



# **Smart Cities Accelerator+**

## **Arbejdspakke 3.3 og 3.4 – Kortlægning af Energimæssig Ydeevne af Etageejendomme og Demonstration af værktøj i Taastrupgaard.**

Christoffer Rasmussen, Jan Ingrish, Peder Bacher.

September 2022

**Smart Cities Accelerator+**

Arbejdspakke 3.3 og 3.4 – Kortlægning af Energimæssig Ydeevne af Etageejendomme og Demonstration af web-værktøj i Taastrupgaard.

Rapport  
2022

Af  
Christoffer Rasmussen, Jan Ingrish, Peder Bacher.

Copyright:    Reproduction of this publication in whole or in part must include the customary bibliographic citation, including author attribution, report title, etc.

Udgivet af:    DTU, Department of Applied Mathematics and Computer Science,  
Richard Petersens Plads, Building 324, 2800 Kongens Lyngby  
Denmark  
[www.compute.dtu.dk](http://www.compute.dtu.dk)

ISSN:           [0000-0000] (electronic version)

ISBN:           [000-00-0000-000-0] (electronic version)

ISSN:           [0000-0000] (printed version)

ISBN:           [000-00-0000-000-0] (printed version)



# Preface

Denne rapport er del af projektet Smart Cities Accelerator+ (SCA+). Rapporten udgør beskrivelse af arbejdet i Arbejdspakke 3.3 og 3.4.

DTU, September 2022

Christoffer Rasmussen, Arbejdspakkeleder  
PhD ved DTU, Sektion for Dynamiske Systemer

# Indhold

Introduktion .....	6
1. Datagrundlag .....	7
2. Genskabelse af Historisk Varmeforbrug .....	8
3. Estimering af Termiske Bygningsegenskaber .....	10
4. Webinterface.....	13
5. Demonstration, Bygning 85.....	19
6. Konklusion.....	23
Referencer .....	24
Anerkendelser .....	25

# Introduktion

Boligselskabet Taastrupgaard ligger i den nordvestlige del af Taastrup tæt ved Selsmosen. Det består af 38 boligblokke og 915 lejligheder med i alt 2500 beboere. Boligtyperne spænder fra små 1-værelses lejligheder på 40 m<sup>2</sup> til 6-værelses lejligheder på op til 125 m<sup>2</sup>. Byggeriet er opført i 1973 og tegnet af Tage Nielsens Tegnesteue. Byggeriet er tidstypisk med beton som det primære byggemateriale. I Figur 1 ses Taastrupgaard fra luften.



**Figur 1:** Taastrupgaard set fra luften (nederste halvdel af billedet). Bygning 85 ses som den fritstående bygning nederst til venstre i bygningsklyngen. Kilde: Berlingske, Søren Bidstrup.

I løbet af foråret 2023 forventes renoveringen af Bygning 85 at stå færdig, og i 2030 forventes hele Taastrupgaard at være færdigrenoveret. Som demonstrationsbygning for renoveringsprocessen er Bygning 85 udvalgt. Samme bygning har været udgangspunkt i Arbejdspakke 3.1-3.4 i Smart Cities Accelerator+ (SCA+).

Baseret på data-drevne metoder er bygningens renoveringspotentiale blevet vurderet og et webinterface er udviklet til grafisk at vise de enkelte bygningers renoveringspotentiale og driftoptimeringspotentiale mht. optimal udnyttelse af varmen i varmesystemet i Taastrupgaard.

Det udviklede webinterface illustrerer resultaterne fra metoder der dels er udviklet i tidligere projekter og dels videreudviklet i SCA+.

Baseret på metoder er der formuleret konkrete renoveringstiltag. Det er dog pga. udskydelse af renoveringsprocessen ikke lykkedes at lave en opfølgning på renoveringen med de udviklede data-baserede metoder.

# 1. Datagrundlag

I Smart Cities Accelerator+ (SCA+) er Bygning 85 (Taastrupgaardsvej 19-23) blevet udpeget som demonstrationsbygning. Bygningen består af i alt 30 lejligheder/enheder, hvor flere lejligheder står tomme grundet snarlig renovering. Stueetagen benyttes til fællesarealer i form af vaskeri, foreningslokaler m.m. Etage 1-3 består af 19 lejligheder (fire står tomme pr. december 2021) samt fem mindre, ubeboede gæsteboliger/hybler. To lejligheder er hhv. 84 m<sup>2</sup> og 56 m<sup>2</sup> og de resterende lejligheder er 110 m<sup>2</sup>. Det totale areal for Bygning 85 er omtrent 2750 m<sup>2</sup>.

Taastrupgaard er forsynet med fjernvarme via flere varmecentraler som typisk leverer varme til mere end én bygning. Varmecentralen, der leverer varme til Bygning 85, leverer således også varme til Bygning 82 (Taastrupgaardsvej 11-17). Det historiske varmeforbrug, der vedrører Bygning 85, er således en del af det historiske registrerede varmeforbrug.

Elforbruget til fællesstrøm måles ligeledes for flere bygninger på samme måler. I løbet af projektet er der dog sat en ny bi-måler op, således at strømforbruget til Bygning 85 kunne bestemmes separat.

I tillæg til fjernvarme er hver lejlighed forsynet med elektrisk gulvvarme i badeværelserne. I projektet har der ikke været adgang til elforbruget fra de enkelte lejligheder, og derfor har det ikke været mulighed at estimere varmeforbruget til gulvvarme. Under opsætning af Elsys indeklimasensorer i lejlighederne (december 2021) har beboerne dog forklaret at de ikke tænder for gulvvarmen. Det vurderes derfor som acceptabelt at se bort fra dette varmebidrag.

Samtlige boliger er forsynet med mekanisk konstant udsugning fra køkken og bad. Udsugning sker via to centrale aggregater. Baseret på en antaget ventilatoreffektivitet på 50 %, trykmålinger i ventilationssystemet, spænding og strømstyrke for ventilationsaggregaterne er den beregnede ventilationsmængde på hhv. 2500 og 2400 m<sup>3</sup>/h. Dette svarer til 0,5 l/s pr. m<sup>2</sup>. Til sammenligning foreskriver bygningsreglementet (Bolig- og Planstyrelsen, 2022) en minimumsventilationsmængde på 0,3 l/s/m<sup>2</sup>, med udsugning på 15 l/s fra WC-rum med bad og 20 l/s fra køkkener. Hovedparten af lejlighederne er som nævnt 110 m<sup>2</sup> og har to WC-rum med bad, samt ét køkken. Jf. bygningsreglementet skal der derfor være en ventilationsmængde på 55 l/s eller 0,3 l/s pr. m<sup>2</sup> – afhængig af hvilken værdi der er størst. For lejlighederne på 110 m<sup>2</sup> er den minimale ventilationsmængde derfor  $\max[0,3 \text{ l/s pr. m}^2, 55 \text{ l/s} / 110 \text{ m}^2] = 0,5 \text{ l/s pr. m}^2$ , hvilket stemmer overens med den faktiske ventilationsmængde.

Som nævnt herover er der i december 2021 opsat indeklimasensorer i hovedparten af lejlighederne. Der er brugt Elsys indeklimasensorer som

registrerer lysniveau, relativ luftfugtighed, batterispænding, lufttemperatur, bevægelse og CO<sub>2</sub> koncentration. Måleren sender data via det eksisterende LoRa netværk, der varetages af Brunata. Brunata har ligeledes stillet historiske data fra fordelingsmålerne i Bygning 85 og 82 til rådighed i projektet. Som beskrevet i Afsnit 2, *Genskabelse af Historisk Varmeforbrug*, er det daglige varmeforbrug estimeret med udgangspunkt i historisk varmeforbrugsdata og fordelingsmålerdata fra Brunata.

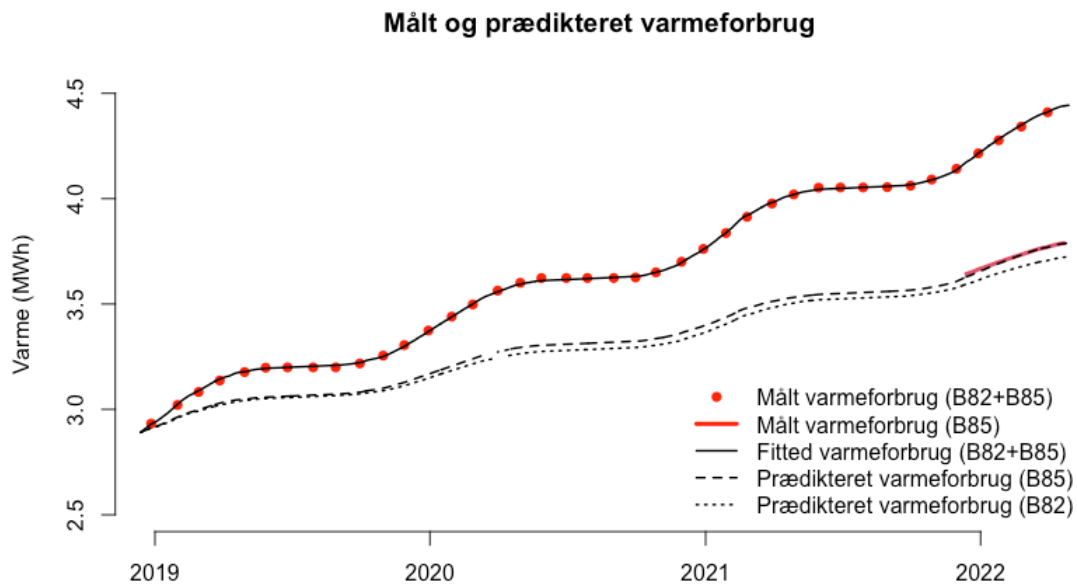
Endelig er vejrdata hentet fra Copernicus Climate Data Store (2022). Specifikt er der hentet lufttemperatur (2 m over terræn), vindhastighed (10 m over terræn), og global solstråling.

## 2. Genskabelse af Historisk Varmeforbrug

En typisk udfordring ved data-drevet kortlægning/screening af en større eller mindre bygningsporteføljes energimæssige ydeevne, er at skaffe forbrugsdata. For at undgå at skulle vente på at forbruget skal registreres før bygningen kan analyseres, er det typisk af interesse at indhente historisk forbrugsdata – særligt varmeforbrug. I Taastrupgaard er varmeforbruget registreret de seneste 10 år på månedlig basis. De data-drevne metoder til screening af bygningers termiske ydeevne, kræver dog typisk dagsværdier eller helt ned på time- og kvartersværdier.

For at generere dagsværdier for varmeforbruget, der danner grundlag for datamodelleringsarbejdet og analyserne, har vi indhentet supplerende data fra fordelingsmålerne, der er monteret på hver enkel radiator i Bygning 85. Fordelingsmålerne fungerer ved at registrere overfladetemperaturen på radiatoren og lufttemperaturen. Med udgangspunkt i dette beregnes et antal varmeenheder, der er forbrugt fra den specifikke radiator. Typisk vil andelen af varmeenheder være et udtryk for hvor meget varme radiatoren har afgivet over en periode – fx én måned. Ved kendskab til det totale antal varmeenheder, der er registreret i en specifik varmekreds, samt det faktiske månedsforbrug (målt med en energimåler), deles varmeforbruget ud på de enkelte lejligheder ifm. opgørelse af varmeregnskab. På lignende vis er det daglige varmeforbrug for Bygning 85 genskabt ved at sammenholde det månedlige varmeforbrug og varmeenhederne optalt fra fordelingsmålerne.





**Figur 2:** Målt og præsikteret varmemforbrug. Det månedlige målte totale varmemforbrug for Bygning 82 og 85 er illustreret som røde prikker. Baseret på fordelingsmålerdata er det daglige varmemforbrug præsikteret (sort optrukket linje). Med udgangspunkt i den samme model, er varmemforbruget for Bygning 82 og 85 præsikteret separat. Den røde linje illustrerer det hyppigt målte varmemforbrug fra Bygning 85 og fungerer som validering.

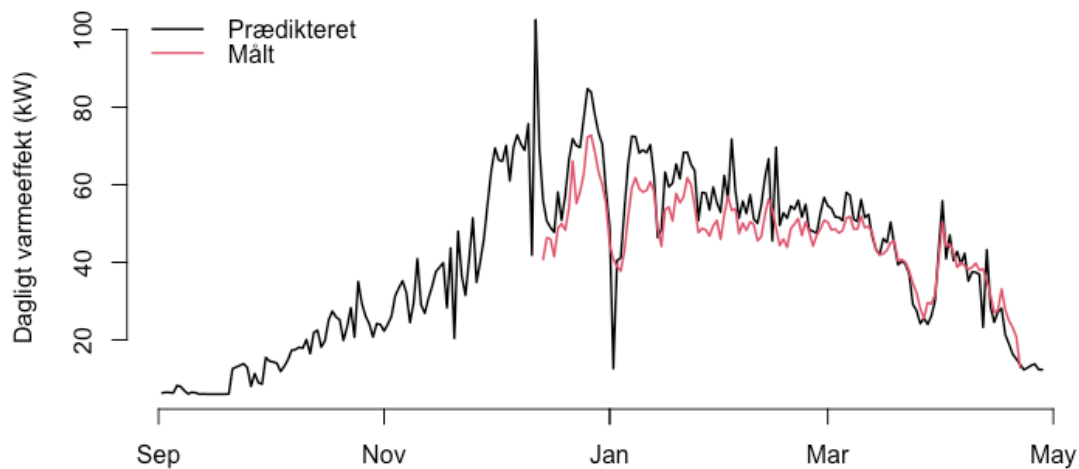
Det månedlige samlede varmemforbrug for Bygning 82 og 85 kan ses som de røde prikker i Figur 2. Ved hjælp af understående model er det daglige varmemforbrug estimeret.

$$\Phi_{h,t} = a \chi_{h,t} + b t + c + \epsilon_t,$$

hvor  $\Phi_{h,t}$  er det målte varmemforbrug,  $\chi_{h,t}$  er det målte antal varmeanheder fra fordelingsmålerne,  $t$  er tiden målt i dage,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  er modelparametre og  $\epsilon_t$  er observations- og modelstøjen. Termen  $b \cdot t$  er medtaget for at tage højde for drift i de målte antal varmeanheder.

Det samlede fittede varmemforbrug for Bygning 82 og 85 ses som den sorte fuldt optrukne kurve i Figur 2. Med udgangspunkt i modellen for  $\Phi_{h,t}$ , er varmemforbruget ligeledes præsikteret separat for Bygning 82 og 85 (vis som sorte punkterede linjer i Figur 2). Endelig er det målte varmemforbrug fra den nyinstallerede varmemåler i Bygning 85 vist (rød linje), for at krydstjekke om modellen rammer rigtigt.

### Målt og prædikeret varmekonsum (Bygning 85)



**Figur 3:** Dagligt måle og prædikeret varmeeffekt for Bygning 85.

I Figur 3 er den daglige varmeeffekt illustreret fra september 2021 til maj 2022. Den røde linje viser den målte effekt fra den nye energimåler, og den sorte linje viser den prædikerede effekt baseret på varmfordelingsdata. Det kan ses af figuren, at det prædikerede varmekonsum i rimeligt omfang følger det målte. Dog lader det til at der stadig er noget systematisk *drift* i værdierne trods det er forsøgt medtaget i modellen vist tidligere. Det prædikerede varmekonsum er brugt som fundament for de videre analyser.

## 3. Estimering af Termiske Bygningsegenskaber

Metoderne der ligger til grund for bestemmelse af bygningernes energimæssige ydeevne er første gang beskrevet i artiklen '*Method for Scalable and Automated Thermal Building Performance Documentation and Screening*' (C. Rasmussen et al., 2020), og bygger på den velkendte energisignatur. Senere er samme metode anvendt på to lejligheder i Himmerland Boligforening, som del af projektet REBUS i 2020, hvor modellens evne til at estimere lejlighedernes lufttæthed blev demonstreret (C. Rasmussen et al., 2021).

I SCA+, Arbejdsplan 3, er der videreudviklet på modellen således at den kan tage højde for varierende varmekonsum forårsaget af menneskelig interaktion med bygningen. Dette kan fx ske pga. ændrede termostatindstilling på radiatorerne, ændring i ventilationsmængde, interne varmelaster eller lignende. Metoden er beskrevet i detaljer i artiklen (C. Rasmussen et al., 2022 (submitted)). I det følgende vil grundprincipperne dog blive gennemgået.

Modellen består af to regimer. Et regime for opvarmningssæsonen, og et uden for opvarmningssæsonen. Hvert regime er beskrevet med en funktion. Overgangen mellem de to regimer bestemmes som den udglattede max værdi

af de to funktioner. Til at gøre dette benyttes en *smooth maximum* funktion kaldet *LogSumExp*. Regimerne og LogSumExp funktionerne beskrives i følgende afsnit.

### 3.1 Varmeforbrug i og uden for opvarmningssæsonen

Varmeforbruget i opvarmningssæsonen kan beskrives som

$$\Phi_{h1} = (UA_0 + W_s UA_w) (T_{b0} - T_a) - gA I_g + \epsilon_1 ,$$

hvor  $UA_0$  er varmetabskoefficienten givet vindstille forhold,  $UA_w$  er vindsensitiviteten, der beskriver hvor meget varmetabet øges når vindhastigheden øges (C. Rasmussen et al., 2020).  $T_{b0}$  er basis-temperaturen, hvilket er udetemperaturen, hvor bygningen er i termisk balance givet at rumopvarmningen er stoppet. Det vil sige den gennemsnitlige udetemperatur hvor bygningen kan holde indetemperaturen på det ønskede niveau med solvarmetilskud og interne varmelaster (fratrasket ventilationstab) som eneste varmetilskud. Solvarmetransmitancen er udtrykt ved  $gA$  og  $\epsilon_1$  er støjtermen. Model-inputtet er vindhastighed ( $W_s$ ), udetemperatur ( $T_a$ ) og global solstråling ( $I_g$ ).

For visse input-værdier (typisk høje udetemperaturer) vil modellen resultere i negativt varmeforbrug. Dette kan tolkes som rumkøling, men i langt de fleste tilfælde vil boliger under danske forhold ikke have køling, og derfor vil model-outputtet være misvisende under disse forhold. I stedet vil man typisk se at varmeforbruget stagnerer omkring nul – eller i tilfælde omkring en værdi større end nul. Varmeforbruget kan derfor beskrives som

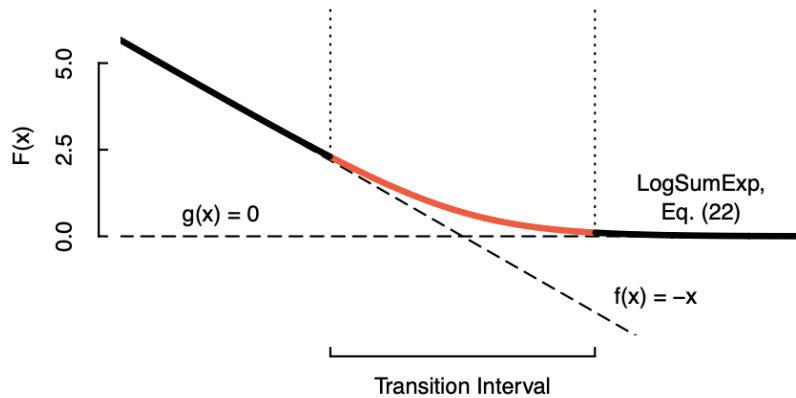
$$\Phi_{h2} = \Phi_0 + \epsilon_2 ,$$

hvor  $\Phi_0$  er standby varmeforbruget.

For, matematisk, at binde de to forbrugsregimer sammen, har C. Rasmussen et al. (2020) vist at en *smooth maximum* funktion som LogSumExp (LSE) kan bruges. LSE er for to inputs bestemt som

$$LSE[f(x), g(x)] = \log[\exp(f(x) \cdot k) + \exp(g(x) \cdot k)] k^{-1} ,$$

hvor  $k$  er en parameter, der bestemmer hvor hurtigt overgangen fra funktion  $f$  til  $g$  sker. I Figur 4 kan ses grafisk eksempel på hvordan LogSumExp fungerer når  $f(x) = -x$  og  $g(x) = 0$ .



**Figur 4:** Illustration af *smooth maximum* funktionen LogSumExp anvendt på funktionerne  $f(x) = -x$  og  $g(x) = 0$ . Illustrationen er taget fra artiklen *Method for Scalable and Automated Thermal Building Performance Documentation and Screening* (C. Rasmussen et al., 2020).

Det kan ses at Figur 4 har en del lighed med et typisk varmekonsum som funktion af udetemperaturen. Ved at erstatte  $f(x)$  med  $\Phi_{h1}$ ,  $g(x)$  med  $\Phi_{h2}$ , og kombinere  $\epsilon_1$  og  $\epsilon_2$  i udtrykket overfor for LSE fås

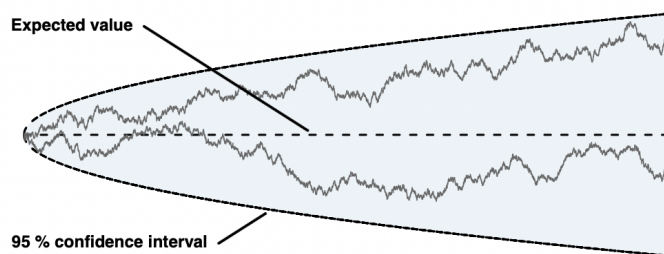
$$\Phi_h = LSE[(UA_0 + W_s UA_w) (T_{b0} - T_a) - gA I_g, \Phi_0] + \epsilon.$$

Den fulde beskrivelse af modellen kan findes i C. Rasmussen et al., 2020.

### 3.2 Variabelt brugsmønster

Modellen for  $\Phi_h$ , vist i foregående afsnit, antager at den ukendte interne varmelast, ventilationstab og indetemperatur er konstant. I praksis vil man dog ofte se at fx indetemperaturen og ventilationsmængden varierer pga. menneskelig interaktion med bygningen. Modelteknisk betyder det derfor at  $UA_0$  eller  $T_{b0}$  varierer over tid.

I (C. Rasmussen et al., 2022 (submitted)) er det beskrevet hvordan  $UA_0$  og  $T_{b0}$  kan estimeres over tid. Dette gøres ved at formulere  $UA_0$  og  $T_{b0}$  som *random walks* og estimere en realisation af disse, der beskriver de ukendte effekter som fx varierende indetemperatur og ventilationsmængden.



**Figur 5:** Illustration af to realisationer af random walks fra samme stokastiske proces. Illustrationen er taget fra artiklen *Data-driven estimation of time-varying stochastic effects on building heat consumption related to human interactions* (C. Rasmussen et al., 2022 (submitted)).

En random walk er en stokastisk proces hvis stepvise udvikling sker efter en normalfordeling med middelværdi 0 og standard afvigelse  $\sigma$ . I Figur 5 er vist to

realisationer fra en random walk. Ved at inkludere notationen superscript (t) til at beskrive tidsskridtet kan vi formulere to forskellige modeller, der beskriver hhv. udvikling i den evt. varierende ventilationsmængde

$$\Phi_h = LSE \left[ UA^{(t)} \left( T_{b_0} - T_a^{(t)} \right) - gA I_g^{(t)} + \epsilon_1^{(t)}, \Phi_0 + \epsilon_2^{(t)} \right],$$

og varierende indetemperatur og intern varmelast

$$\Phi_h = LSE \left[ \left( UA_0 + W_s^{(t)} UA_w \right) \left( T_{b_0}^{(t)} - T_a^{(t)} \right) - gA I_g^{(t)} + \epsilon_1^{(t)}, \Phi_0 + \epsilon_2^{(t)} \right].$$

I ovenstående er  $UA^{(t)}$  hhv.  $T_{b_0}^{(t)}$  nu tidsafhængige random walks og defineret som

$$UA^{(t)} = UA^{(0)} + \sum_{i=1}^t X_{UA}^{(i)},$$

og

$$T_{b_0}^{(t)} = T_{b_0}^{(0)} + \sum_{i=1}^t X_{T_b}^{(i)},$$

hvor  $X$  er en normalfordelt stokastisk variabel med middelværdi 0 og standard afvigelse  $\sigma$ .

I *Data-driven estimation of time-varying stochastic effects on building heat consumption related to human interactions* (C. Rasmussen et al., 2022 (submitted)) er metoden beskrevet i detaljer og demonstreret på et skolebyggeri syd for Oslo i Norge.

Baseret på de beskrevne modeller vil de estimerede parametre beskrive forskellige bygningsforhold. Fx beskriver  $UA_0$  isoleringsgraden i W/K og  $\Phi_0$  beskriver standby forbruget i watt. Baseret på de estimerede modelparametre kan fordelingen af varmetilskud og varmetab bestemmes. Ligeledes kan varmeforbruget sammenholdes med forskellige brugsscenerier og deraf kan brugeradfærden estimeres.

## 4. Webinterface

I løbet af SCA+, Arbejdspakke 3, er der udviklet et webinterface til visualisering af modelresultaterne til screening af bygningers energimæssige ydeevne. I de følgende vil interfacet blive beskrevet.

Interfacet består af to hovedsider. Side ét viser varmebudget på bygningsniveau. Side to giver overblik over en enkelt bygning varmeafgiveres (i dette tilfælde radiatorernes) brug således at dårlige afkølerere kan findes og

evt. rettes op. Side to viser ligeledes den specifikke bygnings termiske egenskaber så som varmetabskoefficienten.

## 4.1 Bygningsniveau

Første side i web-interfacet – *Bygninger* – giver overblik over varmeforbruget på bygningsniveau. Skærbilledet består af fem hovedelementer som vist i Figur 6. Elementerne består af; 1. Faneoversigt, 2. Beskrivelse, 3. Input-panel, 4. Bygningsfilter og 5. Bygningsperformanceoversigt. I det følgende vil det væsentligste blive beskrevet.



Figur 6: Illustration af webinterfacets side ét af to til visning af energimæssig ydeevne på bygningsniveau.

## Varmebudget

I Figur 6 ses et screenshot fra side ét af webinterfacet. Den grafiske tabel i Figur 6 illustrerer for hver enkelt bygning i Taastrupgaard det estimerede varmebudget. Da data i dette projekt kun vedrører Bygning 85 (og til dels Bygning 82) er data fra alle andre bygninger end Bygning 82 og 85 i screenshot'et kunstigt genereret og dermed ikke et udtryk for bygningernes faktiske performance, men blot genereret for demonstrationens skyld.

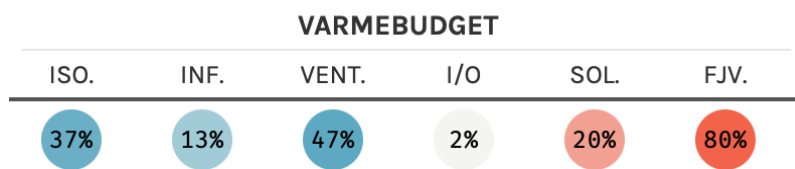
Tabellen består af ni kolonner. Kolonne 1-2 viser udvalgte oplysninger om de enkelte bygninger. I dette tilfælde bygningsnummer (ID) og opvarmet etageareal.

Kolonne 3-8 viser det egentlige varmebudget for hver enkelt bygning i procent. Kolonne 3-6 viser procentdelen af varmetab fra bygningen, hvor mørkeblå

nuancer indikerer høj andel og lyseblå nuancer indikerer lav andel. Kolonne 7-8 viser varmetilskuddet til bygningen, hvor mørkerøde nuancer indikerer høj andel og lyserøde nuancer indikerer lav andel af varmetilskud. Kolonnerne er:

<b>ISO.</b>	Varmetab grundet bygningens isoleringsniveau.
<b>INF.</b>	Varmetab grundet luftinfiltration/utætheder
<b>VENT.</b>	Ventilationstab
<b>I/O</b>	Standby-forbrug uden for opvarmningssæsonen.
<b>SOL.</b>	Solarvarmetilskud
<b>FJV.</b>	Varme fra fjernvarmesystemet

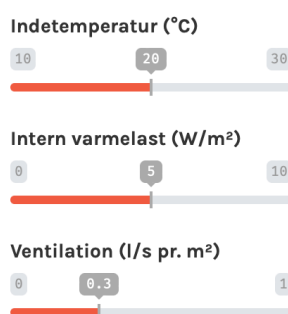
Værdierne i varmebudgettet er estimerede ud fra modellerne beskrevet i afsnit 3, *Estimering af Termiske Bygningsegenskaber*. Dog er ventilationstab estimeret separat, som beskrevet i Afsnit 1, *Datagrundlag*.



**Figur 7:** Illustration varmebudget for Bygning 85 givet default-værdier for indetemperatur, intern varmelast og ventilation.

### Menneskelig indvirkning på varmeforbruget

Sidste kolonne i tabellen illustrer det faktiske varmeforbrug sammenholdt med et givent referenceforbrug. Referenceforbruget er et resultat af de estimerede bygningsforhold, og brugerspecificerede input som indetemperatur, intern varmelast og ventilationsrate, specificeret i venstre side af skærbilledet i Figur 6 og i Figur 8.

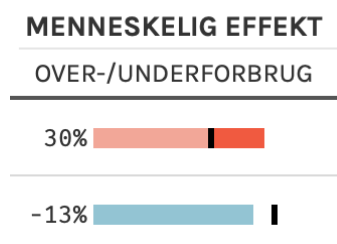


**Figur 8:** Illustration af brugerspecificerede input. Default-værdierne (som vist) er baseret på værdier for Bygningsreglementet (Bolig- og Planstyrelsen, 2022) og SBI-anvisning 213 (S. Aggerholm, 2018).

I eksemplet i Figur 9 indikerer procentsatsen, hvor meget højere eller lavere det reelle varmeforbrug er sammenlignet med det teoretiske varmeforbrug, der ville være opnået givet indstillingerne af referenceforbruget (vist i Figur 8). I dette tilfælde er Figur 9 et resultat af standardværdierne for indetemperatur på 20 °C, intern varmelast på 5 W/m<sup>2</sup> og en ventilationsmængde på 0,3 l/s per m<sup>2</sup>.

I Figur 9 indikerer den sorte vertikale streg referenceforbruget givet indstillingerne i Figur 8. Den røde barre indikerer det faktiske forbrug, og den mørkerøde del af barren indikerer overforbruget forårsaget af menneskelig indvirken. Tilsvarende viser den blå barre det faktiske forbrug, og det u-udfyldte hvide stykke mellem den blå barre og den sorte streg indikerer underforbruget.

Som tidligere nævnt skal det dog bemærkes at der er tale om kunstigt genererede data i Figur 6 for alle andre bygningen Bygning 82 og 85. Derfor er det ikke et reel mål for beboeradfærden i de pågældende bygninger men blot vist som illustrativt eksempel. I Afsnit 5, *Demonstration, Bygning 85*, ses konkret på Bygning 85 hvis resultater beror på faktisk data og analyse.



**Figur 9:** Illustration af menneskelig påvirkning af varmeforbruget. Den røde og blå barre indikerer hhv. et overforbrug på 30 % og et underforbrug på 13 % af varme sammenlignet med de estimerede bygningsforhold og indstillingerne i Figur 8.

## 4.2 Lejlighedsniveau

Anden side af web-interfacet – *Lejligheder* – giver overblik over en enkelt bygnings radiatorer og hvordan de opereres. Skærbilledet består af fem hovedelementer som vist i Figur 10. Skærbilledet består af 1. Faneoversigt, 2. Beskrivelse, 3. Filter, 4. Bygningsegenskabspanel og 5. Radiatorafkølingsgrad.





**Figur 10:** Illustration af webinterfacets side to af to til visning af estimerede termiske bygningsegenskaber og indikationer af radiator bidrag til optimal afkøling af fjernvarmevand.

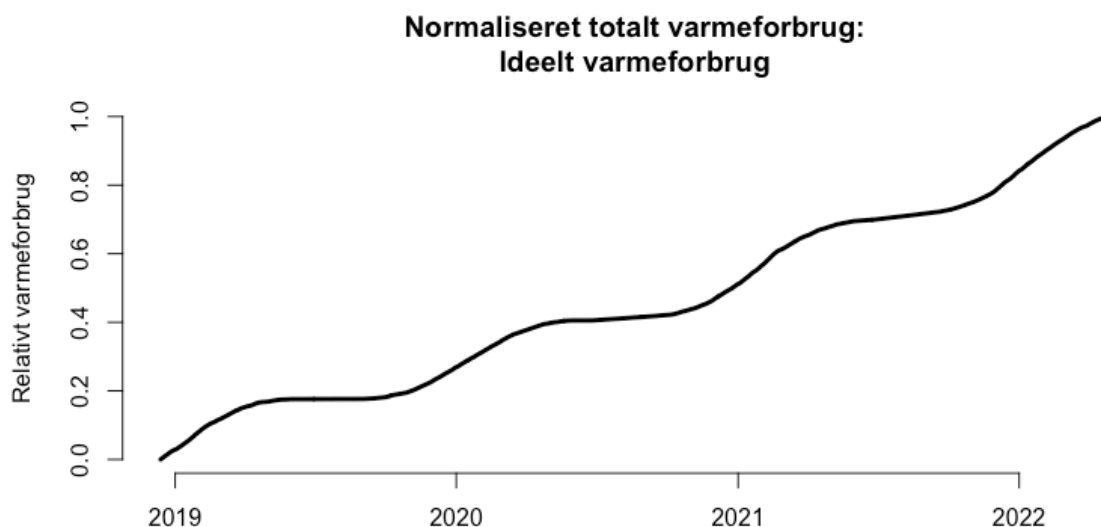
## Bygningsegenskaber

De estimerede termiske bygningsegenskaber relateret til bygningen (i dette tilfælde Bygning 85) er listet i venstre side af webinterfacet i Figur 10. Estimererne er baseret på modellerne beskrevet i Afsnit 3, *Estimering af Termiske Bygningsegenskaber*.

## Varmeudnyttelse

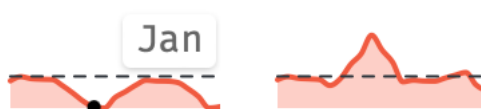
Tabellen i Figur 10 indeholder en linje pr. lejlighed i Bygning 85. I kolonne 1 er adresserne listet (af hensyn til beboernes anonymitet er de faktiske adresse skjult). I kolonne 2 ses den gennemsnitlige relative afkølingsgrad for alle radiatorerne i lejligheden, og i kolonne 3-9 ses en graf over varmeafgivelsen fra den enkelte radiator.

Hver graf viser det relative forbrug i relation til det ideelle forbrug. For en bygning som denne (med 120 radiatorer) er det ideelle forbrug bestemt som det totale normaliserede akkumulerede forbrug af alle radiatorerne for bygningen som vist i Figur 11. Sammenholdes den enkelte radiators normaliserede varmeafgivelse med dette ideelle forbrug, kan det vurderes om det relative varmeforbrug er højere eller lavere end det ideelle forbrug. I tilfælde af at forbruget overstiger det ideelle forbrug væsentligt vil flowet gennem radiatoren være højt, og afkølingen derfor lav. Ligeledes vil en radiator der er slukket eller skruet meget langt ned, have et lille eller intet flow, og derved ikke bidrage til afkøling af fjernvarmevandet.



**Figur 11:** Normaliseret totale varmeforbrug for Bygning 85.

I Figur 12 ses to dårlig udnyttede radiatorer. Grafen viser den vurderede "performance" som funktion af tiden. Den stiplede sorte streg viser den ideelle performance. Grafen viser en knap 2-årig periode fra forår 2020 til slut-vinter 2022.



**Figur 12:** Grafer over varmeforbruget fra to tilfælde radiatorer fra samme lejlighed. Venstre graf viser en radiator over 2 år med dårlig afkøling pga. at radiatoren har været slukket. Venstre graf viser en ligeledes en anden radiator med dårlig afkøling grundet for høj vandgennemstrømning. Værdier er normaliserede.

Den venstre graf i Figur 12 viser en bølgende kurve som til en start ligger på den stiplede linje. Ved dette forstår at forbruget følger det ideelle forbrug. Dog skal man være opmærksom på at varmen i bygningen slukkes over sommeren, hvilket naturligt tvinger radiatoren til at være slukket og derved følge det ideelle forbrug. Det samme ses længere til senere i perioden til højre på grafen. I vintermånederne (månedensnavnet vises i den interaktive brugergrænseflade når musen holdes over grafen) ses dog at grafen dykker væsentligt under den stiplede linje. Radiatoren forbruger derfor ikke tilstrækkelig varme til at kunne følge med det ideelle forbrug. Faktisk er grafen et eksempel på en radiator der er slukket i hele den 2-årige periode.

Den højre graf viser en modsat tendens. Her er forbruget væsentligt højere i vintermånederne (specifikt vinteren 2021). Trods beboernes mulige ønske om at have forskellige temperaturer i forskellige dele af deres bolig, viser dette givetvis et eksempel på at én radiator er skruet meget op for at kompensere for en anden slukket radiator, hvilket giver anledning til dårlig afkøling af returvandet til fjernvarmeværket.

Farveskalaen på graferne indikerer hvor god (blå) eller dårlig (rød) radiatoren bidrager til afkøling af radiatorvandet og ultimativt fjernvarmevandet. I Figur 10

ses også eksempler på radiatorer, der i høj grad følger det ideelle forbrug for hele den 2-årige periode. Disse radiatorer bidrager optimalt til afkøling af fjernvarmevandet.

## 5. Demonstration, Bygning 85

Som tidligere nævnt er Bygning 85 i Taastrupgaard udvalgt som test-case i SCA+, Arbejdspakke 3. I Figur 13 ses varmebudgettet og den menneskelige indvirkning givet standardindstillingerne i Figur 8. Standardindstillingerne er baseret på Bygningsreglementet (Bolig- og Planstyrelsen, 2022) og SBI-anvisning 213 (Søren Aggerholm, 2018). Bygning 82 er medtaget i Figur 13 for sammenligningens skyld.

ID ↓	AREAL	VARMEBUDGET						MENNESKELIG EFFEKT	
		ISO.	INF.	VENT.	I/O	SOL.	FJV.	OVER-/UNDERFORBRUG	
Bygning 85	2750 m <sup>2</sup>	40%	11%	42%	7%	23%	77%	39%	
82	3300	36	10	46	7	18	82	41%	

**Figur 13:** Estimeret varmebudget og menneskelig indvirkning på varmeforbruget givet standardindstillingerne for indetemperatur, intern varmelast, og ventilationsmængde (se Figur 8).

### 5.1 Den menneskelige indvirkning på varmeforbruget

Givet standardindstillingerne ses det at den menneskelige indvirkning på varmeforbruget giver anledning til et forbrug der ligger 39 % over referenceforbruget. Typisk vil man ikke have adgang til den faktiske indetemperatur, interne varmelast og ventilationsmængden. Derfor vil indstillingerne bero på antagelser eller yderligere kendskab til byggeriet. I tilfældet, som ses i Figur 13, vil man uden yderligere information om bygningsdriften blot tilskrive de menneskelige valg der er foretaget ang. temperatur, intern varmelast og ventilation det høje varmeforbrug.

I SCA+ er der som beskrevet i Afsnit 1, *Datagrundlag*, dog indsamlet oplysninger om ventilationsmængder og indetemperatur.

Gennemsnitstemperaturerne mellem december 2021 og maj 2022 målt til omkring 21,5 °C. Derudover er det som beskrevet i Afsnit 1, *Datagrundlag*, fundet at ventilationsraten ligger væsentligt over standardniveauet på 0,3 l/s pr. m<sup>2</sup> – nemlig 0,5 l/s pr. m<sup>2</sup>. Sandsynligvis pga. lejlighedernes to WC-rum med bad, hvilket giver anledning til en højere krævet ventilationsmængde jf. Bygningsreglementet 2018.

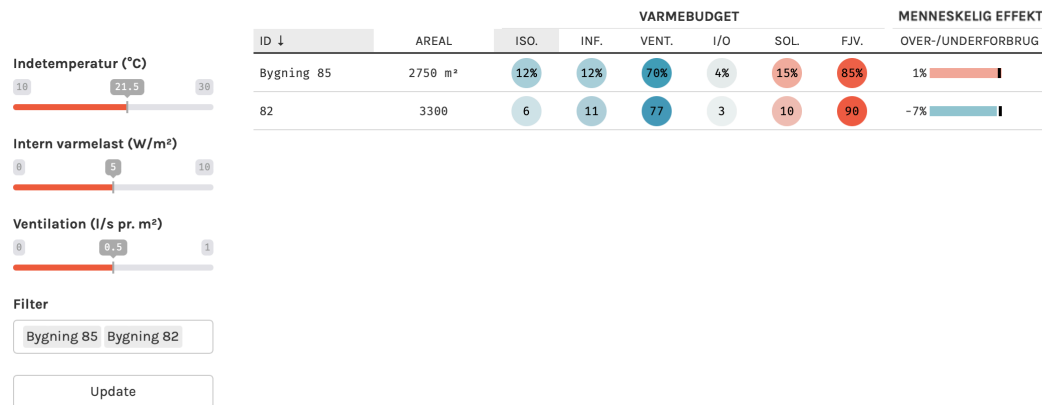
Ændres indstillingerne i bruger-input-panelet (se Figur 6 og Figur 8) tilsvarende, ændres varmebudgettet og den estimerede menneskelige indvirkning tilsvarende. Resultatet er vist i Figur 14.

### Taastrupgård – Bygningsoverblik

Nøgleparametre der har indflydelse på det samlede varmeforbrug grupperet efter bygningsegenskaber, vejrforhold og beboeradfærd.

*Klik* for at sortere en bestemt kolonne. *Shift + klik* for at sortere flere kolonner samtidig.

Over- og undervarmeforbrug relateret til beboeradfærden er baseret på indetemperaturen, det interne varmetilsud og ventilationsmængden specificeret til venstre. Positive værdier indikere at det faktiske varmeforbrug overskrider det beregnede varmeforbrug givet de estimerede bygningsfysiske og adfærdrelateret forhold specificeret i venstre kolonne.



**Figur 14:** Estimeret varmebudget og menneskelig indvirkning på varmeforbruget givet bedste estimater af indetemperatur og ventilationsmængde.

Efter indstillingerne for indetemperaturen og ventilationsmængden er ændret til det bedst muligt estimat, ses det nu at den menneskelige indvirkning på varmeforbruget er stort set 0 % for Bygning 85. Dette viser at al varmeforbrug for bygningen er beskrevet ved de estimerede bygningsværdier, samt specifikke indeklimaforhold for indetemperatur og ventilationsmængder.

For Bygning 82 er den menneskelige indvirkning på varmeforbruget på -7 %, hvilket kan skyldes usikkerheder, og at temperaturen eller ventilationsmængden er en smule forskellige for Bygning 85.

I det følgende afsnit gennemgås varmebudgettet fra Figur 14 (og Figur 15).

## 5.2 Varmebudgettet

ID ↓	AREAL	VARMEBUDGET						MENNESKELIG EFFEKT
		ISO.	INF.	VENT.	I/O	SOL.	FJV.	OVER-/UNDERFORBRUG
Bygning 85	2750 m²	12%	12%	70%	4%	15%	85%	1%
82	3300	6	11	77	3	10	90	-7%

**Figur 15:** Estimeret varmebudget og menneskelig indvirkning på varmeforbruget givet bedste estimater af indetemperatur og ventilationsmængde (udsnit af Figur 14).

Fra varmebudgettet i Figur 15 ses at kun 12 % af varmen forsvinder ud gennem klimaskærmen pga. isoleringsevnen af bygningen. Fra modelestimaterne er et fundet at den totale varmetabskoefficient for Bygning 85 er 3675 W/K eller 1,3

W/(K m<sup>2</sup>) (Se Figur 10). Det skal dog siges at denne varmetabskoefficient inkluderer ventilationstabet fra den mekaniske ventilation.

Kigger vi på andelen af varmetabet der vedrører mekanisk ventilation ses det, at denne står for 70 % efter at ventilationsmængden er opjusteret til 0,5 l/s pr m<sup>2</sup>. Dette gør den mekaniske ventilation til den – uden sammenligning – væsentligste årsag til Bygning 85 varmetab.

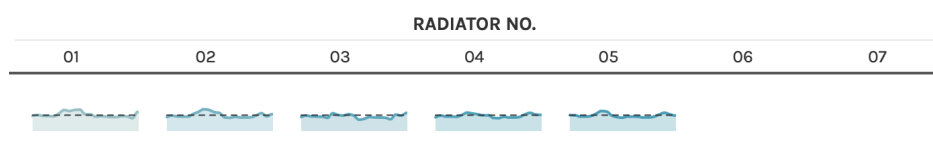
Utætheder i klimaskærmen står for 12 % af varmetabet. Ved overslagsberegning fra Bygningsreglementet og SBI-anvisning 213 kan en omtrentlig vindsensitivitet for Bygning 85 bestemmes til omkring 75 W/K pr. m/s, givet at lufttætheden opfylder nuværende bygningsreglement (Bolig- og Planstyrelsen, 2022). Sammenlignet med den estimerede vindsensitivitet på 105 W/K pr. m/s (se Figur 10) ligger varmetabet således 40 % højere end hvad kravet er til en bygning der overholder Bygningsreglementet 2018. I Artikel, *Estimating Building Airtightness from Data – A Case Study* (C. Rasmussen et al., 2021), findes der detaljer vedrørende overslagsberegningen.

For Bygning 85 ligger standby-forbruget på 4 %. Usikkerheder taget i betragtning anses dette for rimeligt.

Endelig viser varmebudgettet for Bygning 85, at 15 % af varmen kommer fra solvarmetilskud. Dette er til sammenligning en anelse mere end for Bygning 82. Bygning 85 har vinduer mod øst og vest, hvorimod Bygning 82 har vinduer orienteret mod syd og nord. Dog må det konkluderes ud fra resultaterne at den kraftige middagssol der måtte tænkes at give et væsentligt solvarmebidrag til Bygning 82, bliver reduceret betragteligt af sydfacadens altaner og udhæng.

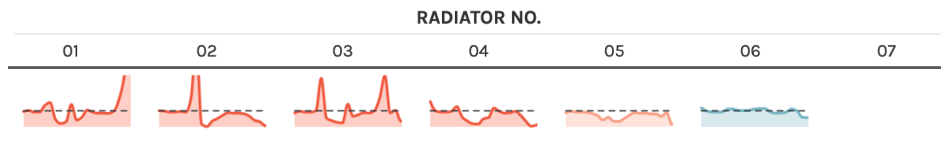
### 5.3 Afkøling af fjernvarmevand

Som det allerede er set i Figur 10, er hovedparten af radiatorerne på skærbillede røde, hvilket indikerer dårlig afkøling. I Figur 16 ses resultatet fra en enkelt lejlighed med den bedste estimerede gennemsnitsafkøling på tværs af lejlighederne i lejligheden.



**Figur 16:** Radiator-performance for lejlighed med bedst udnyttelse af varmen.

I Figur 17 ses et tilsvarende billede fra en anden typisk lejlighed med generel dårlig afkøling. Baseret på det kan det ses at den generelle brug af radiatorerne i Bygning 85 er meget ringe, hvilket medfører dårlig afkøling af fjernvarmevandet, lavere effektivitet hos fjernvarmeværket, og endelig en højere regning til beboerne i Taastrupgaard grundet strafafgift for utilstrækkelig afkøling af fjernvarmevandet.



**Figur 17:** Radiator-performance for typisk lejlighed med generel dårlig afkøling.

Før projektet start var forventningen at enkelte radiatorer kunne være skyld i hovedparten af årsagen til den dårlige afkøling. Det ser dog ud til at problemet er større end som så ud fra resultaterne.

#### 5.4 Forbedringsforslag til Bygning 85

Som det er belyst ved gennemgang af analysen af Bygning 85 er der flere ting der giver anledning til forbedringer af bygningens energiforbrug.

##### Ventilation

Som det blev vist i Figur 15 udgør ventilationstabet 70 % af varmetabet for Bygning 85. Som det også er nævnt er bygningen udstyret med mekanisk udsugning uden varmegenvinding. Dertil er det er ventilationsmængden særligt høj for Bygning 85 da der i de fleste lejligheder er to WC-rum med bad, hvilket kræver større udsugningsluftmængde end hvad basisniveauet for boliger er. Næmlig 0,5 l/s pr. m<sup>2</sup> i stedet for 0,3 l/s pr. m<sup>2</sup>.

- Varmegenvinding på udblæsningsluften. Typisk vil dette ske ved at have balanceret ventilation, men kan også opnås ved fx en luft-til-vand varmepumpe på udblæsningsluften. For moderne varmegenvinding systemer (for balanceret ventilation) vil man typisk kunne opnå en varmegenvinding på 80-90 % eller højere, hvilket vil give en væsentlig driftsbesparselse.
- Variabel ventilationsmængde. På nuværende tidspunkt er Bygning 85 forsynet med konstant udsugning. Bygningsreglementet tillader dog i dag at man benytter behovsstyrret ventilation. Med behovsstyrret ventilation vurderes det at gennemsnits ventilationsmængden kan reduceres fra de 0,5 l/s pr. m<sup>2</sup> til 0,3 l/s pr. m<sup>2</sup>.
- Sidste alternativ er at nedlægge det ene af de to WC-rum ved den forestående reovering, for derved at reducere det nødvendige ventilationsbehov.

##### Utætheder

Godt 10 % af varmen mistes pga. utætheder i klimaskærmen. Ved den forestående reovering vil klimaskærmen blive skiftet, hvilket forventeligt vil give en reduktion i infiltrationen. Givet beregningerne i Afsnit 5.2, *Varmebudgettet*, vil dette kunne give en reduktion i infiltrationen på omkring 40 %.

##### Menneskelig indvirken

Den menneskelige indvirken på varmeforbruget er som gennemsnit for hele Bygning 85 beskeden. De interne varmelaster ser ud til at være som forventet, men indetemperaturen er dog en smule højere end hvad der typisk antages i energirammeberegninger, nemlig 20,0°C kontra 21,5°C. En reduktion af

indetemperaturen fra 21,5°C til 20,0°C vil give en reduktion af varmemeforbruget på omkring 10 % men kan give anledning til forringet komfort. En forbedring af klimaskærmen og etablering af balanceret ventilation med varmegenvinding vil dog øge komfortniveauet, således at en lavere indetemperatur kan tolereres. Ved forbedring er bygninger er der dog også altid en risiko for at opleve rebound-effekten, hvilket vil sige at beboerne efter en renovering nu kan fx hæve temperaturen og derfor bruge mere energi end tilsigtet.

### **Afkøling af fjernvarmevand**

Sidste tiltag der kan effektivisere driften af det lokale fjernvarmeværk kan ses ved at opnå bedre afkøling af retur vandet til fjernvarmeværket. Som det er vist i de tidligere afsnit giver mange af radiatorerne i Bygning 85 anledning til dårlig afkøling. Dette resulterer – for beboerne i Taastrupgaard – i højere varmeregninger idet der tillægges en strafafgift til fjernvarmeregningen grundet den dårlige afkøling.

I Taastrupgaard udgør strafafgiften omkring 0,5 millioner kroner årligt. Indregulering og hensigtsmæssig brug af radiatorerne er derfor en væsentlig brik i at nedbringe varmeregning, men også for at øge effektiviteten, hos fjernvarmeværket.

En entydig løsning på problemet er svær at formulere. Dog vurderes det at termostater med differenstrykudligning kunne modvirke problemet med for lavt og for høj vandgennemstrømning gennem radiatorerne til en vis grad. Derudover vurderes det at oplysning til beboerne omkring god brug af radiatorerne er nødvendig for at reducere problemet.

Endelig kunne det tænkes at kombinere oplysning til beboerne med et økonomisk incitament til at udnytte varmen bedre. Dette kunne tænkes at ske ved at fordele strafafgiften til de beboere der giver anledning til den.

## **6. Konklusion**

I SCA+, Arbejdspakke 3.3–3.4 haft fokus på at anvende data-baserede metoder til at kortlægge varmemeforbruget i boligbyggeri. Dels på kortlægning på bygningsniveau og dels på lejlighedsniveau. I løbet af SCA+ har der været arbejdet med Bygning 85 i boligselskabet Taastrupgaard, hvor den oprindelige plan var et evaluere bygningen før en forestående renovering og efter renoveringen. Det har dog vist sig ikke at kunne lade sig gøre at lave evalueringen efter renoveringen, pga. længere renoveringsproces en først antaget.

Ligeledes har det mod forventning været sværere at indhente data for det historiske varmemeforbrug i tilstrækkelig fin tidsopløsning. Derfor har det i Arbejdspakke 3.3–3.4 været nødvendigt at indhente data via andre kilder end varmemålere. For at få data med så fin tidsopløsning som muligt har vi været

nødsaget til at kombinere det månedlige registrerede historiske varmeforbrug med dagsværdier fra fordelingsmålerne, der er monteret på hver enkelt radiator i bygningen. Med udgangspunkt i denne data har det været muligt at genskabe varmeforbruget på dagsniveau med umiddelbart fornuftig præcision. Denne tilgangsmåde ses som en god fremtidig metode til at generere historiske varmeforbrugsdata på dagsniveau. Metoden vurderes at være brugbar i mange tilfælde, hvor der ønskes analyser på lejlighedsbyggeri. Der opfordres dog til at lave yderligere forskning i metoden for at evaluere den yderligere.

Trods vanskelighederne i at indhente data er det lykkedes at afprøve metoder til data-baseret energipreformance screening på Bygning 85 i Taastrupgaard før renoveringen er igangsat. Med udgangspunkt i tidligere studier og videreudviklende metoder er det lykkedes at kortlægge varmeforbruget i Bygning 85, samt finde indicier på årsager til den for høje returtemperatur til fjernvarmeværket.

Resultaterne fra metoderne er visualiseret i et grafisk webinterface hvor enkelte bygningers-performance kan sammenlignes, sorteres og filtreres. Ligeledes kan hver enkelt radiator ses, og et estimat på hvor god afkøling den yder til varmesystemet kan ses.

Baseret på de data-drevne metoder er der draget følgende tre hovedkonklusioner ang. potentielle tiltag der vil reducere varmeforbruget betydeligt eller reducere driftsomkostningerne.

1. Ventilationstabet udgør langt størstedelen af varmetabet. Tre oplagte tiltag i forbindelse med den forestående renovering er derfor at 1) etablere varmegenvinding på ventilationen, 2) etablere behovsstyret ventilation eller 3) nedlægge det ene af de to WC-rum med bad, således at ventilationskravet kan reduceres fra 0,5 til 0,3 l/s pr. m<sup>2</sup>.
2. Forbedre lufttætheden i forbindelse reetablering af den nye klimaskærm. Ved opfyldelse af Bygningsreglementets krav til lufttæthed vurderes det at infiltrationstabet kan reduceres med knap 30 %.
3. Oplysning til beboerne om god udnyttelse af varmen, og derved bedre afkøling af fjernvarmandet. Alternativt kan det overvejes om differenstermostat skal monteres for at modvirke ekstreme brugsmønstre (helt lukket eller helt åben radiatorventil).

## Referencer

*Bolig- og Planstyrelsen (2022):* Bygningsreglementet 2018.  
<https://bygningreglementet.dk>

*Copernicus Climate Data Store (2022):* ERA5-Land hourly data from 1950 to present. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=overview>



*Rasmussen, Christoffer; Bacher, Peder; Cali, Davide; Nielsen, Henrik Aalborg & Madsen, Henrik (2020): Method for Scalable and Automatised Thermal Building Performance Documentation and Screening. Energies. 2020; 13(15):3866. <https://doi.org/10.3390/en13153866>*

*Rasmussen, Christoffer; Hviid, Christian Anker; Bacher, Peder; Cali, Davide & Madsen, Henrik (2021): Estimating Building Airtightness from Data – A Case Study. Cold Climate HVAC & Energy 2021; E3S Web of Conferences 246. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124610004>*

*Rasmussen, Christoffer; Lassen, Niels; Bacher, Peder; Dokka, Tor Helge & Madsen, Henrik (2022): Data-driven estimation of time-varying stochastic effects on building heat consumption related to human interactions. Energy & Buildings, 2022 (submitted)*

*Aggerholm, Søren (2018): SBI-anvisning 213, Bygningers Energibehov, Beregningsvejledning. Aalborg University, The Department of the Built Environment*

## Anerkendelser

Udover deltagerne i SCA+ ønsker der at særligt tak til:

Boligselskabet AKB Taastrup og særligt til Kim Thrane Møller, Varmeværksleder i Taastrupgaard, for upåklagelig bistand gennem hele projektet, Kim Hansen, Ejendomsserviceteknikerelev, for bistand i forbindelse med opsætning af indeklimate sensorer i Taastrupgaard, og Micheal Riis Nyrand, Ejendomsleder Taastrupgaard, for godt samarbejde.

Beboerne fra Bygning 85, Taastrupgaard for samarbejde og imødekommenhed igennem hele projektet og særligt i forbindelse med opsætning af indeklimate sensorer.

Wissenberg A/S - Rådgivende Ingeniører for dimensionering af varmemåler til Bygning 85.

Ltech, for hurtig service i forbindelse med CTS'arbejde.

Brunata for at give adgang til varmfordelingsmålerdata og indeklimate data.