesystemer. Detaljer om dette findes i [6] afsnit 3.1 og frem.

Simplificeringer af fysikken

Ud over robustheden af implementeringen af den kvasi-stationære metode er der usikkerheder i selve simplificeringen af fysikken, der kan betyde noget for usikkerheden af Be10-beregningen i forhold til et faktisk energiforbrug. ISO 13790 påstår i sin indledning, at metoden performer tilfredsstillende nøjagtig på årsbasis, mens der for mellemsæsonerne (forår/efterår) kan forekomme større afvigelser (dette understøttes i øvrigt BESTEST resultaterne). På trods af denne udtalelse undersøges det hvor forsimplinger i den kvasi-stationære model giver anledning til usikkerheder i forhold til mere korrekte repræsentationer af bygningsfysiske forhold.

For at kunne identificere simplificeringer og vurdere deres usikkerhed, er det nødvendigt at opnå en større forståelse for hvordan man i Be10 har implementeret den kvasi-stationære

beregningsmetode beskrevet fra ISO 13790, herunder hvordan en række fysiske forhold repræsenteres. Derfor er der som leverance til dette Elforsk-projekt udarbejdet en fuld dokumentation for Be10-beregningskernen. Ud fra denne er der identificeret en række parametre som vurderes til at være kritiske i forhold til ovenstående, se Tabel 2.

Tabel 2. Parametre som er kritiske i forhold repræsentation af bygningsfysik.

	Inputparameter	Problem	Usikkerhed
Klimaskærm	U-værdi for vinduer	Brug af statisk (deklareret) center U-værdi for glas giver forkert varmebalance.	Er væsentlig for to-lags ruder, men ikke tre-lags ruder [12]
Ventilation	Varmegenvinding og effekt til varmeplade	Baseret på månedsmiddeltemperatur, og kan derfor fejlestimere varmebehov.	Afhænger af situationen, se Bilag 2
	Infiltration	Infiltration er statisk, men afhænger i realiteten af bl.a. vejrforhold.	Se Bilag 3
Belysning	Dagslysstyring	Baseret på en simpel relation mellem dagslysfaktor og illuminans på udvendig overflade.	Se Bilag 4

Alle forhold i Tabel 2 bør der tages højde for i forbindelse med projektering for at give et mere anvendeligt estimat af bygningens forventede energiforbrug.

2.1.2.3. *Fuldstændighed*

En Be10-analyse vurderes at være fyldestgørende og dybdegående nok til sit formål. Ved at tilføje de forhold der er listet i denne rapport imødekommes flere af de mekanismer og potentielle fejlkilder som Be10 ikke tager højde for. Det er vigtigt at understrege, at Be10 oprindelige formål ikke har til mål at tage højde for disse.

3. Eksempel

I dette afsnit vises resultatet af et estimat af det faktiske energiforbrug til bygningsdrift ved brug af den beskrevne metode. Estimatet er gennemført for en børnehave fra 2010 på 1139 m² som er certificeret i det Tyske Passivhaus system. Bygningen har et Be10-beregnet energibehov (med brug af standardforudsætninger) på 39,4 kWh/m² per år (36,7 kWh/m² per år uden straf for overtemperaturer).



Estimatet af det forventede faktiske energiforbrug ud fra den beskrevne metode er $43,9 \pm 3,1$ kWh/m² per år. Estimatet viser, at bygningen med 97 % sandsynlighed har et primær energiforbrug under 50.1 kWh/m² per år. Dette er 27 % højere end Be10-beregningen med standardforudsætninger.

I afsnit 7 undersøges det om det faktiske energiforbrug lever op til dette estimat.

Metode til sammenligning af faktisk og beregnet energiforbrug

Metoden i beskrevet i dette afsnit skal fungere som en "converter" der gør det muligt at foretage en fair sammenligning af beregnet energiforbrug (Be10) og faktisk energiforbrug. Bygningsejere/lejere/brugere har derigennem mulighed for at få analyseret om deres bygnings energiforbrug svarer til det energiforbrug man kan forvente jf. de energirammeberegninger der er foretaget og godkendt inden ibrugtagningen. Metoden kan ligeledes identificere eventuelle årsager til afvigelser og unødigt energiforbrug, og stiller forslag til hvordan dette udbedres. I bedste fald bekræfter analysen, at man har den produktkvalitet som man forventer.

4. Fremgangsmåde

I dette afsnit beskrives den nødvendige fremgangsmåde for at kunne sammenligne et faktisk energiforbrug for en bygning med det Be10-beregnete energiforbrug.

1. Nødvendigt data for sammenligningen:
 - a. Faktisk energiforbrug for det pågældende år. Flere detaljer om dette i afsnit 0.
 - b. Be10-beregning af bygningen i form af xml-filen for beregningen.
 - c. Faktisk vejrdata for det pågældende år. Det er muligt at få historisk vejrdata fra 1990 og op til i dag for et hvilken som helts globalt koordinat ved at kontakte stp@eng.au.dk.
2. Foretag korrektion af Be10-beregningen og tillæg usikkerheder. Se afsnit 6.
3. Opdel det faktiske energiforbrug i samme energiposter som det Be10-beregnete energiforbrug opgøres i. Opdelingen er afhængigt af detaljegraden for det faktiske energiforbrug.
4. Undersøg om de enkelte energiposter for det faktiske energiforbrug ligger inden for de enkelte energiposter af den korrigerede Be10-beregning inklusiv usikkerheder.
5. Ligger det faktiske energiforbrug for den enkelte energipost ikke inden for den korrigerede Be10-beregning inklusiv usikkerheder, kan det have forskellige årsager. Se beregningerne i elektronisk bilag E og F for eksempler.

De efterfølgende afsnit præciserer indholdet af de ovennævnte trin.

5. Typer af driftsdata

5.1. *Minimum data*

Der er i projektet identificeret en række minimumkrav for det data der skal være til rådighed for at kunne foretage en nogenlunde rimelig sammenligning uden en alt for stor usikkerhed, som vil gøre analysen irrelevant.

- **Bygningens totale varmekonsum**
 - Energiforbrug aflæst på bygningens hovedmåler – gerne som månedsværdier.
- **Bygningens totale forbrug af brugsvand**
 - Koldvandsforbrug aflæst på hovedmåler.
- **Bygningens totale elforbrug**
 - Elforbrug på hovedmåler – minimum som timeværdier.
- **Mekanisk ventilation**
 - Målt effektoptag for ventilatorer ved maksimal luftmængde (målt SEL-værdi ved maks. luftmængde).
 - Elforbrug til ventilatordrift og/eller 1) timelogget frekvens for ventilatoren for det enkelte anlæg, 2) andet timelogget data der fortæller om ventilatorens drift for det enkelte anlæg (fx luftmængder).
- **Mekanisk køling**
 - Samlet elforbrug til kølemaskiner – gerne timeværdier.
- **Belysning**
 - Om muligt, PIR-følere aktivitet.
- **Vedvarende energi**
 - Energitilførsel fra solceller.
 - Energitilførsel fra solvarme.
 - Energitilførsel fra vindmølle.

Alle driftsdata skal være et udtryk for bygningens performance set over et samlet år.

5.2. *Ønskesdata*

Ønskescenariet er en bygning der kan give adgang til følgende data på timebasis:

- **Rumopvarmning**
 - Energiforbrug aflæst på hovedmåler
 - Energiforbrug aflæst på alle bimålere
- **Varmt brugsvand**
 - Energiforbrug aflæst på hovedmåler
 - Energiforbrug aflæst på alle bimålere
 - Vandforbrug (varmt og koldt) aflæst på hovedmåler
 - Vandforbrug (varmt og koldt) aflæst på alle bimålere
- **Ventilation**
 - Styringsstrategi for det enkelte anlæg.
 - Målt effektoptag for ventilatorer ved maksimal luftmængde (målt SEL-værdi ved maks. luftmængde).
 - Elforbrug for ventilationsanlægget som helhed
 - Elforbrug til ventilatordrift og/eller timelogget frekvens for ventilatoren for det enkelte anlæg.
 - Elforbrug til automatik.

- Energiforbrug for eventuelle varmeplader.
- Energiforbrug for eventuelle køleplader.
- Elforbrug til eventuelle pumper i ventilationssystemet.
- Alle temperaturer der måtte være logget i forbindelse med ventilationen.
- **Mekanisk køling**
 - Samlet elforbrug til kølemaskiner
 - Om muligt, elforbrug på de enkelte dele fra bilmålere
- **Pumper mm**
 - Elforbrug til pumper og anden automation
- **Belysning**
 - Elforbrug til almen belysning
 - Elforbrug til arbejdsbelysning
 - PIR-følere aktivitet
 - Dagslysfølere aktivitet
- **Apparatur**
 - Bygningens samlede elforbrug fra hovedmålere og evt. bilmålere (elforbrug til apparatur kan udledes heraf hvis man har ovenstående data)
 - Om muligt, elforbrug fra bilmålere til apparatur
- **Vedvarende energi**
 - Energiproduktion fra solceller
 - Energiproduktion fra solvarme
 - Energiproduktion fra vindmølle
- **Udeklima/Indeklima**
 - Logninger af rumtemperaturer, CO₂, PIR-føler aktivitet, og eventuelt andre følere.
 - Udetemperatur, vindretning og -hastighed samt solindfald (minimum globalindstråling) fra vejstation placeret på eller tæt ved bygningen (ikke strengt nødvendigt, da model-baseret vejrdata kan fremskaffes under alle omstændigheder).

5.3. Data fra projekter

I dette projekt er der indhentet data fra i alt 11 offentlige bygninger: 2 (1) skoler, 7 (4) institutioner, og 1 (0) ældreboliger, hvoraf tallet i parentes er de bygninger der lever op til kriteriet om at have data for et helt år. Nedenstående tabel er en opgørelse over det data der er samlet sammen i dette projekt.

Byggeri	Tilgængeligt data	Manglede data	Beregning mulig?	Bemærkninger
Børnehave	<ul style="list-style-type: none"> • Be10-beregning • El (total, time) • Vand (total, måned) • Varme (total, måned) 	Data der muliggør mere præcis opsplitting af elforbrug	Ja	Stor usikkerhed omkring elforbrug til bygningsdrift
Børnehave	<ul style="list-style-type: none"> • Be10-beregning • El (total, time) • Vand (total, måned) • Varme (total, måned) 	Data der muliggør mere præcis opsplitting af elforbrug	Ja	Stor usikkerhed omkring elforbrug til bygningsdrift

Børnehave	<ul style="list-style-type: none"> • Be10-beregning • El (total, time) • Vand (total, måned) • Varme (total, måned) 	Data der muliggør mere præcis opsplitning af elforbrug	Ja	Stor usikkerhed omkring elforbrug til bygningsdrift
Børnehave	<ul style="list-style-type: none"> • Be10-beregning 	Driftdata	Nej	
Børnehave	<ul style="list-style-type: none"> • Be10-beregning • Energimærke (med faktiske forbrug) 	Mere detaljeret driftdata	Nej	
Børnehave	<ul style="list-style-type: none"> • Be10-beregning • Energimærke (med faktiske forbrug) 	Mere detaljeret driftdata	Nej	
Børnehave	<ul style="list-style-type: none"> • Be10-beregning • Varme (dag) • Vand (dag) • El (total, dag) • El, ventilation (dag) 		Ja	
Børnehave	<ul style="list-style-type: none"> • Be10-beregning • El (måned) • Vand (måned) • Varme (måned) 		Nej	Data ikke i høj nok opløsning
Ældreboliger	<ul style="list-style-type: none"> • Be10-beregning • Tegningsmateriale 	Driftdata	Nej	
Skole (tilbygning)	<ul style="list-style-type: none"> • Be10-beregning • Indetemperatur (time) • CO₂ inde (time) • Varme (måned) 	Elforbrug	Nej	Elforbrug (time) kun logget for skolen som helhed
Skole	<ul style="list-style-type: none"> • Be10-beregning • Tæthedsprøve • Energimærke (med faktisk forbrug) • Varme, radiator (måned) • Varme, vent. (måned) • Varme, total (måned) • El, ventilation (måned) • El (total, måned) • Varmt brugsvand (måned) 		Ja	Varmt brugsvand for november og december mangler

Generelt har det været svært for de deltagende kommuner at fremskaffe både Be10-beregning og driftsdata for deres bygninger. Varmeforbrug var oftest opgivet for bygningen som helhed (varme til rumopvarmning + varmt brugsvand) og som månedsværdier, hvilket lever op til minimumskravet for at kunne foretage en fornuftig analyse. Elforbrug var som hovedregel logget for bygningen som helhed (bygningens drift + apparaturer mv) og som månedsmiddelværdier. Få bygninger havde installeret bimålere, men det var kun en bygning hvor forbruget på disse målere blev logget. Alle bygningerne havde CTS-anlæg med en relevant datastrøm men kun i et tilfælde blev data logget.

6. Korrektioner og usikkerheder

Inden man kan sammenligne det faktiske energiforbrug med det Be10-beregnete forbrug, er det vigtigt at foretage en række korrektioner af Be10-beregningen. Definitionen på en korrektion er en permanent ændring af en inputparameter i Be10 eller et beregnet energibehov i Be10. De primære årsager til korrektionen er vejrforhold og/eller afvigelser mellem den faktiske brugeradfærd, simplificeringer i Be10's beregningskerne, og Be10s standardforudsætninger om adfærd. Men korrektionen kan også skyldes at det faktiske byggeri ikke er udført i henhold til de forudsætninger der er i Be10-beregningen. Fremgangsmåden for at medtage disse korrektioner er beskrevet i de efterfølgende afsnit. Det skal tilføjes, at en korrektion kan være behæftet med usikkerhed.

6.1. Klimadata

Be10-beregningen er udført med et design reference år, som vil afvige fra faktisk vejrforhold (se afsnit 2.1.2.1 for detaljer). Derfor skal design vejrdatabasen skiftes ud med en vejrdatabase for det konkrete år man ønsker at sammenligne med det faktiske forbrug.

Der er i dette projekt udviklet et værktøj til generering af vejrdatabaser til Be10. Værktøjet kaldes Vejr10 og kan baggrund af årligt timedata for udetemperatur, relativ fugtighed og global solindstråling skabe en inputfil til Be10. Vejr10 er beskrevet nøjere i elektronisk bilag D. Det er muligt at få historisk vejrdatabase fra 1970 og op til i dag for et hvilket som helst globalt koordinat ved at kontakte stp@eng.au.dk.

6.2. Brugeradfærd

6.2.1. Opvarmningssætpunkt

Kendes opvarmningssætpunkt(erne) for bygningen, kan dette korrigeres direkte i Be10. Korrektionen kan enten ske ved at indsætte et samlet opvarmningssætpunkt for beregningen som helhed, eller som en månedlig korrektion. Det er vigtigt at være opmærksom på at Be10 regner med et gennemsnitssætpunkt for opvarmningen. Det betyder, at hvis man har natsænkning til fx 18 °C og et dagsætpunkt på 22 °C, så vil sætpunktet i Be10 være ca. 20 °C. Hvis opvarmningssætpunktet er ukendt skal denne indgå som usikkerhed.

6.2.2. Brugstid og driftsfaktorer

Be10 opererer med standardantagelser om brugstid. Men brugstiden for en bygning er reelt varierende og forskellig fra bygning til bygning, hvilket kan have betydning for energiforbruget.

Det anbefales at korrigere Be10-beregningen for bygningens faktiske brugstid. Brugstiden skal korrigeres på månedsniveau og tage hensyn til daglig brugstid start og slut, og eventuel ferie, helligdage mv. Samtidig skal det undersøges om der er grundlag for at ændre driftsfaktorerne for de enkelte systemer, da disse kan være i drift udenfor brugstiden (ventilation, pumper, cirkulationstab mv.). Det kan være nødvendigt at tillægge en usikkerhed på denne korrektion, hvis der ikke er/kun er et delvist kendskab til bygningens brugstid.

6.2.3. Intern last

Be10 opererer med standardantagelser om intern varmelast fra hhv. personer og udstyr. Men lasten er reelt varierende og forskellig fra bygning til bygning, hvilket kan have betydning for energiforbruget. Man bør sikre sig allerede i forbindelse med projekteringen at give et fornuftigt estimat af størrelsen på den interne last. I forbindelse med analysen bør der

undersøges om der er en tydelig forskel på den faktiske last og den forventede, fx ved bygningsgennemgang eller interview af bygningsbrugerne. Uanset hvad er det vanskeligt at bestemme den faktiske last. Derfor bør der under alle omstændigheder tillægges en usikkerhed i forbindelse med analysen, fx +/- 15 %.

6.2.4. Ventilationsmængder

Hvis ventilationsmængden fra den faktiske bygningsdrift er kendt (dvs. at faktisk ventilationsdata er logget i et rimeligt interval), og hvis der er en forskel mellem den faktiske og forventede luftmængde, kan dette korrigeres direkte i Be10. NB: Det er vigtigt at forholde sig til om en eventuel afvigelse er rimelig/adfærdsbetinget, eller om der er tale om en fejl i forbindelse med driften.

Hvis der ikke er logget ventilationsdata for bygningen, og er der ikke andre beskrivelser end værdierne i Be10, skal man på anden måde verificere at luftskiftet i bygningen svarer overens til værdierne forudsat i Be10. Dette kan ske ved målinger. Dertil skal der tilføjes en usikkerhed i Be10-beregningen svarende til +/- 10 % af det dimensionerede ventilationsmængde, hvilket er en usikkerhed som ventilationsleverandører også typisk bruger og opgiver i datablade.

6.2.5. Varmtvandsforbrug

Varmtvandsforbrug er meget adfærdsbetinget. Derudover hænger forbruget også sammen den tekniske opbygning af brugsvandssystemet. Et brugsvandsanlæg med et dårligt cirkulationssystem er et eksempel. Efter at varmtvandshanen er aktiveret, kan der gå lang tid før det varme vand når frem til tappestedet. I ekstreme situationer kan det tænkes, at hanen lukkes før det varme vand er nået frem. I dette tilfælde er der dog stadig produceret varmt vand, som undergår et varmetab og derved et energitab i systemet [13]. Bilag 7 opstilles metoder til at vurdere varmtvandsforbruget i forbindelse med analyse.

6.3. Beregningstekniske

6.3.1. Varmekapacitet

Der korrigeres ved beregning iht. Annex A DS/EN ISO 13786, se Bilag 7. Metoden tager højde for de faktiske konstruktionsopbygninger, og at den aktive varmeakkumulerende del af konstruktionen anvendes. Den beregnede varmekapacitet tillægges desuden en usikkerhed på [-26 % ; 21 %]. Metoden er gældende både i projekterings- og analysesituationen.

6.3.2. Ruders U-værdi

Hvis ruden er en to-lags rude korrigeres der som vist i [12]. Er ruden en tre-lagsrude er det ikke nødvendigt med en korrektion.

6.3.3. Infiltration

Se Bilag 3.

6.3.4. Varmeflade og varmegenvinding

Se Bilag 2.

6.3.5. Elektrisk belysning

For dagslysstyring, se Bilag 4. Vedrørende benyttelsesfaktor, se Bilag 5.

Vedrørende installeret effekt anbefales det at man kontrollerer effekten af de installerede belysningskilder og retter beregningen til hvis denne afviger fra projekteringsværdierne. Dertil kan man evt. tillægge en mindre usikkerhed.

6.4. Udførelse og drift

Generelt skal der kontrolleres, at der ikke er helt åbenlyse forskelle mellem Be10-input og det faktisk udførte. Dertil kommer, at driften af bygningen kan betyde at parametrene ændrer sig.

6.4.1. Specifikt elforbrug til lufttransport (SEL)

Kendes elforbruget for ventilationsanlægget kan værdien i Be10-beregningen, og hvis der er en forskel mellem den faktiske og forventede elforbrug, kan dette forbrug korrigeres direkte i Be10. Det er dog vigtigt at forholde sig til om en eventuel afvigelse er rimelig, eller om der er tale om en fejl i forbindelse med driften.

Hvis elforbruget for ventilationsanlægget ikke kendes direkte, er fremgangsmåden som følger afhængigt af om der opereres med konstant luftmængde (CAV) eller variabel luftmængde (VAV):

1. Konstant luftmængde (CAV)

SEL-værdien ved CAV-luftmængden skal kendes.

a. SEL-målinger fra udførelsen

Der tillægges 100 J/m^3 til værdien i Be10 grundet tilsmudsning af filter.

b. Måling af SEL-værdien i forbindelse med sammenligningen

Den målte SEL-værdi indtastes i Be10, hvis den afviger fra den forudsatte. Det er dog vigtigt at forholde sig til om en eventuel afvigelse er rimelig, eller om der er tale om en fejl i forbindelse med driften.

På trods af korrektionen kan der stadig forekomme afvigelser mellem faktisk og beregnet energiforbrug. Mulige årsager til dette kan være fejl i forbindelse med driften, eller en afvigelse mellem anlæggets faktiske og forventede driftstid.

2. Variabel luftmængde (VAV)

SEL-værdien ved maksimal luftmængde skal kendes.

a. SEL-målinger fra udførelsen

Der tillægges 100 J/m^3 til værdien i Be10 grundet tilsmudsning af filter.

b. Måling af SEL-værdien i forbindelse med sammenligningen

Den målte SEL-værdi indtastes i Be10, hvis den afviger fra den forudsatte. Det er dog vigtigt at forholde sig til om en eventuel afvigelse er rimelig, eller om der er tale om en fejl i forbindelse med driften.

Det er nødvendigt med timelogget frekvens for ventilatoren for det enkelte anlæg, eller andet timelogget data der indirekte fortæller om ventilatorens drift for det enkelte anlæg (fx luftmængder) for at kunne bestemme det faktiske elforbrug til lufttransport for et VAV-anlæg. Hvis dette ikke kendes må der tillægges en usikkerhed på Be10-beregningen.

På trods af korrektionen kan der stadig forekomme afvigelser mellem faktisk og beregnet energiforbrug. Mulige årsager til dette kan være fejl i forbindelse med driften, eller en afvigelse mellem anlæggets faktiske og forventede driftstid.

7. Eksempel

Dette eksempel følger op på estimatet beregnet i afsnit 3 med en sammenligning af det faktiske energiforbrug med estimatet og et korrigeret beregnet forbrug jf. metoden beskrevet i dette kapitel. Tabel 3 indeholder resultatet af analysen. Analyse af andre bygninger kan ses i bilag E og F.

Tabel 3. Estimat og analyse af energiforbrug for børnehave.

	Estimat		Analysis	
	Be10	Forventet (97%)	Korrigeret Be10 (97%)	Faktisk
Rumopvarmning	8,4	14,8	17,4	19,4
Varmt brugsvand	11,0	17,8	21,5	21,5
Ventilation (el)	2,4	2,6	3,0	2,7
Belysning (el)	4,0	4,5	4,9	N/A
Pumper (el)	0,5	0,6	0,6	N/A
Total (primær ekskl. overophedning)	36,7	52,0	60,1	N/A

Som det kan ses af Tabel 3, så er det faktiske energiforbrug til varmt brugsvand højere end forventet. Det faktiske varmtvandsforbrug kunne udledes til at være ca. 305 l/s m² per år. Dette svarer til det pessimistiske gæt i forbindelse med estimatet (som så ikke var så pessimistisk alligevel). Den forventede værdi i estimatet var standardværdien på 100 l/s m² per år, som viste sig at ligge langt fra de faktiske. Dette viser, at det kan være vanskeligt at foretage estimater og at man skal være velovervejende når man fastsætter det forventede, optimistiske og pessimistiske forbrug.

Det faktiske energiforbrug til rumopvarmning er fremkommet ved at fratække det udledede energiforbrug til varmt brugsvand fra det samlede energiforbrug til opvarmning.

Energiberegningen er korrigeret for vejr, længere faktisk brugstid, et forhøjet opvarmningssætpunkt (jf. personalet), faktisk intern belastning. På trods af disse korrektioner er det faktiske energiforbrug til rumopvarmning stadig 2 kWh/m² per år (eller 11 %) højere end den korrigerede energiberegning. Ud fra samtale med personale i børnehaven kan det skyldes udluftning i varmesæsonen og megen trafik ud og ind af bygningen. Det er vanskeligt at fremkomme med en rimelig korrektion, men det beregnede energiforbrug rammer det faktiske hvis der tilføjes der en udluftning på ca. 0,07 l/s m² i brugstiden i vinterperioden.

Det faktiske elforbrug til ventilation blev estimeret ud fra elforbruget for bygningen som helhed, og ligger med overvejende sandsynlighed inden for det forventede forbrug. Det har ikke været muligt at udlede elforbrug til belysning og pumper ud fra elprofilen fra bygningen. Det faktiske primærenergiforbrug til varme og ventilation er 47,7 kWh/m² per år. I forhold til den korrigerede beregning, så er der 12,5 kWh/m² per år tilbage til belysning og pumper. Antages det, at værdierne fra den korrigerede beregning gælder for det faktiske energiforbrug, så bruger belysning og pumper tilsammen 13,8 kWh/m² per år hvilket er 1,3 kWh/m² per år mere end for den korrigerede beregning.

Erfaringerne fra analyserne foretaget i dette projekt er, at man skal være velovervejende når man fastsætter det forventede, optimistiske og pessimistiske forbrug i forbindelse med estimatet. Det kan være fejlagtigt at antage, at standardforudsætningerne i Be10 er et udtryk for det forventede forbrug.

Konklusion

Denne rapport beskriver en metode til at foretage et realistisk estimat af det faktiske energiforbrug i designfasen og sammenligning af beregnet energibehov med faktisk målt energiforbrug. Metoden er baseret på et sandsynlighedsprincip kaldet trepunktsestimat som er kendt fra bl.a. successiv kalkulation.

Gennemførte tests af metoden viser, at metoden kan give et realistisk estimat af det faktiske energiforbrug til bygningsdrift i design og projekteringsfasen. Det kræver dog at man er velovervejende når man fastsætter det forventede, optimistiske og pessimistiske forbrug i forbindelse med trepunktsestimatet. Det kan være fejlagtigt at antage, at standardforudsætningerne i Be10 er et udtryk for det forventede forbrug. Projekterende bør i stedet foretage en individuel analyse af især det forventede forbrug i den konkrete bygning. En fordel ved trepunktsestimatet i designfasen er, at man får en varians for alle inputparametrene til Be10. Denne varians er et udtryk for hvor følsom det Be10-beregnete energiforbrug er overfor den pågældende inputparameter. Ved at liste inputparametrene efter faldende varians får man en prioriteret liste over hvilke parametre man bør være opmærksom på gennem den videre byggeproces – fra de indledende faser af designprocessen til afleveringen.

De gennemførte tests af den del af metoden som skal fungere som "converter" der gør det muligt at foretage en fair sammenligning af beregnet energiforbrug (Be10) og faktisk energiforbrug viser at estimatet kan være ret præcist men at det også kan undervurdere det faktiske energiforbrug. Årsagen til undervurderinger er, som beskrevet overfor, fejlagtige skøn af forventede, optimistiske og pessimistiske forbrug i trepunktsestimatet. Sammenligningerne mellem beregnet og faktisk forbrug har i dette projekt generelt været vanskeliggjort af manglende data. De få bygninger hvor der levede op til minimumskravet for at kunne foretage en analyse manglede som regel en opdeling af energiforbrug i de enkelte energiposter som indgår i Be10. Dette er ikke et stort problem i fht. energi til varme, men det kan være vanskeligt at udlede energiforbrug til ventilation, lys og andet elforbrug til bygningsdrift ud fra data om bygningens samlede energiforbrug, som også indeholder apparaturer mv. En række af de undersøgte bygninger havde installeret bimålere på fx ventilationsanlæg og endda helt ude på hver enkelt stikkontakt, men der blev ikke logget data på disse, hvilket gør dem ubrugelige til analyse. Læren er, at det ikke er nok at bygningsejere stiller krav om bimålere i deres lavenergibyggeri, men at de også bør stille krav til logging af data.

Referencer

- [1] Aggerholm S. and Grau K. 2008. SBI anvisning 213: Bygningers energibehov - Pc-program og beregningsvejledning , SBI, Hørsholm Denmark.
- [2] ISO. 2008. ISO 13790, Energy performance of buildings: Calculation of energy use for space heating and cooling. Switzerland: International Organization for Standardization.
- [3] Fazar W. Program Evaluation and Review Technique, *The American Statistician* 13 (2), 1959, p.10.
- [4] Lichtenberg S. *Proactive Management of Uncertainty using the Successive Principle*, 1.edt. 2000.
- [5] Wagner M. og Madsen N. 2012. Usikkerheder ved forudsigelse af bygningers ydeevne. *M.Sc. thesis*, Aarhus University (Denmark).
- [6] Jensen N.K.T. og Jørgensen T. 2014. Koncept til sammenligning af Be10-beregnet energibehov og målt energiforbrug. *M.Sc. thesis*, Aarhus University (Denmark).
- [7] Gardner R.H., O'Niell R.V., Huff D.D., Mankin J.B. og Carney, J.H. 1980. *Application of Error Analysis to a Marsh Hydrology Model*. *Water Resource Research* 16 (4), pp. 659-664
- [8] Crick, M.J., Hill, M.D. og Charles, D. 1987. The Role of Sensitivity Analysis in Assessing Uncertainty. In: *Proceedings of an NEA workshop on uncertainty analysis for performance assessments of radioactive waste disposal systems*. Paris: OECD.
- [9] K.J. Lomas, H. Eppel. 1992. Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs, *Energy and Buildings*, 19 (1), pp. 21-44.
- [10] Crown S.W., Pate M.B. og Shapiro H.N. 1993. A method to account for energy conservation measure interactions. *ASHRAE Transactions: Research* 99, pp. 201-206
- [11] Judkoff R., Knebel B.D., Neymark J. og McDowell P.T. 2011. ANSI/ASHRAE Standard 140-2011, Atlanta: ANSI.
- [12] Petersen S. 2014. The effect of weather data on glazing U-value in building performance simulation. In: *Proceedings for 10th Nordic Symposium on Building Physics*. Sweden: Lund University.
- [13] SBI. 2009. Varmt brugsvand: Måling af forbrug og varmetab fra cirkulationsledninger, 1st edn. Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.
- [14] Andersen R.V. 2009. Occupant behaviour with regard to control of the indoor environment, PhD thesis, International Centre for Indoor Environment and Energy, Technical University of Denmark.

[15] Petersen S. 2008. Method for including detailed evaluation of daylight levels in BE06, In: Proceedings of the 8th Nordic Symposium on Building Physics, Copenhagen Denmark.

Bilag

Bilag 1: Liste over betydende parameter for energiforbrug

Et resultat af analysen i forbindelse med projekteringen (se afsnit 1) er en varians for hver input parameter til Be10. Denne varians er et udtryk for hvor følsom det Be10-beregnete energiforbrug er overfor den pågældende inputparameter. Jo mere følsom (højere varians) en parameter er, des vigtigere er det for det overordnede resultat at parameterens værdi opnås i praksis. I princippet vil rangordningen af parametre efter deres varians være forskellig fra bygning til bygning. Men når man efterhånden har udført denne type analyser for samme type byggeri kan der opstå nogle tendenser der gør, at man kan undgå at analysere samtlige inputparametre.

Nedenstående tabel er baseret på en sortering af samtlige Be10-input parametre efter varians for fem forskellige daginstitutioner. Input parametrene er opdelt i grupper ud fra følgende kriterier:

- RØD: Parametre med en varians der er i top-20 i alle fem bygninger (kritiske parametre).
- GUL: Parametre hvor minimum én bygning er i top-20 (væsentlige parametre).
- GRØN: Parametre der ikke er i top-20 for nogen af bygningerne (mindre betydende parametre).

Tallene n i tabellen angiver antallet af bygninger, der har den aktuelle parameter blandt de 20 mest betydende parametre. Den gule liste er sorteret således, at parametre med flest bygninger repræsenteret i top-20 er placeret øverst.

Med lister som den nedenstående kan man undgå en fuld parameteranalyse i forbindelse med et byggeri af samme type. Listerne kan også bruges i hele byggeprocessen – fra de indledende faser af designprocessen til afleveringen – til at holde fokus på de mest betydende parametre.

Parametre der <u>skal</u> undersøges, <u>Kritiske</u>	n	Parametre man <u>bør</u> undersøge, <u>Væsentlige</u>	n	Parametre man kan undlade <u>Mindre betydnende</u>	n
Varmtvandsforbrug	6	Infiltration	5	Udhæng, skygger	0
DF, indstilling K, A, U, M	6	U-værdi, vinduer	5	Horisont, skygger	0
Opvarmning setpunkt	6	Reduktionsfaktor, varmt BV	4	Samlet reduktionsfaktor (A, V, T, K), pumper	0
Normal brugstid	6	U-værdi, ydervæg	4	Virkningsgrad (fuldlast), kedel	0
VGW, ventilation	6	Vindueshul, skygger	3	Samlet areal, vinduer	0
Varmekapacitet	6	Ønsket temp, setpunkt	3	Andel til rum, kedel	0
Mekanisk ventilation, vinter	6	Internt varmetilskud, app	3	Samlet Nom. effekt (A, V, T, K), pumper	0
SEL	6	Internt varmetilskud, personer	3	U-værdi, terrændæk u/ gulvvarme	0
Almin inst. belysning, indstilling K, A, U, M	6	Naturlig ventilation, sommer	3	Rotation	0
Opvarmet etageareal	6	Arbejdsbelysning, indstilling K	3	Areal, ydervæg	0
Benyttelsesfaktor F_0 , belysning, indstilling K, A, U, M	6	Varmetabskoefficient, cirkulation	2	Areal, tag	0
Nominel COP (bv), VP	2	G-værdi, vinduer	2	Areal, terrændæk u/ gulvvarme	0
Nominel COP (opv), VP	2	Naturlig ventilation, vinter	2	Linjetab, fundament u/gulvvarme	0
Rel COP ved 50 % last (opv), VP	2	Glasandel F_g , vinduer	2	Areal, terrændæk m/ gulvvarme	0
		U-værdi, tag	2	U-værdi, kældervæg under bygningen	0
		U-værdi, terrændæk m/ gulvvarme	2	U-værdi, kældervæg mod det fri	0
		Rørlængde, cirkulation	2	Højre, skygger	0
		Varmetabskoefficient, cirkulation	2	Mekanisk ventilation, sommer	0
		Linjetab, kælder	1	Nominel effekt, kedel	0
		Virkningsgrad (dellast), kedel	1	Korrektion (dellast), kedel	0

Bilag 2: Varmegenvinding og varmeflade

Be10 anvender en temperaturvirkningsgrad til at bestemme hvornår varmegenvindingen (VGV) ikke resulterer i en tilstrækkelig høj indblæsningstemperatur, og at varmefladen dermed aktiveres. Temperaturvirkningsgraden er defineret som:

$$\eta_t = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1}$$

hvor t_1 er udeluftens temperatur før VGV [$^{\circ}\text{C}$], t_2 er udeluftens temperatur efter VGV [$^{\circ}\text{C}$] (månedsmiddel i Be10), t_3 er temperaturen på afkastningsluften før VGV (sætpunkt for rumopvarmning i Be10) [$^{\circ}\text{C}$] og η_t er temperaturvirkningsgrad [-].

Jf. Aggerholm og Grau [1] er virkningsgraden kun bestemt ud fra udeluftens temperaturstigning. Der er ikke taget højde for temperaturstigning fra eksempelvis ventilatorer.

I det følgende undersøges betydningen af at Be10 anvender en månedsmiddeltemperatur til at beregne varmefladens energiforbrug frem for en timeværdi. Beregningen gennemføres for en fiktiv case. Følgende data er brugt:

- $Q_m = 0,78 \text{ l/s m}^2$
- Ønsket indblæsningstemperatur = $18 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $\eta_t = 0,83$
- Opvarmningssetpunkt = $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Brugstid: Hverdage 8-17
- Areal = 1139 m^2

Varmefladens energibehov:

$$E = C_{p_{\text{luft}}} \cdot \rho_{\text{luft}} \cdot q_m \cdot A \cdot GT \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{l}}$$

hvor E er energibehov til varmefladen [$\text{kWh}/\text{år}$], $C_{p_{\text{luft}}}$ er varmekapacitet for luft [J/kgK], ρ_{luft} er densitet for luft [kg/m^3], q_m Ventilationsrate [l/s m^2], A er opvarmet etageareal [m^2], og GT Grad-timetal [$\text{Khr}/\text{år}$].

GT beregnes for som månedssummen af differensen mellem $18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ og temperaturen efter veksleren beregnet for hver time. Timen tæller kun med når temperaturen efter VGV er lavere end $18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ og hvis timen er en del af brugstiden. Beregningen foretages for årene 1990 til 2010 for at bestemme forskellen mellem en beregning på timeværdi, inden for brugstiden, og en månedsmiddelværdi i Be10, se tabel A.

Tabel A: Forskellen mellem en beregning på timeværdi (inden for brugstiden) og en månedsmiddelværdi i Be10

År	DRY	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
GT [K·hr]	1114	773	1109	918	1147	1002	1280	1707	1140	1023	997
Energi beregnet [kWh]	1192	827	1187	983	1228	1072	1370	1827	1220	1095	1067
Energi jf. Be10 [kWh]	1310	870	1170	1000	1210	1040	1380	1710	1290	1090	1050
Afvigelse [%]	-9,90	-5,20	1,43	-1,73	1,47	2,99	-0,73	6,40	-5,74	0,46	1,59

År	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
GT [K·hr]	740	1176	1083	1304	1241	1331	1511	1207	1191	1386	2055
Energi beregnet [kWh]	793	1259	1159	1396	1328	1425	1617	1292	1275	1483	2200
Energi jf. Be10 [kWh]	770	1300	1020	1140	1010	1050	1120	780	830	1020	1690
Afvigelse [%]	2,90	-3,26	11,99	18,34	23,95	26,32	30,74	39,63	34,90	31,22	23,18

Tabel A er resultaterne fra et beregningseksempel, der viser, at der kan være store udsving i afvigelserne. I 2007 er der en forskel på næsten 40 % mellem det beregnede energibehov på timebasis og Be10's beregning vha. en månedsmiddeltemperatur. En kontrol af denne afvigelse viser, at der i månederne april - oktober kun er estimeret et behov på 10 kWh i Be10, mens behovet beregnet på timebasis er 238 kWh. Årsagen er, at der i denne periode er dage, hvor udetemperaturen er lavere end ca. 8 °C (grænsen for hvornår der er brug for varmebladen). Dette er ikke medregnet i en månedsmiddeltemperatur, hvor varmere dage vil hæve gennemsnittet.

Det understreges, at ovenstående beregning og efterfølgende beregninger af usikkerheder skal udføres for det konkrete byggeri, da det ikke er muligt at generalisere denne usikkerhed: varmebalancen varierer fra bygning til bygning. Der er udarbejdet et regneark til at foretage disse beregninger, se elektronisk bilag C.

Usikkerhed i forbindelse med projektering

Der skal tages højde for tre forskellige usikkerheder vedrørende varmebladen i projekteringsfasen:

- Usikkerhed grundet timeberegning kontra månedsmiddel
- Usikkerhed grundet vejrdata.
- Usikkerheder grundet indetemperatur

De energimæssige konsekvenser af usikkerhederne skal beregnes hver for sig.

Usikkerhed grundet timeberegning kontra månedsmiddel

Der kan være en relativ stor uoverensstemmelse mellem det beregnede energibehov til varmebladen afhængigt af, om der er tale om en månedsmiddelberegning (Be10) eller en timebaseret beregning. Usikkerheden fremgår af nedenstående tabel på baggrund af tabel A. Selvom vejrdata fra DRY giver den største negative afvigelse er denne ikke anvendt, da DRY er et referenceår. Usikkerhederne i nedenstående tabel er på baggrund af en antaget afkasttemperatur på 20 °C.

Minimum	Be10	Maksimum
- 5,74 %	-	39,63 %

Usikkerhed grundet vejrdata.

Foruden beregningsmetoden skal der tillægges en usikkerhed grundet skiftende vejr. Til dette anvendes det beregnede energibehov i tabel A, hvor det største og mindste energibehov gennem årene sammenlignes med DRY. Minimumsbehovet fra år 2000 er på 793 kWh, mens det maksimale behov fra år 2010 er 2200 kWh. Disse behov sammenlignes med behovet for DRY, som er 1192 kWh, hvoraf afvigelserne fremgår af nedenstående tabel.

Minimum	DRY	Maksimum
-33,47 %	-	84,56 %

Usikkerheder grundet indetemperatur

Ændring af indetemperaturen vil ændre varmegenvindingens ydelse. Nedenstående tabel viser afvigelserne for varmepladens energiforbrug i forhold til en månedsmiddelindetemperatur på 20 °C, da dette er standardindstillingen for afkasttemperaturen.

Indetemp, t_3	19,5 °C	20,0 °C	21,0 °C	22,0 °C
Middel energibehov [kWh]	2668	1286	423	77
Afvigelse fra 20 °C	107,44 %	0	-67,10 %	-94,03 %

Usikkerhed i forbindelse med analyse

Vurdering af energiforbrug til varmepladen når faktisk energiforbrug skal sammenlignes med beregnet energiforbrug afhænger af om indetemperaturene er kendte eller ikke kendte.

Ukendt indeklimadata: Energibehov beregnes på timebasis med faktisk vejrdata med en indetemperatur på 20 °C. Dernæst tages der højde for usikkerhed i indetemperatur som følger:

Indetemp.	Temp _{min}	Temp _{sand}	Temp _{maks}
Timebaseret energibehov	Time _{min}	Time _{sand}	Time _{max}
Be10 beregnet energibehov	Be10 _{min}	Be10 _{sand}	Be10 _{max}
Differens	Time _{min} - Be10 _{min}	Time _{sand} - Be10 _{sand}	Time _{max} - Be10 _{max}

Kendt indeklimadata: Kendes vejrdata og indeklimadata, kan et korrekt energibehov til varmepladen beregnes. Dette gøres ved at indlæse en vejrfil i elektronisk bilag C, og ændre afkasttemperaturen til de kendte temperaturer.

Bilag 3: Infiltration

Infiltration er ukontrollerede luftstrømme ind gennem utætheder i bygningens klimaskærm. Infiltrationen drevet af en trykdifferens over klimaskærmen, som afhænger af en lang række faktorer:

- Vindhastighed
- Vindretning
- Bygningens udformning
- Luftstrømningsforholdene omkring bygningen
- Omkringliggende bygninger
- Landskabets topografi
- Temperatur

Den temperaturdrevne infiltration forekommer i højere grad ved høje bygninger og bygninger med høje rum, pga. temperaturdifferenser over klimaskærmen, da opvarmning vil få luft til at stige til vejrs, og skabe et undertryk i bunden af bygningen (i forhold til udenfor), som vil udlignes ved infiltration.

Infiltration er et relativt kompliceret fænomen at beskrive, og endnu mere svært at generalisere. I Be10 medregnes infiltrationen som en fast standardværdi i og udenfor brugstiden. Inden for brugstiden medregnes et tillæg, der tager hensyn til at brugerne kan åbne vinduer og døre – en slags adfærdsbetinget infiltration. For trykprøvede bygninger er det endvidere muligt at anvende den dokumenterede tæthed i Be10. Dette er alt andet lige en simplificering af de fysiske, dynamiske forhold vedrørende infiltration.

Den dynamiske infiltrationsrate kan beregnes med en omskrivning af modellen for infiltration i BSim:

$$n_{infiltration} = c_t(t_i - t_u)^{t_p} + c_v \cdot v \quad (1)$$

hvor $n_{infiltration}$ er luftskifte [1/h], t_i er operativ temperatur [°C], t_u er udetemperatur [°C], t_p er temperaturpotens [-], c_t er en konstant afhængig af bygningsåbninger [-], c_v er en konstant afhængig af geometri, terræn etc. [-], og v er vindhastighed [m/s].

Omskrivningen er nødvendig, da grundluftskiftet i den oprindelige formel bør udelades, ligesom de vejledende intervaller for faktorerne c_t , t_p og c_v er forældede og bør nedskaleres.

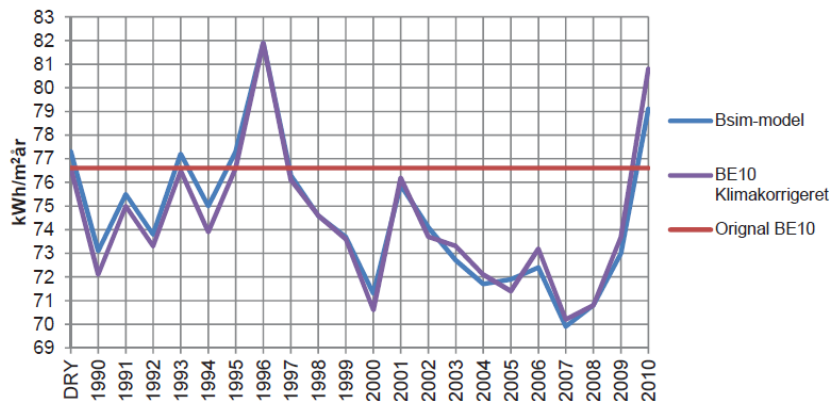
Tabel 1 viser de vejledende intervaller for faktorerne i ovenstående formel hvor der itereres med DRY data mod en $n_{infiltration}$ på 0,09 l/s m². For den simplificerede model er intervallerne nedskaleret med en skaleringsfaktor der bibeholder det oprindelige forhold mellem andelen af temperatur- og vindrevet infiltration. Skaleringen er lineær og indebærer en mindre antagelse, da eksponenten t_p i kraft at være en potens, burde nedskaleres logaritmisk. Dette vurderes dog som værende mindre væsentligt, da der ligeledes ikke korrigeres for intervallerne indbyrdes størrelse.

Tabel 1: Vejledende intervaller for faktorerne i formel 1.

	Original form	Simplificeret
t_p	0,4 - 0,7	0,0735 – 0,1287
c_t	0,1 til 5 - 7	0,0183 til 0,919 - 1,287
c_v	0,1 – 0,4	0,0183 – 0,0735

Usikkerhed i forbindelse med projektering

Fremgangsmåden for at vurdere usikkerheden ved infiltrationsmodellen i forbindelse med projektering er at bruge ovenstående model til at omregne timebaserede infiltrationsrater for vejrdata for perioden 1990 – 2010 til månedsmiddelværdier (tidsskridtet i Be10). Værdierne indsættes i Be10, måned for måned, og resultatet summeres til et årgennemsnit. Nedenstående figur viser et eksempel for en bygning.



Der kan ses en mindre forskel mellem Be10-modellen korrigeret for vejrdata (BE10 klimakorrigeret) og den mere detaljerede infiltrationsopgørelse (Bsim-model). Forskellen i dette eksempel ligger mellem $-1,1$ og $+1,7$ kWh/m² per år, og er dermed usikkerhedsintervallet for den konkrete bygning.

Usikkerhed i forbindelse med analyse

Vejrdata for det faktiske år benyttes til at beregne månedsgennemsnitlige infiltrationsrater både i og udenfor brugstiden, ved enten:

1. Ingen trykprøvning
Gennemsnit af timeværdier for infiltrationsrate med vejrdata for det pågældende år i ligning (1) og værdierne i tabel 1.
2. Trykprøvning
Gennemsnit af timeværdier for infiltrationsrate med vejrdata for det pågældende år i formel (1). Faktorer til formel (1) itereres på ny med den kendte infiltration fra trykprøvningen og DRY data.

Tillæg grundet utilsigtet udluftning

Beregningsmetoden tager ikke højde for den brugerdrevne åbning af vinduer og døre. Dette bidrag skal derfor lægges til efterfølgende i Be10-beregningen evt. jf. SBi anvisning 213 [1], dvs. at der tillægges $0,04$ l/s m² indenfor brugstiden. Den faktiske størrelse er dog svær at etablere i analysefasen. Andersen [14] undersøger den brugerdrevne åbning/lukning af vinduer i boliger, og konkluderer, at dette primært er en funktion af inde/udetemperaturen samt luftkvaliteten indenfor. Dertil kommer vejrforhold (sol, vind og luftfugtighed). Det er ikke urimeligt at antage, at det vil være anderledes når der er tale om et kontor, en skole, eller en institution. Det vil kræve nærmere undersøgelser, at kortlægge i hvilken grad brugeradfærden påvirker åbning/lukning af vinduer for en konkret bygning.

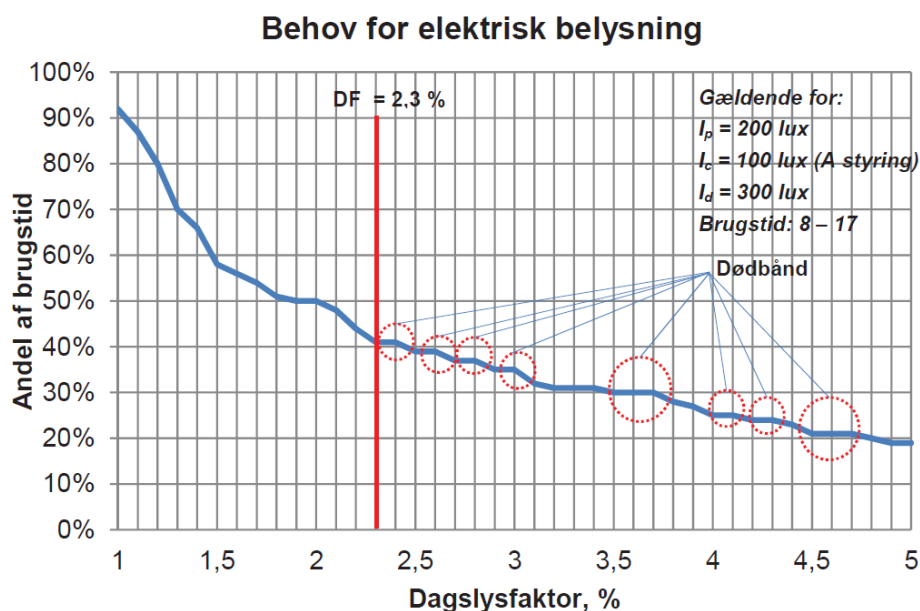
Bilag 4: Elektrisk belysning - dagslys

I Be10 beregnes energibehovet for elektrisk belysning med dagslysstyring på baggrund af en dagslysfaktor (DF) for det konkrete rum, et ønsket belysningsniveau i lux, og en brugerbestemt styring. Metoden er analyseret af Petersen [15], og her har det vist sig, at metoden kan være usikker. Det gælder især når dagslysfaktoren gange 100 er lavere end det ønskede belysningsniveau. I disse tilfælde overvurderer Be10s månedsmiddelbetragtning behovet for kunstlys i forhold til en timebaseret (lux) dagslysberegning. En mere præcis beregning af behovet for kunstlys er dog stadig en relativ kompleks beregning.

Usikkerhed i forbindelse med projektering

I nedenstående figur ses behovet for elektrisk belysning (automatisk styring) i brugstiden som funktion af dagslysfaktoren. Kurven viser, at en øget dagslysfaktor giver et mindre behov for elektrisk belysning. Forløbet fra DF = 1,0 % op til DF = 2,3 % er stejlere end resten af kurven, hvilket betyder, at en lille ændring i dagslysfaktoren har en stor betydning. I forhold til at anslå usikkerheden, vil en DF under ca. 2,3 % derfor bidrage til en større usikkerhed end for DF over 2,3 %.

Endvidere ses dødbånd, hvor en forøgelse af dagslysfaktoren ikke har en effekt.



Hvis der ikke er direkte måling af elforbrug til belysning, skal man ved sammenligning mellem faktisk og beregnet energiforbrug være opmærksom på

Bilag 5: Elektrisk belysning – benyttelsesfaktor

Benyttelsesfaktoren angiver den pågældende belysningszones benyttelsestid ift. bygningens brugstid:

$$\phi_{RegEff} = (\phi_{Almen,instl.} - \phi_{Almin,min}) \cdot F_0$$

Hvor

Φ_{RegEff} er almenbelysningens regulérbare effekt [W/m^2]

$\Phi_{almen,instl.}$ er almenbelysningens maksimale effekt [W/m^2]

$\Phi_{Almen,min}$ er almenbelysningens minimale effekt [W/m^2]

F_0 er benyttelsesfaktor [-]

Den regulérbare effekt er den værdi der indgår i beregning af en månedsmiddeleffekt for almenbelysningen i Be10.

For langt de fleste typer lokaler anbefales der jf. SBi [1] værdier i intervallet 0,7 – 1. For eksempelvis depotrum og toiletter kan der dog argumenteres for, at faktoren bør være endnu lavere. For rum med flere personer vurderes faktoren med rimelig sikkerhed, at kunne sættes lig 1, da der med stor sandsynlighed altid vil være minimum én person til stede. For andre rumtyper kan der derimod være en større tendens til variation, og det kan være vanskeligt at fastsætte en repræsentativ værdi. Faktum er, at det er et individuelt skøn, hvorfor der også skal tilknyttes usikkerheder.

Nedenstående tabel viser en følsomhedsanalyse af benyttelsesfaktoren for en række byggerier.

[kWh/m ² ·år]	Oprindeligt energibehov	Energibehov (- 20 %)	Energibehov (+ 20 %)	Afvigelse ift. oprindeligt energibehov	
				(-20 %)	(+20 %)
Sorring Børnehus	65,4	62,2	66,05	-4,89 %	0,98 %
Albertslund Nord	29,4	28,1	30,1	-4,26 %	2,49 %
Albertslund Midt	39,5	38,4	40,05	-2,78 %	1,37 %
Albertslund Syd	39,5	38,4	40,15	-2,78 %	1,62 %
Skovhuset m. VP	91,5	88,8	93,25	-3,01 %	1,88 %
Skovhuset u. VP	107,8	105,5	109,3	-2,18 %	1,37 %

De røde tal i ovenstående tabel kan benyttes som usikkerhed i den projekterende situation.

Ved analyse af et eksisterende byggeri kan timeværdier for elforbrug til belysning bruges til at korrigere beregningen for faktiske forhold. Hvis dette data ikke haves, kan der tillægges en usikkerhed på +/- 20 % på de oprindelige benyttelsesfaktorer i Be10-beregningen.

Bilag 6: Varmtvandsforbrug

Projektering

Det er vanskeligt at fastsætte varmtvandsforbruget i forbindelse med projekteringen, da det er meget adfærdsbetonet. Benyttes standardværdierne fra den grove opdeling af bygninger i boliger og ikke-boliger i forbindelse med en Be10-beregningen, hhv. 250 og 100 l/m² per år, er der risiko for både under- og overvurdering i for den enkelte bygning. Et konkret eksempel er, at en børnehave der bruger 300 l/m² per år og ikke 100 l/m² per år som er standardtallet i en Be10-beregning. Dog kan der argumenteres for at en stor del af dette varme brugsvand bruges i forbindelse med et køkken, og dermed er forbruget måske nærmere "proces" end bygningsdrift.

I forbindelse med projekteringen skal man gøre et forsøg på at estimere et varmtvandsforbrug for den konkrete bygning med respekt for bygningens funktion. Alternativet er at bruge et stort spænd mellem forventet, pessimistisk og optimistisk værdier i trepunkts-estimeringen af usikkerheden.

Analyse

Der er identificeret to forskellige måder at korrigere Be10-beregningen for faktisk energiforbrug til varmt brugsvand.

Metode 1: Et faktisk målt varmtvandsforbrug

Såfremt der er et registreret varmtvandsforbrug, anvendes denne værdi som en direkte korrektion af værdien i Be10-beregningen. Dette er den mest sikre korrektion.

Metode 2: Beregning af varmtvandsforbruget på baggrund af andet målerdata

Kendes varmtvandsforbruget ikke direkte, kan der foretages en vurdering ud fra varmemeforbruget i en sommermåned (ingen rumopvarmning). Det kan antages, at det totale varmemeforbrug i måneden alene er grundet produktion af varmt brugsvand, og ikke rumopvarmning. De månedlige variationer i varmtvandsforbruget antages at være begrænsede, hvorfor det pågældende energibehov multipliceres med 12 måneder. Måneden skal helst afspejle bygningens normale brugssituation. Såfremt dette ikke er muligt (fx hvis bygningen er lukket i store dele af perioden uden for opvarmningssæsonen) er metoden ikke anvendelig. Med udgangspunkt i varmemængden fra den givne sommermåned, skal energimængden til opvarmning af det varme vand isoleres. Dette indebærer, at der foretages skøn vedrørende fordelingen af energi til opvarmning af vand og varmetab fra installationer.

Bilag 7: Udnyttelig termisk masse

Beregningen af den udnyttelige termiske masse tager udgangspunkt i DS/EN ISO 13786 Annex A med følgende forudsætninger:

- Varmekapacitet af interiør, indervægge, etc. medregnes ikke.
- Beregning foretages iht. metode A.2.4, da beregningsforudsætningerne i A.2.2 og A.2.3 ikke er opfyldt.
- Den effektive tykkelse af det varmeakkumulerende lag, d_T , fastsættes som den mindste værdi af:
 - Halvdelen af tykkelsen på komponenten.
 - Tykkelsen af lag(ene) mellem indvendig overflade og det første isolerende lag
 - Den maksimale effektive tykkelse afhængig af svingningsperioden (fastsættes iht. tabel A.1, Annex A DS/EN ISO 13786).

Beregningen foretages for hver enkelt konstruktionsdel: ydervæg-, gulv- og loftskonstruktion. Formel A.3, Annex A anvendes:

$$k_m = \sum_i \rho_i d_i c_i \quad \text{for} \quad \sum_i d_i = d_T$$

ρ	Massefylde, varmeakkumulerende lag	[kg/m ³]
d_i	Tykkelse, varmeakkumulerende lag	[m]
c_i	Specifik varmekapacitet, varmeakk. lag	[J/kgK]
d_T	Effektiv tykkelse af varmeakk. lag	[m]

Den samlede varmekapacitet for bygningen opsummeres efterfølgende. Der foretages en korrektion for den indvendige overgangsisolans, ved formel A.4 i Annex A DS/EN ISO 13786:

$$k'_m = \sqrt{\frac{k_m^2}{1 + \omega^2 k_m^2 (R + R_i)^2}}$$

k'_m	Korrigeret arealmæssig varmekapacitet	[J/m ² K]
ω	Vinkelfrekvens	[rad/s]
R	Isolansen, lag ifm.. varmeakk. Overflade	[m ² K/W]
R_i	Overgangsisolans	[m ² K/W]

Isolans ifm. den varmeakkumulerende overflade dækker over inventar, nedhængte lofter, el lignende der kan have en dæmpende effekt overfor varmeledningen ved overfladen. I dette tilfælde sættes denne lig nul, da der som oftes ikke haves nogen indsigt i den faktiske situation i byggeriet. Værdier for overgangsisolanser fastsættes iht. tabel 6.2 DS418.