



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Aalborg Universitet

Vedvarende energi i energirammen

Rose, Jørgen; Kragh, Jesper

Publication date:
2016

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Rose, J., & Kragh, J. (2016). *Vedvarende energi i energirammen*. (1. udgave udg.) SBI Forlag. SBI Nr. 2016:24

General rights

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

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

Take down policy

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



STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT
AALBORG UNIVERSITET KØBENHAVN

VEDVARENDE ENERGI I ENERGIRAMMEN

SBI 2016:24



Vedvarende energi i energirammen

Jørgen Rose
Jesper Kragh

Titel	Vedvarende energi i energirammen
Serietitel	SBi 2016:24
Udgave	1. udgave
Udgivelsesår	2016
Forfattere	Jørgen Rose, Jesper Kragh
Sprog	Dansk
Sidetæl	54
Litteratur- henvisninger	Side 44
Emneord	Bygningsreglement, energiberegninger, energi, solceller, parcelhuse, kontorbyggeri.
ISBN	978-87-563-1810-5
Fotos	SBi
Udgiver	Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, A.C. Meyers Vænge 15, 2450 København SV E-post sbi@sbi.aau.dk www.sbi.dk

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

Forord

Formålet med analysen er at belyse i hvilket omfang, det er nødvendigt at kunne indregne vedvarende energi (VE) i energirammen, når der tages hensyn til, at nogle bygninger kan have et større energibehov end den gennemsnitlige bygning som følge af arkitektoniske ønsker eller begrænsninger fra lokalplaner. Hvordan og i hvilket omfang VE benyttes som buffer, i disse tilfælde skal undersøges. Endvidere skal det belyses, hvad de økonomiske konsekvenser vil være, hvis man alternativt til VE skal dække den manglende energimæssige ydeevne ved yderligere energieffektivisering af bygningen.

Rapporten består af en kortfattet beskrivelse af baggrund, formål og metode, en gennemgang af de anvendte beregningsmodeller og af de udførte analyser, behandling og diskussion af resultater samt en konklusion.

Projektet er udført af seniorforsker Jørgen Rose og seniorforsker Jesper Kragh, begge fra SBI.

Denne analyse er udarbejdet for Trafik- og Byggestyrelsen.
Arbejdet påbegyndtes ultimo februar 2016.

Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet
Afdelingen for Bygningers Energieffektivitet,
Indeklima og Bæredygtighed
November 2016

Søren Aggerholm
Forskningschef

Indhold

Indledning	5
Baggrund.....	5
Formål	6
Beregningsmodeller.....	7
Bygningsgeometri	7
Facadekompleksitet	7
Areal af døre og vinduer	8
Skygger	8
Orientering.....	9
Bygningskonstruktioner.....	9
Klimaskærm.....	9
Varmekapacitet	10
Bygningssystemer.....	10
Ventilationsanlæg.....	10
Varme- og varmt brugsvandsanlæg.....	10
Belysningsanlæg (kun kontorbygninger).....	11
Køleanlæg	12
Opsummering	13
Resultater	14
Referencebygninger.....	14
Etageboliger	15
Varmekapacitet	18
Orientering.....	18
Vinduer	19
Fri beliggenhed kontra tæt bebyggelse.....	19
Kompleksitet.....	20
Antal etager	20
Kontorbygninger.....	21
Antal etager	23
Varmekapacitet	24
Orientering.....	24
Vinduer	25
Fri beliggenhed kontra tæt bebyggelse.....	26
Kompleksitet.....	26
Økonomi for alternativ til vedvarende energi	27
Betydning for el-nettet.....	31
Parcelhuse	34
Større bygninger	37
Sammenfatning.....	39
Konklusion	43
Referencer	44
Appendiks A. Resultater for etageboliger.....	45
Appendiks B. Resultater for kontorbygninger.....	50

Indledning

Indregning af vedvarende energi (VE) er krævet i henhold til Bygningsdirektivet [1]. En generel baggrund og uddybning af forudsætningerne for indregning af VE er ønsket, herunder konsekvenser for elnettet.

Baggrund

I forbindelse med nærværende projekt er der lavet et "træk" i Energimærkningsordningens database (EMO-databasen) for at fastlægge, hvor mange bygninger med solcelleanlæg der er opført, siden Lavenergiklasse 2015 og Bygningsklasse 2020 blev introduceret med Bygningsreglementet i 2010 [2]. Trækket er foretaget 16. marts 2016. Tabel 1 viser, hvor mange bygninger der er opført i Danmark siden 2011 indenfor hvert energimærke, samt hvilken andel af disse bygninger som har indregnet solceller i energirammen.

Tabel 1. Bygninger opført siden 2011, energimærker og andel med solceller.

Energiklasse	Antal bygninger	Andel med solceller
A2020	1785	96%
A2015	4831	30%
A2010	12563	3%
B	1146	1%
Total	20.325	100%

Tabellen viser, at næsten alle bygninger opført som Bygningsklasse 2020 har installeret solceller, mens ca. 1/3 af bygninger opført som Lavenergiklasse 2015 har installeret solceller. Der er altså i alt opført 3163 bygninger, som opfylder enten Lavenergiklasse 2015 eller Bygningsklasse 2020, som har installeret solcelleanlæg.

Herefter udfærdiges en sortering, således at der udelukkende udtrækkes data for hhv. enfamiliehuse (BBR kode 110 og 120), etageboligbygninger (kode 140) (herefter benævnt etageboliger) og bygninger til kontor og handel (kode 320). Tydeligt fejlbehæftede mærker er frasorteret. Tabel 2 viser fordelingen af bygninger.

Tabel 2. Enfamiliehuse, etageboliger og bygninger til kontor og handel opført siden 2011, som opfylder kravet til enten Lavenergiklasse 2015 eller Bygningsklasse 2020 og har installeret solcelleanlæg. Antal bygninger og gennemsnitligt bolig- og erhvervsareal.

Bygningstype	A2015		A2020	
	Antal [-]	Gnms. Areal [m ²]	Antal [-]	Gnms. Areal [m ²]
Enfamiliehuse	554	181	1258	192
Etageboliger	148	4011	13	2641
Bygninger til kontor og handel	47	10267	20	6805
Total	749		1291	

Det bemærkes, at det statistiske materiale er lidt "tyndt" for hhv. etageboliger og bygninger til kontor og handel, specielt hvad angår Bygningsklasse 2020, og det skal naturligvis holdes in mente i det følgende.

For hver af bygningerne fra Tabel 2 kan det beregnes, hvor store solcelleanlæg (angivet i kW_p pr. 100 m² etageareal for enfamiliehuse og pr. 1000 m² etageareal for etageboliger og bygninger til kontor og handel) bygningerne har installeret. I Tabel 3 er vist resultatet af denne beregning.

Tabel 3. Middel kW_p pr. 1000 m² opvarmet etageareal for solcelleanlæg installeret i hhv. enfamiliehuse, etageboliger og bygninger til kontor og handel i afhængighed af energimærke.

	A2015	A2020	Enhed
Enfamiliehuse	1,2	2,0	kW _p pr. 100 m ²
Etageboliger	3,7	4,6	kW _p pr. 1000 m ²
Kontorbygninger	6,1	8,7	kW _p pr. 1000 m ²

Tabel 3 viser, at parcelhusene i gennemsnit har installeret hhv. 1,2 kW_p og 2,0 kW_p pr. 100 m² etageareal i bygninger, som opfylder hhv. Lavenergiklasse 2015 og Bygningsklasse 2020. For et typisk enfamiliehus på 180 m², svarer dette til anlæg på hhv. ca. 2,1 kW_p og 3,6 kW_p.

For etageboliger og bygninger til kontor og handel viser Tabel 3, at der er brugt solcelleanlæg med hhv. 3,7 kW_p og 6,1 kW_p pr. 1000 m² etageareal for bygninger, som opfylder Lavenergiklasse 2015 og hhv. 4,6 kW_p og 8,7 kW_p pr. 1000 m² etageareal for bygninger, som opfylder Bygningsklasse 2020.

Det er vigtigt at bemærke, at resultaterne ovenfor ikke nødvendigvis siger noget om, i hvilken udstrækning solcelleanlæg har været nødvendigt for at opfylde kravene i bygningsreglementet. For nogle bygninger installeres solcelleanlæg af andre grunde.

Derudover er det ligeledes vigtigt at bemærke, at bygningerne fra EMO-databasen er opført under andre regler ift. indregning af solcellestrøm i energirammen, end de regler man har i dag. Dette kan naturligvis også have en indflydelse på anlæggenes størrelse. I analyserne lavet i nærværende projekt er der taget udgangspunkt i de nugældende regler for indregning af vedvarende energi.

Formål

Formålet med opgaven er at belyse, i hvilket omfang det er nødvendigt at kunne indregne vedvarende energi i energirammen, når der tages hensyn til, at nogle bygninger kan have et større energibehov end den gennemsnitlige bygning som følge af arkitektoniske ønsker eller begrænsninger fra lokalplaner. Hvordan og i hvilket omfang VE benyttes som buffer i disse tilfælde skal undersøges. Endvidere skal det belyses, hvad de økonomiske konsekvenser vil være, hvis man alternativt til VE skal dække den manglende energimæssige ydeevne ved yderligere energieffektivisering af bygningen.

For at besvare disse spørgsmål gennemføres en analyse af primært de større bygninger som etageboliger og kontorbygninger med forskellig udformning og størrelse, således at det belyses, hvor store variationer der er i behovet for indregning af VE for at opfylde kravene til hhv. energirammen for nye bygninger i 2015 og Bygningsklasse 2020. Denne variation vil være afhængig af bygningernes orientering, størrelse, bygningsudformning/geometri mv., så der vil blive udvalgt en række eksempler, der er repræsentative for dansk byggeri. Herefter vil der kunne sættes et interval for behovet for indregning af VE i de større bygninger.

Beregningsmodeller

Analyserne gennemføres vha. en række Be15 [3] beregningsmodeller. Som udgangspunkt regnes der på to forskellige typer bygninger; etageboliger og kontorer. Resultaterne fra disse analyser ekstrapoleres efterfølgende til større bygninger som fx hospitaler. Til sidst udføres en lignende, men væsentligt mindre omfattende, analyse for enfamiliehuse.

Bygningerne antages alle at være opvarmede med fjernvarme, og som vedvarende energikilde regnes udelukkende med solcelleanlæg.

Bygningsgeometri

Analyserne gennemføres vha. en række generiske bygningsmodeller som defineres ud fra simple geometriske principper. Bygningerne er generelt rektangulære, 50 m lange og har fra 2 – 6 etager. Kontorbygninger er 16 m brede og har en etagehøjde på 3,6 m, mens etageboliger er 10 m brede og har en etagehøjde på 3,0 m. Bygningernes opvarmede etageareal varierer hermed fra 1600 m² til 4800 m² for kontorbygninger og fra 1000 m² til 3000 m² for etageboliger.

Bygningerne har generelt fuld opvarmet kælder med bruttoareal på hhv. 800 m² for kontorbygninger og 500 m² for etageboliger. Kælderen tæller med i det opvarmede etageareal med 50 %. For etageboliger er 25 % af kælder- ydervæggen over jord, og der er vinduer i 25 % af arealet. I kontorbygninger er hele kælderen under terræn.

I etageboliger antages det, at lejligheder udgør 85 % af det opvarmede etageareal og trapperum mv. udgør 15 % af det opvarmede etageareal.

I kontorbygninger antages det, at kontorerne udgør 85 % af det opvarmede etageareal, trapperum udgør 10 % og servicerum mv. udgør 5 % af det opvarmede etageareal.

Facadekompleksitet

Facadens geometriske kompleksitet vil have en væsentlig betydning for bygningens transmissionstab. Derfor indføres en faktor for facadekompleksiteten. Faktoren kan enten være 0 %, svarende til at facadearealet er mindst muligt, eller 50 %, svarende til at facadearealet er forøget med 50 % uden at det opvarmede etageareal påvirkes. Figur 1 viser et eksempel på en facade, som har et væsentligt større transmissionsareal end en bygning med færre etager og simpel rektangulær geometri.



Figur 1. Boligbebyggelsen Havneholmen i København (Lundgaard & Tranberg Arkitekter)

Facadens kompleksitet kan samtidig medføre et ønske om, at ydervægs-konstruktionen får et slankere udtryk (fx ved vinduespartier som skydes frem i facaden). Det antages, at en slankere ydervægsfacade og spring i facadens geometri (flere kuldebroer), kan medføre at den gennemsnitlige U-værdi for ydervæggen fordobles (dog højest svarende til mindstekravet i BR15 [4]). Parametrene kombineres på i alt 3 måder;

Tabel 4. Variationer for facadens kompleksitet.

	Facadeareal [%]	Etageboliger U-værdi [W/m ² K]	Kontorbygninger U-værdi [W/m ² K]
Lav kompleksitet	100	0,12	0,18
Middel kompleksitet	150	0,12	0,18
Høj kompleksitet	150	0,24	0,30

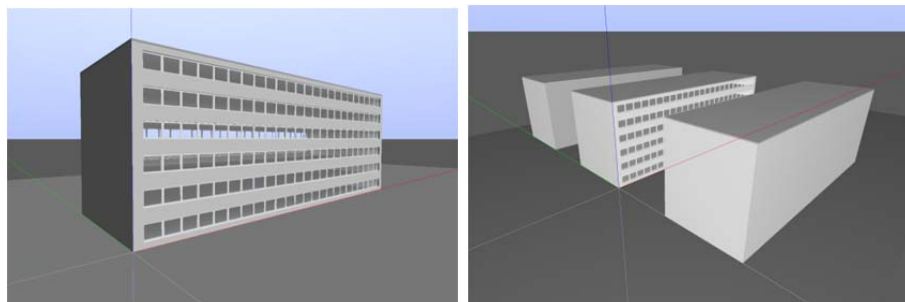
Areal af døre og vinduer

Arealet af døre og vinduer har også en væsentlig betydning for bygningernes energibehov. For etageboliger gennemføres beregninger for 2 forskellige niveauer, svarende til 20 % og 30 % vinduesareal i forhold til det opvarmede etageareal, og for kontorbygninger gennemføres beregninger for 3 niveauer, svarende til hhv. 20 %, 30 % og 40 %.

I kontorbygninger er vinduerne arrangeret i vinduesbånd i de to facader, således at vinduesarealet er ens mod hhv. syd og nord. I etageboliger antages det, at vinduerne er arrangeret med 2/3 mod syd og 1/3 mod nord.

Skygger

Bygningers energiforbrug er i høj grad afhængigt af solenergitilskuddet. Nogle bygninger kan være beliggende i områder, hvor en stor del af solen afskærmes af omkringliggende bygninger eller andre skyggegivere.



Figur 2. Fri beliggenhed (venstre) og tæt bebyggelse (højre).

Der gennemføres beregninger med to forskellige niveauer af skygger, svarende til hhv. en fritliggende bygning og en bygning med lignende bygninger tæt på, se Figur 2.

For nemheds skyld anvendes en gennemsnitlig horisontvinkel for samtlige vinduer. I tabellen nedenfor er angivet horisontvinklen for vinduer i afhængighed af antallet af etager og skyggeforhold. Skyggeforholdene for "tæt bebyggelse" svarer til, at der er bygninger i samme højde beliggende 14 m fra facaderne til begge sider.

Tabel 5. Horisontvinkler for vinduer.

	Etagebolig		Kontor
	Facade	Kælder	Facade
Fri beliggenhed			
2, 3, 4 eller 6 etager	10° ^{*)}	15°	10° ^{*)}
Tæt bebyggelse			
2 etager	12°	25°	14°
3 etager	17°	34°	20°
4 etager	22°	41°	26°
6 etager	30°	53°	35°

^{*)} kun i stueetagen

Orientering

For kontorbygningers vedkommende varierer bygningens orientering således, at facaderne vender hhv. mod nord-syd (0°) eller øst-vest (90°). For etageboligens vedkommende orienteres bygningen med 2/3 af vinduesarealet mod hhv. nord-syd (0°), øst-vest (90°) eller syd-nord (180°).

Bygningskonstruktioner

Der er generelt anvendt konstruktioner med højt isoleringsniveau. Idet der er tale om generiske bygninger, er der ikke taget stilling til konstruktionernes detaljerede opbygning, men udelukkende fokuseret på de isoleringstykkelser, der er anvendt i de enkelte bygningsdele.

Klimaskærm

Tabel 6 viser isoleringstykkelser og U-værdier for etageboliger.

Tabel 6. Isoleringstykkelser og U-værdier for konstruktioner samt ψ -værdier for kuldebroer. Etagebolig.

Konstruktion	Isoleringstykkelse	U-værdi
	[mm]	[W/m ² K]
Ydervæg	300 (150 [*])	0,12 (0,24 [*])
Kælderydervæg o. terræn	300 (150 [*])	0,12 (0,24 [*])
Kælderydervæg u. terræn	300 (150 [*])	0,11 (0,22 [*])
Tagkonstruktion	400	0,10
Kældergulv	300	0,10
Vinduer	-	0,90
Samling		ψ -værdi
		[W/mK]
Fundament		0,12
Vindue/ydervæg		0,00

* værdier benyttet ved høj facadekompleksitet

For kontorbygninger har ydervægge og kælderydervægge mindre isolering, se Tabel 7. De øvrige konstruktioner fra Tabel 6 fastholdes.

Tabel 7. Isoleringstykkelser og U-værdier for ydervægge og kælderydervægge. Kontorbygning.

Konstruktion	Isoleringstykkelse [mm]	U-værdi [W/m ² K]
Ydervæg	200 (125*)	0,18 (0,30*)
Kælderydervæg o. terræn	200 (125*)	0,18 (0,30*)
Kælderydervæg u. terræn	200 (125*)	0,17 (0,28*)

* værdier benyttet ved høj facadekompleksitet

I etageboliger har vinduerne en glasandel på 70 % og en afskærmningsfaktor på 1,0, og ruderne har en g-værdi på 0,63. Solafskærmningen aktiveres ikke om vinteren i opvarmningssæsonen, når der er opvarmningsbehov i bygningen.

I kontorbygninger har vinduerne en glasandel på 80 % og en afskærmningsfaktor på 0,15, og ruderne har en g-værdi på 0,45.

Varmekapacitet

Varmekapaciteten for bygningerne varierer svarende til middel let og ekstra tung, dvs. hhv. 80 og 160 Wh/K m².

Bygningssystemer

Bygningernes systemer fastholdes så vidt muligt, dog skaleres fx varmesystemer, varmtvandssystemer, rør længder mv., således at det afspejler bygningernes varierende størrelser.

Ventilationsanlæg

Bygningerne har balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding.

I etageboliger dækker den mekaniske ventilation lejligheder og kælderen, mens trappeopgange har naturlig ventilation. Den mekaniske ventilation har en genvindingsgrad på 80 % og en SEL-værdi på 1,2 kJ/m³. I lejligheder ventileres 0,315 l/s pr. m², mens der i kælderen ventileres 0,30 l/s pr. m². Generelt regnes med en lufttæthed svarende til en infiltration på 0,10 l/s pr. m². Om sommeren kan luftskiftet gennem vinduer/døre forøges til 2,1 l/s pr. m² i lejligheder og opgange.

I kontorbygninger er der mekanisk ventilation i hele bygningen, og der er varmegenvinding på ventilationen i kontorerne og i kælderen. Varmegenvindingen har en genvindingsgrad på 80 % og en SEL-værdi på 1,2 kJ/m³, og der ventileres 0,75 l/s pr. m² i kontorer og 0,30 l/s pr. m² i kælderen. I øvrige rum er der mekanisk udsugning, som har en SEL-værdi på 0,9 kJ/m³, og der fjernes 0,45 l/s pr. m². Generelt regnes med en lufttæthed svarende til en infiltration på 0,10 l/s pr. m² i brugstiden og 0,06 l/s pr. m² udenfor brugstiden. Om sommeren kan luftskiftet via ventilationsanlægget forøges til 1,5 l/s pr. m² i kontorer.

Varme- og varmt brugsvandsanlæg

Alle rør i varmfordelingsanlægget ligger indenfor den opvarmede del af bygningen, og skal dermed ikke medtages i opgørelsen.

Varmeanlæg og varmt brugsvandsanlæg skaleres efter bygningernes størrelse. I Tabel 8 er opstillet de vigtigste parametre.

Tabel 8. Beskrivelse af varmt brugsvandsanlæg.

Bygningstype	Etagebolig				Kontor			
	2	3	4	6	2	3	4	6
Varmt vand								
VVB, volumen [l]	375	500	750	1125	250	375	500	750
VVB, tab [W/K]	2,7	3,6	5,4	8,1	1,5	2,2	2,9	4,4
Tilslut.rør, længde [m]	5	5	5	5	5	5	5	5
Tilslut.rør, tab [W/m]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Cirk.pumper, antal [-]	1	1	1	1	1	1	1	1
Cirk.pumper, Effekt [W]	50	50	75	75	30	35	40	50
Cirk.pumper, F_p [-]	1,00	1,00	1,00	1,00	0,25	0,25	0,25	0,25
VV rør, kælder [m]	60	60	60	60	10	10	10	10
VV rør, lodret ford. [m]	60	80	100	140	10	17	24	38
VV rør, tab [W/m]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Varmeanlæg								
Cirk.pumper, antal [-]	1	1	1	1	1	1	1	1
Cirk.pumper, Effekt [W]	125	125	125	125	60	70	80	100
Cirk.pumper, F_p [-]	1,00	1,00	1,00	1,00	0,40	0,40	0,40	0,40

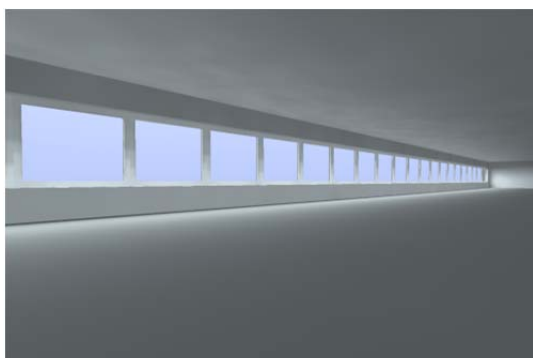
Belysningsanlæg (kun kontorbygninger)

I kontorbygninger opdeles belysningen for kontordelen i 3 zoner på hver etage; 0,5 – 2,0 m, 2,0 – 4,0 m og 4,0 – 8,0 m fra facaden. Minimum almenbelysning sættes til $0,1 \text{ W/m}^2$, installeret almenbelysning til $5,5 \text{ W/m}^2$, ønsket belysningsniveau til 300 lux, arbejdsbelysningen til $0,9 \text{ W/m}^2$ og andet til $1,0 \text{ W/m}^2$. Lyset styres kontinuert automatisk efter dagslyset i zonen. Benyttelsesfaktoren er 0,8 for kontorerne, 0,6 for trapperum, toiletter mv. og 0,1 for kælderen.

Bygningerne med vinduesareal svarende til 20 % af etagearealet har et vinduesbånd på hver side af bygningen med en højde på 1,6 m, mens bygningerne med vinduesareal svarende til 30 % og 40 % af etagearealet har tilsvarende med en højde på hhv. 2,4 m og 3,2 m.

Beregninger af dagslysfaktorer er foretaget med programmet DIALux Evo [5]. Beregningerne foretages som gennemsnitlige værdier for zonerne i en højde på 0,8 m over gulv. Skyggende omgivelser har en reflektans på 0,25 og den indvendige reflektans er 0,2 for gulv, 0,5 for væg og 0,7 for loft.

Figur 3 viser en bygning med vinduesbånd på 1,6 m set indefra.



Figur 3. Eksempel på vinduesbånd i facade af kontorbygning.

De beregnede dagslysfaktorer er angivet i Tabel 9, Tabel 10 og Tabel 11.

Tabel 9. Dagslysfaktorer for kontorbygninger, vinduesareal 20 % af etageareal.

	Fri beliggenhed			Tæt bebyggelse		
	0,5 – 2,0 m	2,0 – 4,0 m	4,0 – 8,0 m	0,5 – 2,0 m	2,0 – 4,0 m	4,0 – 8,0 m
Stue	8,3	2,8	1,3	1,7	0,3	0,3
1. sal	8,3	2,8	1,3	2,0	0,6	0,3
2. sal	8,3	2,8	1,3	3,1	0,6	0,3
3. sal	8,3	2,8	1,3	4,7	0,7	0,4
4. sal	8,3	2,8	1,3	6,6	1,4	0,5
5. sal	8,3	2,8	1,3	8,0	2,4	1,0

Tabel 10. Dagslysfaktorer for kontorbygninger, vinduesareal 30 % af etageareal.

	Fri beliggenhed			Tæt bebyggelse		
	0,5 – 2,0 m	2,0 – 4,0 m	4,0 – 8,0 m	0,5 – 2,0 m	2,0 – 4,0 m	4,0 – 8,0 m
Stue	11,2	4,5	2,2	3,0	0,9	0,5
1. sal	11,2	4,5	2,2	4,0	0,9	0,5
2. sal	11,2	4,5	2,2	5,9	1,1	0,5
3. sal	11,2	4,5	2,2	7,7	1,7	0,6
4. sal	11,2	4,5	2,2	9,4	3,1	0,9
5. sal	11,2	4,5	2,2	10,7	4,2	1,8

Tabel 11. Dagslysfaktorer for kontorbygninger, vinduesareal 40 % af etageareal.

	Fri beliggenhed			Tæt bebyggelse		
	0,5 – 2,0 m	2,0 – 4,0 m	4,0 – 8,0 m	0,5 – 2,0 m	2,0 – 4,0 m	4,0 – 8,0 m
Stue	14,4	6,2	3,0	4,3	1,2	0,6
1. sal	14,4	6,2	3,0	5,6	1,3	0,7
2. sal	14,4	6,2	3,0	8,0	1,6	0,8
3. sal	14,4	6,2	3,0	10,1	2,7	0,9
4. sal	14,4	6,2	3,0	12,2	4,4	1,4
5. sal	14,4	6,2	3,0	13,8	5,6	2,6

Trapperum, toiletter mv. har en installeret effekt til almenbelysning på $2,5 \text{ W/m}^2$ og et ønsket belysningsniveau på 50 lux. Lyset styres som automatisk on/off efter dagslyset i zonen. Benyttelsesfaktoren er 0,5 for toiletter og 1,0 for trapperum.

I kælderen er der installeret effekt til almenbelysning på $2,5 \text{ W/m}^2$ og et ønsket belysningsniveau på 50 lux styret manuelt. Benyttelsesfaktoren er 0,1.

Køleanlæg

I kontorbygninger er der defineret mekanisk køling, som skal sikre at der ikke forekommer overtemperaturer om sommeren. Dette er udelukkende en beregningsteknisk foranstaltning, idet det er væsentligt nemmere rent beregningsteknisk at håndtere køleanlægget end alternativer som fx forøgelse af ventilationen, natkøling osv. Justering af den mekaniske ventilation ville skulle foretages individuelt i hver enkelt model, hvor køleanlægget automatisk tilpasses til behovet.

Køleanlægget har et elforbrug på $0,25 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{kWh}_{\text{køl}}$.

Opsummering

I Tabel 12 er sammenfattet de parametre der varierer i beregningerne, samt en total for antallet af modeller. Kontorbygningen har samme vinduesareal mod syd og nord, og dermed forekommer der kun to varianter ift. orientering.

Tabel 12. Sammenfatning af modelvarianter per bygningstype etagebolig/kontorbygning.

Parameter	Variation	# varianter
Facadekompleksitet	Rynkefaktor	0 og 50 %
	$U_{\text{ydervæg, etage}}$	0,12 og 0,24 W/m ² K
	$U_{\text{ydervæg, kontor}}$	0,18 og 0,30 W/m ² K
Vinduesareal ift. opvarmet etageareal	20, 30 og 40 %	2/3*
Antal etager	2, 3, 4 og 6	4
Varmekapacitet	80 og 160 Wh/K m ²	2
Orientering	0°, 90° og 180°	3/2*
Skygger	Fri beliggenhed og	2
	Tæt bebyggelse	
Total (etagebolig/kontorbygning)		288/288

* etagebolig/kontorbygning

Resultater

Beregningerne beskrevet i foregående afsnit giver i alt 288 forskellige resultater for etageboliger og 288 for kontorbygninger. Referencemodellerne efterlever energikravene til nybyggeri. Variationer i bygningerne kan medføre et øget energibehov, og dermed vil nogle varianter ende med et energibehov, som ikke længere opfylder bygningsreglementet. I disse tilfælde bestemmes den nødvendige reduktion i energibehovet for at opfylde kravene.

Reduktionen i energibehovet opnås ved hjælp af solceller, og her benyttes en simplificeret betragtning, hvor solcellernes ydelse bestemmes ud fra faste parametre for orientering, anlæggets ydelse osv. Hermed kan der i hvert enkelt tilfælde fastlægges den nødvendige kilowatt-peak (kW_p) som anlægget skal yde, således at det er nemmere at sammenligne resultaterne på tværs af analyserne. Følgende anlæg benyttes som standard.

Peak power (RS):	0,15 kW/m^2
System virkningsgrad (Rp):	0,75
Orientering:	Syd
Hældning:	45°
Horisontafskæring:	10°

kW_p -behovet bestemmes pr. 1000 m^2 opvarmet bruttoetageareal.

I "Appendiks A. Resultater for etageboliger og Appendiks B. Resultater for kontorbygninger" er resultaterne vist grafisk for de enkelte parametre.

Referencebygninger

Der vælges en referencebygning for hhv. etageboligbyggeri og kontorbyggeri svarende til de modeller, som har det laveste energibehov, dvs. som vist i Tabel 13.

Tabel 13. Parametervalg for referencebygninger.

Parameter	Etagebolig	Kontorbygning
Facadekompleksitet	Lav	Lav
U-værdi for ydervæg	0,12 W/m^2K	0,18 W/m^2K
Vinduesareal	20 %	20 %
Etager	6	2
Varmekapacitet	160 $Wh/K m^2$	160 $Wh/K m^2$
Orientering	0°	0°
Skygger	Frit beliggende	Frit beliggende

For etageboliger opnås det laveste energibehov for bygningen i 6 etager, lav kompleksitet, lille vinduesareal, høj varmekapacitet og fri beliggenhed. For kontorbygninger opnås det laveste energibehov ved tilsvarende, dog med 2 etager i stedet for 6. De tilsvarende bygninger med 3, 4 og 6 etager opfylder dog stadig kravet til 2015-byggeri.

Energi behovet i de to referencebygninger er angivet i Tabel 14.

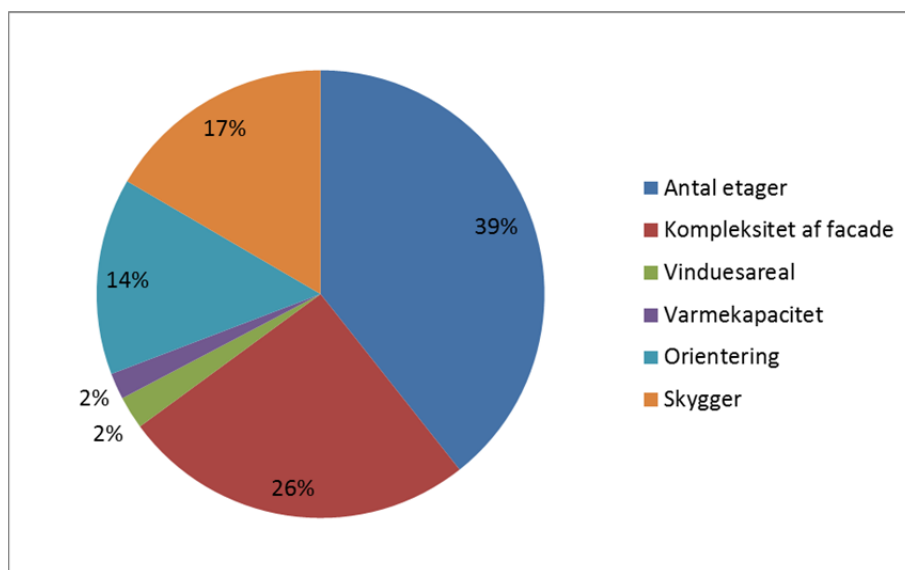
Tabel 14. Nøgletal og energibehov for referencebygninger [kWh/m²].

Bygning	2015				2020	
	Varme	El	Energibehov	Energiramme	Energibehov	Energiramme
Etagebolig	24,2	3,4	27,8	30,3	20,6	20,0
Kontorbygning	16,7	9,5	37,1	41,5	27,1	25,0

Referencebygningerne opfylder altså begge Bygningsreglementet uden brug af et solcelleanlæg. For 2020-byggeri er det nødvendigt med solceller, selv for referencebygningerne.

Etageboliger

For etageboligers vedkommende har referencemodellen et energibehov på 27,8 kWh/m², og alle de øvrige modellers energibehov er større. Det største energibehov er 48,0 kWh/m² og forekommer for modellen med 2 etager, høj kompleksitet, 30 % vinduesareal, lav varmekapacitet, orienteret med facader mod øst/vest og beliggende i tæt bebyggelse. Ved at kigge på parametrene enkeltvis og fastlægge stigningen i energibehovet for hvert step fra modellen med lavest energibehov til modellen med højest energibehov, kan den procentvise betydning af hver enkelt parameter bestemmes se Figur 4 og Tabel 15.



Figur 4. Betydningen af enkeltparametre fra modellen med lavest energibehov til modellen med højest energibehov.

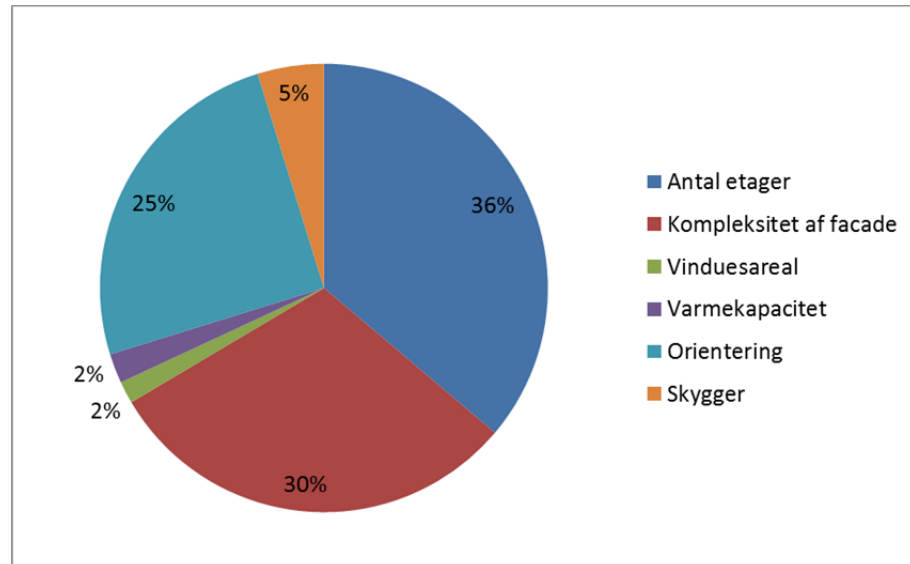
Tabel 15. Betydningen af enkeltparametre fra lavest til højest energibehov.

Parameter	Ændring	Betydning [kWh/m ²]	Betydning [%]
Antal etager	6 → 2	7,9	39,3
Kompleksitet	Lav → Høj	5,2	25,6
Vinduesareal	20 % → 30 %	0,5	2,4
Varmekapacitet	160 Wh/K m ² → 80 Wh/K m ²	0,4	1,9
Orientering	0° → 90°	2,9	14,2
Skygger	Fri beliggenhed → Tæt bebyggelse	3,4	16,6
Total		20,2	100,0

Figur 4 og Tabel 15 viser, at antallet af etager er den parameter, der har den største betydning for energibehovet, mens facadens kompleksitet har den næststørste betydning. Orienteringen og skyggeforskelene er også væsent-

lige parametre, mens vinduesarealet og varmekapaciteten stort set ikke har betydning for energibehovet.

I denne forbindelse er det vigtigt at bemærke, at de fleste af parametrene er kraftigt indbyrdes afhængige, og derfor er rækkefølgen af tiltagene af stor betydning for resultatet. Betydningen af enkeltparametre vil derfor også være anderledes, hvis udgangspunktet er modellen med det højeste energibehov. Figur 5 og Tabel 16 viser betydningen af enkeltparametrene, når man tager udgangspunkt i modellen med det højeste energibehov.



Figur 5. Betydningen af enkeltparametre fra modellen med højest energibehov til modellen med lavest energibehov.

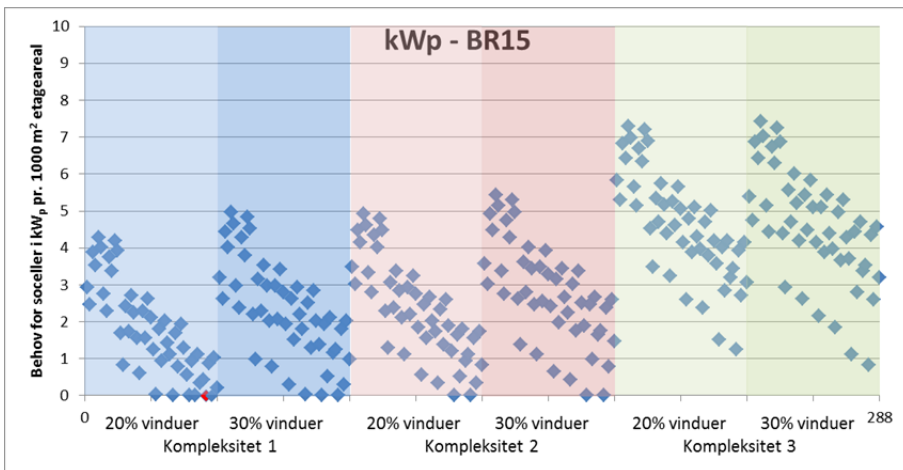
Tabel 16. Betydningen af enkeltparametre fra højest til lavest energibehov.

Parameter	Ændring	Betydning [kWh/m ²]	Betydning [%]
Antal etager	2 → 6	-7,3	36,2
Kompleksitet	Høj → Lav	-6,1	30,3
Vinduesareal	30 % → 20 %	-0,3	1,6
Varmekapacitet	80 Wh/K m ² → 160 Wh/K m ²	-0,4	2,1
Orientering	90° → 0°	-5,1	25,0
Skygger	Tæt bebyggelse → Fri beliggenhed	-1,0	4,8
Total		-20,2	100,0

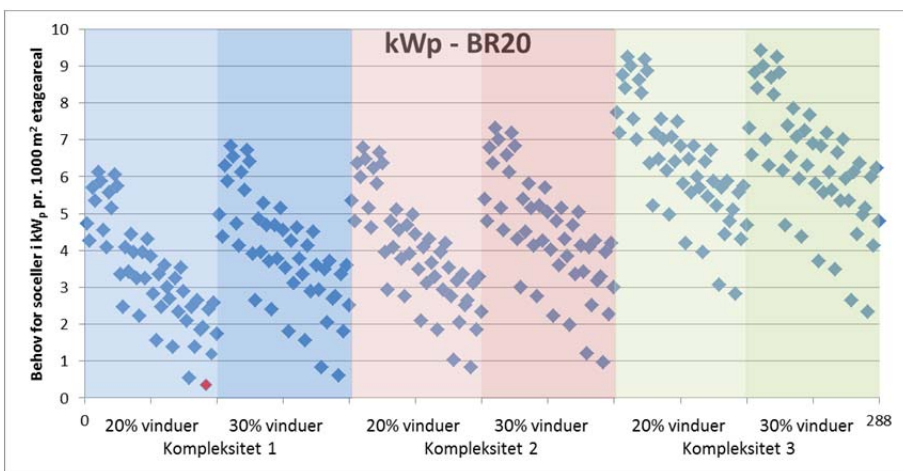
Betragtes Figur 5 og Tabel 16 er det tydeligt, at antallet af etager stadig er den parameter der har størst betydning for energibehovet, og kompleksiteten har ligeledes en væsentlig betydning. Varmekapaciteten og vinduesarealet betyder fortsat meget lidt. Orienteringen af bygningen har nu en stor betydning for energibehovet, mens skyggeforholdene kun har en relativt beskedne betydning.

Samlet set er de to vigtigste parametre for energibehovet altså antallet af etager i bygningen og kompleksiteten af bygningens facade. Orienteringen af bygningen og skyggeforholdene har begge en stor betydning, men hvis orienteringen af bygningen i forvejen er "dårlig", betyder skyggeforholdene ikke så meget.

Figur 6 og Figur 7 viser resultaterne for samtlige modeller. I figurene er referencemodellen markeret med rød farve.



Figur 6. Nødvendig supplerende kW_p-ydelse for et solcelleanlæg, således at etageboligbygningen opfylder BR15 energirammekravet ved parametervariation af antal etager, facadekompleksitet, vinduesareal, varmekapacitet, orientering og skyggeforhold.



Figur 7. Nødvendig supplerende kW_p-ydelse for et solcelleanlæg, således at etageboligbygningen opfylder Bygningsklasse 2020 energirammekravet ved parametervariation af antal etager, facadekompleksitet, vinduesareal, varmekapacitet, orientering og skyggeforhold.

Resultaterne i Figur 6 og Figur 7 kan betragtes som 3 "skyer" á 96 modeller, markeret med hhv. blå, rød og grøn; de blå er de simple rektangulære bygninger, de røde har middel facadekompleksitet og de grønne har høj facadekompleksitet og større varmetab. Hvert af de tre farveområder, blå, rød og grøn er igen opdelt i to dele svarende til hhv. en lys og mørk del; den lyse del svarer til 20 % vinduesareal og den mørke til 30 % vinduesareal. Indenfor hver enkelt farve, svarer de første 12 modeller til "2 etager", de næste 12 til "3 etager" osv.

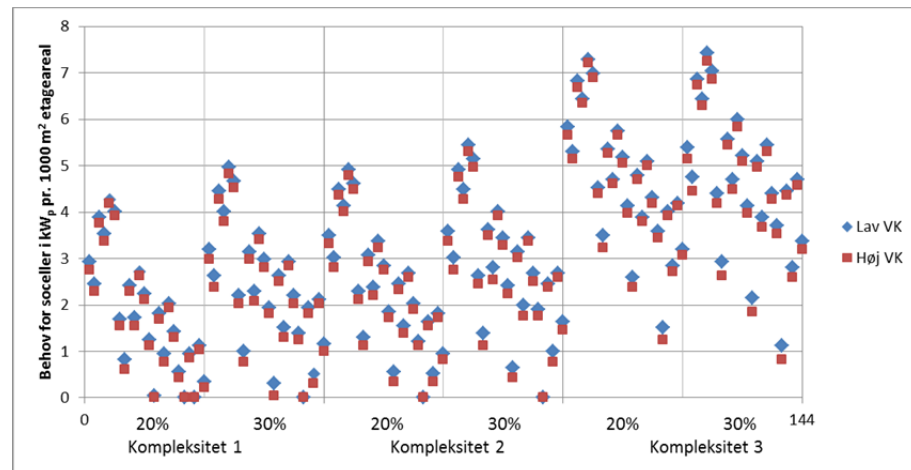
Betragter man resultaterne i Figur 6 ses det, at der ikke er stor forskel mellem resultaterne for "kompleksitet 1" og "kompleksitet 2"; i gennemsnit er forskellen 0,51 kW_p og den største forskel er 0,69 kW_p. Forskellen til "kompleksitet 3" er væsentligt større, og i gennemsnit skal der i disse modeller bruges 2,04 kW_p mere end tilsvarende "kompleksitet 2" modeller. Den største forskel er 2,42 kW_p. Derudover ses det også, at ingen "kompleksitet 3" modeller kan opfylde BR15-kravet uden et solcelleanlæg.

Sammenligner man de lyse områder med de mørke, dvs. forskellen på 20 og 30 % vinduesareal, ses det, at vinduesarealet spiller en relativt beskeden rolle, som det også fremgår af Figur 4 og Figur 5. I "kompleksitet 1" stiger behovet med op til 0,99 kW_p, i "kompleksitet 2" stiger behovet med op til 0,86 kW_p mens det i "kompleksitet 3" i nogle situationer falder med op til 0,69 kW_p og i andre situationer stiger med op til 0,52 kW_p. Fald forekommer ved "høj varmekapacitet" og "fri beliggenhed" og stigning forekommer ved "lav varmekapacitet" og "tæt bebyggelse" – som forventet.

Betragter man resultaterne i Figur 7 er forskellene generelt en anelse større, men ellers er billedet det samme. I gennemsnit er "skyerne" hævet med ca. 1,67 kW_p. Ingen modeller opfylder imidlertid kravet til Bygningsklasse 2020 uden et solcelleanlæg.

Varmekapacitet

I Figur 8 er vist sammenhørende modeller med hhv. lav og høj varmekapacitet. De første 48 sæt er "lav kompleksitet", de efterfølgende 48 sæt er "middel kompleksitet" og de sidste 48 sæt "høj kompleksitet".



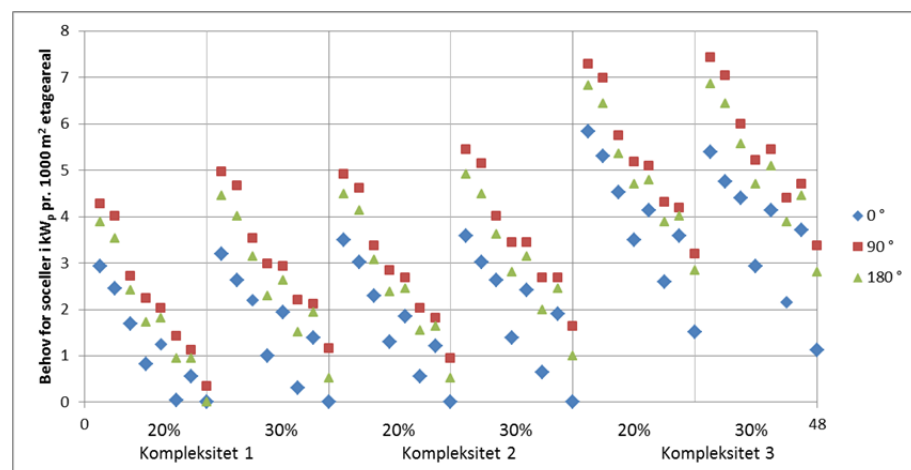
Figur 8. Sammenligning mellem modeller med hhv. lav og høj varmekapacitet.

Af figuren er det tydeligt, at varmekapaciteten ikke betyder ret meget i etageboliger. Betydningen er en anelse større i de mest komplekse bygninger, men forskellene er meget små. Den største betydning af varmekapaciteten er 0,30 kW_p og i gennemsnit medfører de høje varmekapaciteter et behov for solceller, som er 0,15 kW_p lavere end for bygninger med tilsvarende lave varmekapaciteter.

Derfor medtages i de efterfølgende analyser udelukkende resultater for modeller med lav varmekapacitet, svarende til de modeller som har størst brug for solceller. Herved bliver resultaterne væsentligt mere overskuelige.

Orientering

Etageboliger er som udgangspunkt orienteret med det største vinduesareal mod syd (0°), og varianterne svarer til at det største areal orienteres mod hhv. vest (90°) eller nord (180°). Figur 9 viser sammenligningen mellem modeller med de tre forskellige orienteringer af det største vinduesareal.

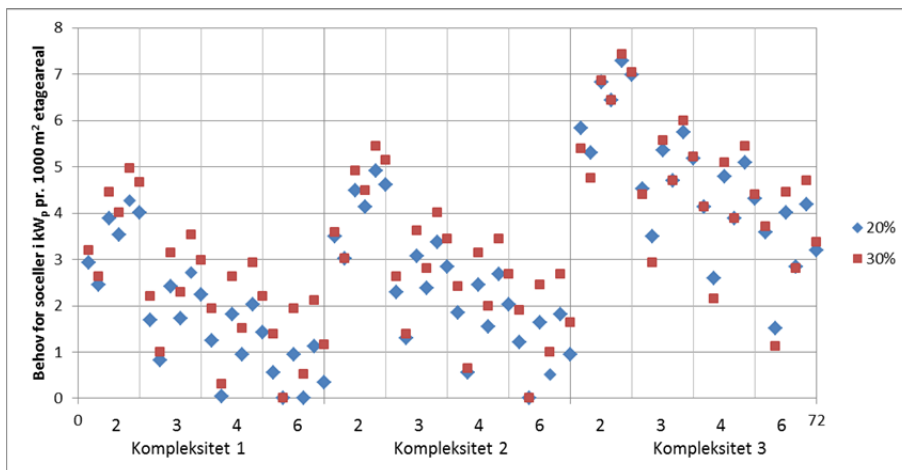


Figur 9. Sammenligning mellem modeller med orientering hhv. 0°, 90° og 180°.

Behovet for solceller er tydeligvis mindst, når de største vinduesarealer (2/3) er orienteret mod syd og resten mod nord. Behovet er størst, når vinduerne er orienteret mod hhv. vest (2/3) og øst (1/3). Orienteringen på 180° medfører et øget behov for solceller på gennemsnitligt 1,00 kW_p, mens orienteringen på 90° medfører et øget behov på gennemsnitligt 1,43 kW_p. Den største betydning forekommer for modellerne med størst kompleksitet.

Vinduer

Figur 10 viser sammenligningen af resultater med hhv. 20 og 30 % vinduesareal. I figuren er x-aksen opdelt i hhv. facadekompleksitet og antal etager.

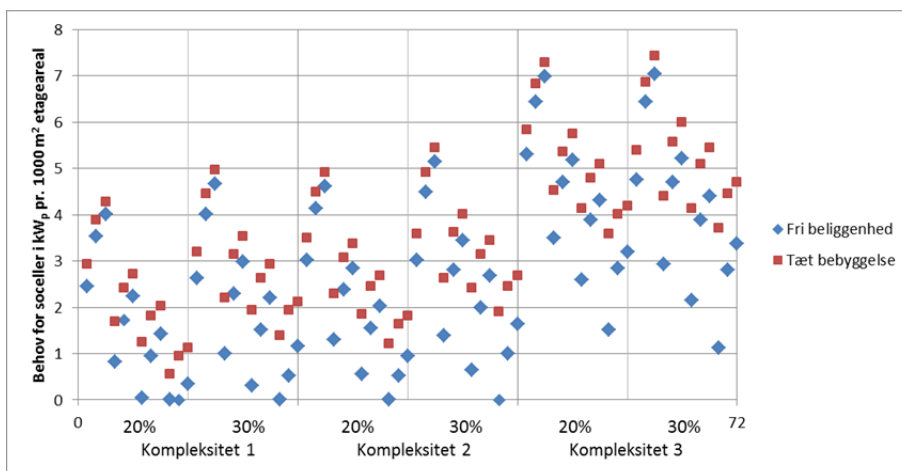


Figur 10. Sammenligning mellem modeller med hhv. 20 % og 30 % vinduesareal.

Energibehovet, og dermed behovet for solceller, bliver generelt størst, når vinduesarealerne er store – med ganske få undtagelser. De situationer, hvor en forøgelse af vinduesarealet kan medføre et mindre behov for solceller, er for de mest komplekse bygninger. Forøgelsen af vinduesarealet medfører i gennemsnit en forøgelse af behovet for solceller med ca. 0,36 kW_p, og dermed har vinduesarealet en ret beskedet betydning.

Fri beliggenhed kontra tæt bebyggelse

Etageboliger beliggende i tæt bebyggelse har et væsentligt større behov for solceller end tilsvarende frit beliggende bygninger grundet et reduceret solindfald gennem vinduerne. Figur 11 viser en sammenligning mellem bygninger med fri beliggenhed og tilsvarende bygninger i tæt bebyggelse.



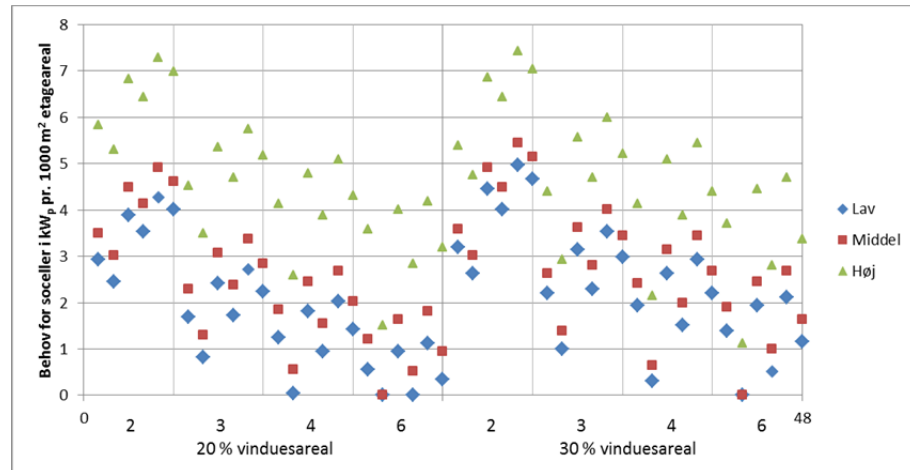
Figur 11. Sammenligning mellem modeller med hhv. fri beliggenhed og i tæt bebyggelse. Forskellen mellem skyggeforholdene er beskrevet i Tabel 5.

Det er tydeligt af figuren, at forskellen i behovet for solceller mellem fri beliggenhed og tæt bebyggelse bliver størst i de mest komplekse bygninger. Den største forskel forekommer for en kompleks bygning i 6 etager med stort vin-

duesareal og de største vinduesarealer orienteret mod syd samt en høj varmekapacitet. Her er forskellen i resultaterne $2,59 \text{ kW}_p$ og i gennemsnit for alle modellerne er forskellen $0,89 \text{ kW}_p$.

Kompleksitet

Figur 12 viser en sammenligning mellem bygninger med hhv. lav, middel og høj facadekompleksitet.

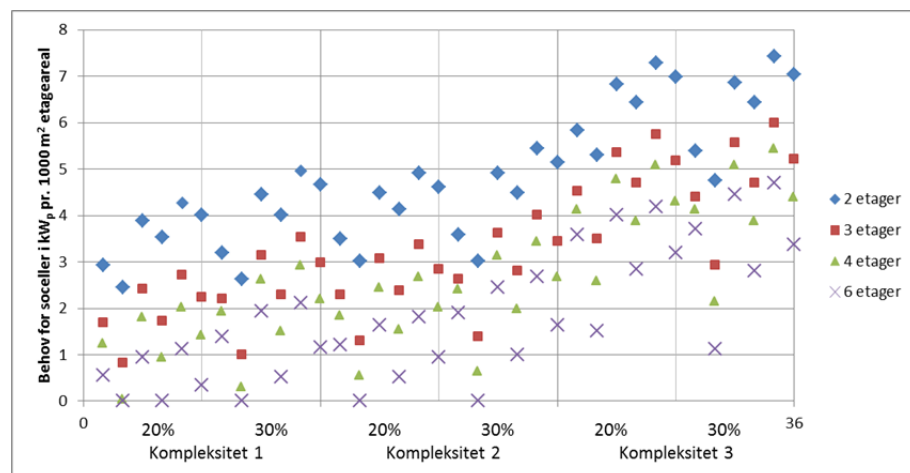


Figur 12. Sammenligning mellem modeller med hhv. lav, middel og høj facadekompleksitet. Ved middel facadekompleksitet er arealet af ydervæggene 50 % større og ved høj facadekompleksitet er ydervægsarealet både 50 % større og varmetabet markant forøget, se evt. Tabel 4.

Figuren viser tydeligt, at springet fra lav til middel kompleksitet ikke betyder så meget for behovet for solceller, mens springet fra middel til høj kompleksitet betyder væsentligt mere. Der er i øvrigt en tendens til, at forskellen er mindre ved det store vinduesareal. Den gennemsnitlige stigning i behovet for solceller er $0,54 \text{ kW}_p$ fra lav til middel og $2,08 \text{ kW}_p$ fra middel til høj.

Antal etager

I Figur 13 er vist en sammenligning af behovet for solceller i afhængighed af antallet af etager.

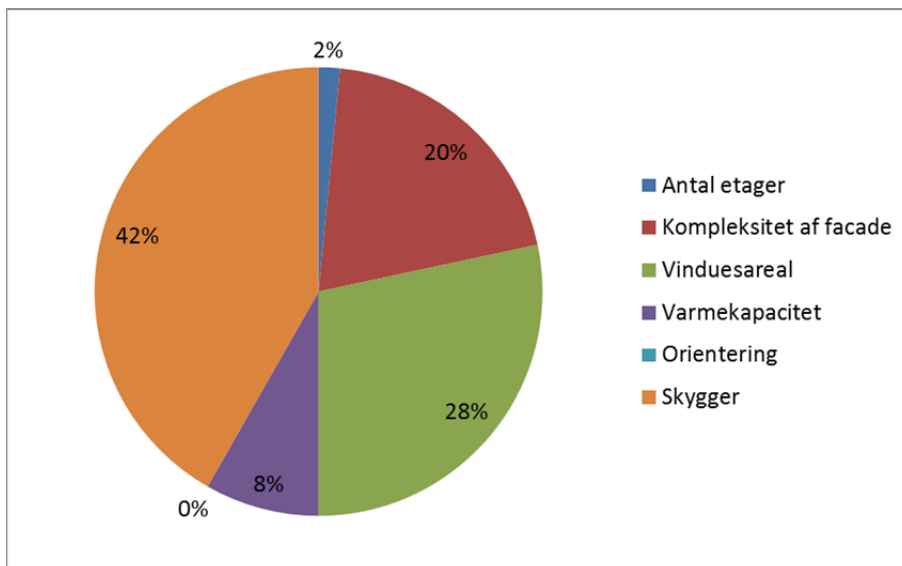


Figur 13. Sammenligning mellem modeller med hhv. 2, 3, 4 og 6 etager.

I gennemsnit falder behovet for solceller med $1,53 \text{ kW}_p$ fra 2 etager til 3 etager og med $0,65 \text{ kW}_p$ fra 3 etager til 4 etager. Fra 4 etager til 6 etager falder behovet med $0,86 \text{ kW}_p$. Dette kunne fx afspejle, at resultaterne for bygningerne med færre etager i højere grad er påvirket af kælderens, og at enkelte af bygningernes systemer (og dermed elforbrug) er uafhængige af bygningsstørrelsen.

Kontorbygninger

For kontorbygningers vedkommende har referencemodellen et energibehov på 37,1 kWh/m². Det største energibehov er på 55,7 kWh/m², og forekommer for de to modeller med hhv. 3 og 4 etager, høj kompleksitet, 40 % vinduesareal, lav varmekapacitet, orienteret med facader mod syd/nord og beliggende i tæt bebyggelse. Ved at kigge på parametrene enkeltvis og fastlægge stigningen i energibehovet for hvert step fra modellen med lavest energibehov til modellen med højest energibehov, kan bestemmes den procentvise betydning af hver enkelt parameter, se Figur 14 og Tabel 17.



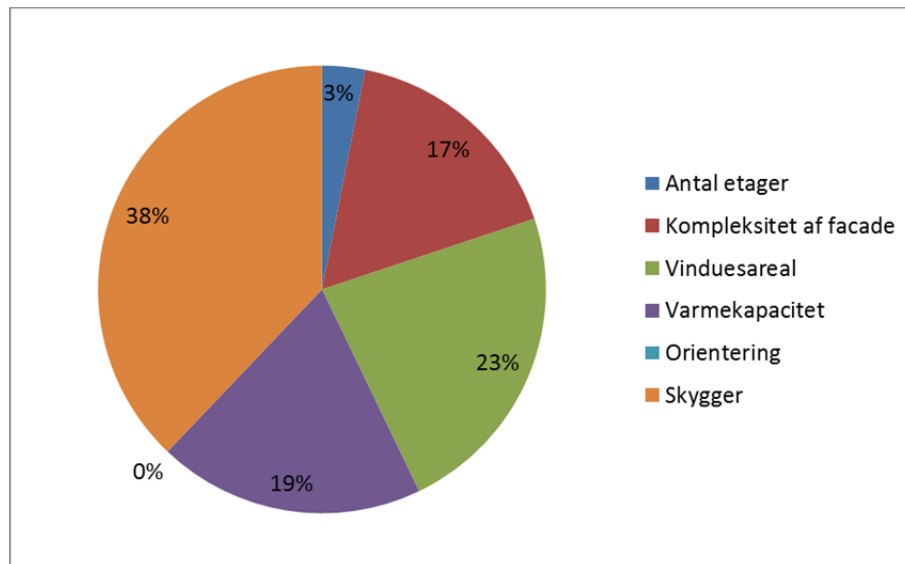
Figur 14. Betydningen af enkeltparametre fra modellen med lavest energibehov til modellen med højest energibehov.

Tabel 17. Betydningen af enkeltparametre fra lavest til højest energibehov.

Parameter	Ændring	Betydning [kWh/m ²]	Betydning [%]
Antal etager	2 → 4	0,3	1,5
Kompleksitet	Lav → Høj	3,7	20,1
Vinduesareal	20 % → 40 %	5,3	28,4
Varmekapacitet	160 Wh/K m ² → 80 Wh/K m ²	1,5	8,2
Skygger	Fri beliggenhed → Tæt bebyggelse	7,8	41,8
Total		18,6	100,0

Figur 14 og Tabel 17 viser at skyggeforholdene har den største betydning for energibehovet, mens vinduesarealet og facadens kompleksitet også har stor betydning. Varmekapaciteten spiller en mindre rolle, mens antallet af etager er stort set uden betydning.

Ligesom for etageboliger er det væsentligt, hvilken rækkefølge parametrene gennemføres i. Figur 15 og Tabel 18 viser betydningen af enkeltparametrene, når man tager udgangspunkt i modellen med det højeste energibehov.



Figur 15. Betydningen af enkeltparametre fra modellen med højest energibehov til modellen med lavest energibehov.

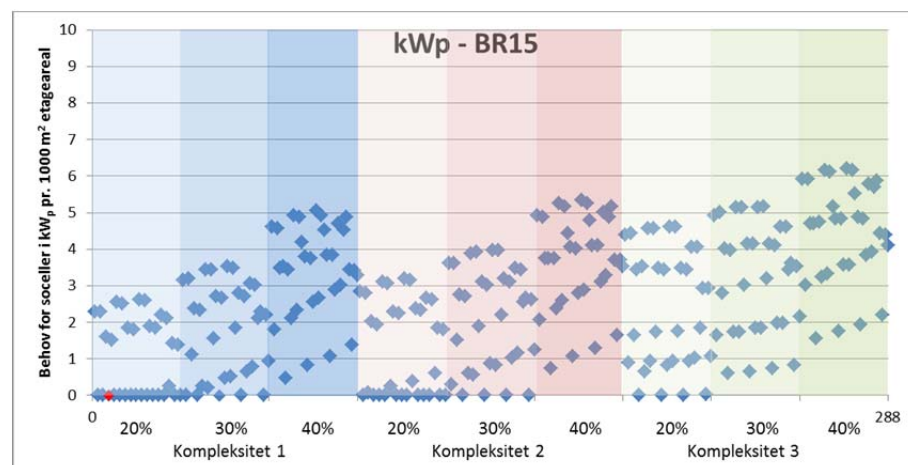
Tabel 18. Betydningen af enkeltparametre fra højest til lavest energibehov.

Parameter	Ændring	Betydning [kWh/m ²]	Betydning [%]
Antal etager	4 → 2	-0,6	3,1
Kompleksitet	Høj → Lav	-3,1	16,8
Vinduesareal	40 % → 20 %	-4,3	23,0
Varmekapacitet	80 Wh/K m ² → 160 Wh/K m ²	-3,6	19,3
Skygger	Tæt bebyggelse → Fri beliggenhed	-7,0	37,9
Total		-18,6	100,0

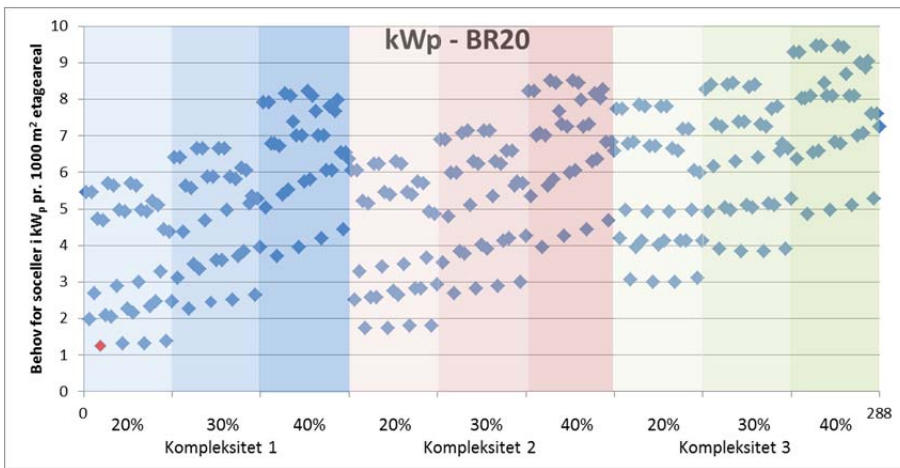
Betragtes Figur 15 og Tabel 18 er det tydeligt, at skyggeforholdene stadig er den parameter, der har størst betydning for energibehovet, men nu er betydningen af vinduesarealet og facadekompleksiteten faldet en smule og til gengæld har varmekapaciteten en væsentlig betydning. Antallet af etager er stadig uden betydning.

De tre vigtigste parametre for energibehovet er altså skyggeforholdene, vinduesarealet og kompleksiteten af facaden. Varmekapaciteten af bygningen spiller også en væsentlig rolle, hvis bygningen har et stort vinduesareal.

Figur 16 og Figur 17 viser resultaterne for samtlige modeller. I figurene er grundmodellen markeret med rød farve, og blå, rød og grøn indikerer kompleksitet, mens nuancer af farverne indikerer vinduesarealet.



Figur 16. Nødvendig kW_p-ydelse for solcelleanlæg for at opfylde BR15 kravet.



Figur 17. Nødvendig kW_p-ydelse for solcelleanlæg for at opfylde bygningsklasse 2020 kravet.

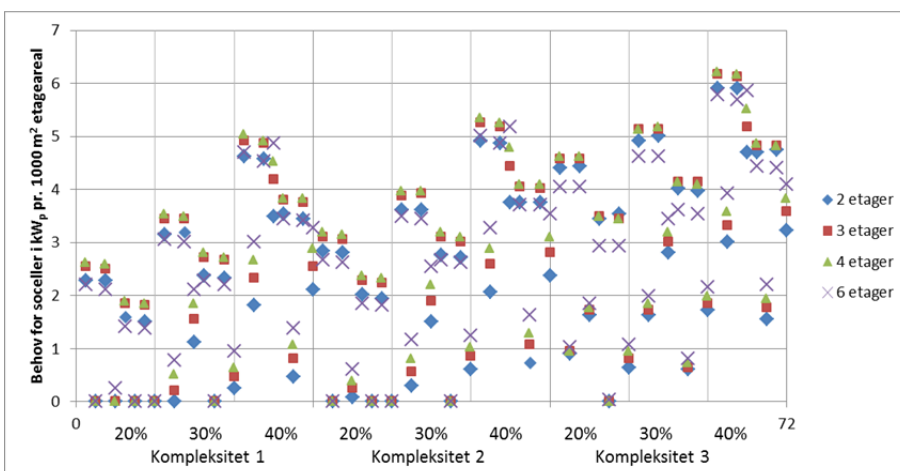
Betragter man resultaterne i Figur 16 ses det, at der ikke er stor forskel mellem resultaterne for "kompleksitet 1" og "kompleksitet 2"; i gennemsnit er forskellen 0,3 kW_p og den største forskel er 0,6 kW_p. Forskellen til "kompleksitet 3" er en anelse større, og i gennemsnit skal der i disse modeller bruges 1,0 kW_p mere end tilsvarende "kompleksitet 2" modeller. Den største forskel er 1,6 kW_p. Derudover ses det også, at 4 modeller med høj kompleksitet af facaden kan opfylde 2015-kravet uden solceller, disse modeller svarer til bygninger i hhv. 2, 3, 4 og 6 etager med vinduesareal på 20 %, høj varmekapacitet, orientering syd/nord og frit beliggende.

Sammenligner man de lyse områder med de mørke, dvs. forskellen på hhv. 20, 30 og 40 % vinduesareal, ses det at vinduesarealet betyder relativt meget. Når man går fra 20 % til 30 %, stiger behovet i gennemsnit med 0,8 kW_p og maksimalt med 1,9 kW_p, fra 30 % til 40 % stiger behovet med gennemsnitligt 1,5 kW_p og maksimalt med 2,8 kW_p.

Betragter man resultaterne i Figur 17 er forskellene generelt en anelse større, men ellers er billedet det samme. I gennemsnit er "skyerne" hævet med ca. 3,2 kW_p. Ingen modeller opfylder 2020-kravet uden solceller.

Antal etager

I Figur 18 er vist en sammenligning af behovet for solceller i afhængighed af antallet af etager.



Figur 18. Sammenligning mellem modeller med hhv. 2, 3, 4 og 6 etager. Frit beliggende bygninger.

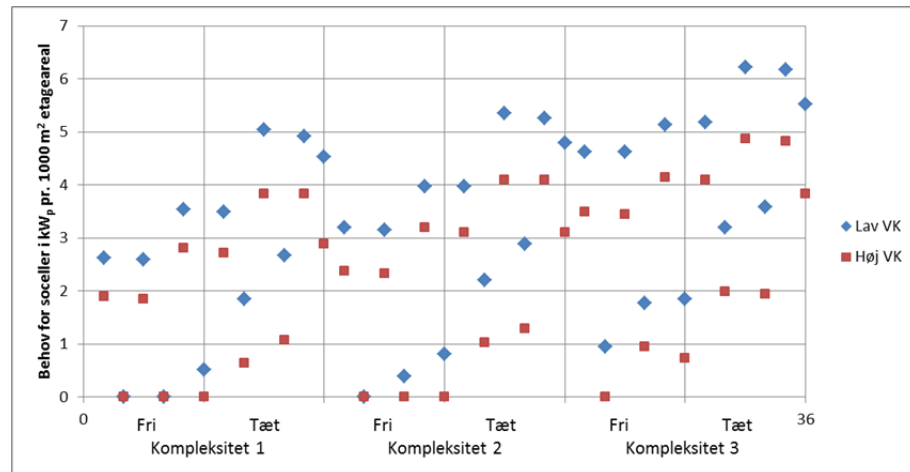
I gennemsnit stiger behovet for solceller med 0,27 kW_p fra 2 etager til 3 etager og med 0,13 kW_p fra 3 etager til 4 etager. Fra 4 etager til 6 etager falder behovet med 0,15 kW_p. For kontorbygninger betyder antallet af etager altså relativt set meget lidt ift. behovet for solceller. De bygninger, som har mindst

behov for solceller er bygninger med enten 2 etager eller 6 etager, og bygningerne i 2 etager har det laveste behov når der er tale om fri beliggenhed, mens bygningerne i 6 etager har det laveste behov, når der er tale om tæt bebyggelse.

For at simplificere analyserne af de øvrige parametre og generelt gøre resultaterne mere overskuelige, betragtes udelukkende resultater for bygninger med 4 etager i det følgende. Det er disse bygninger, som gennemsnitligt har det største behov for solceller, og for bygninger med hhv. 2, 3 eller 6 etager vil resultaterne generelt forskydes en smule "nedad".

Varmekapacitet

I Figur 19 er vist sammenhørende modeller med hhv. lav og høj varmekapacitet. Figuren er opdelt i 6 områder, hvoraf de to første er "lav kompleksitet", de to næste "middel kompleksitet" osv. Område 1, 3 og 5 er "fri beliggenhed" mens 2, 4 og 6 er "tæt bebyggelse". De 6 sæt data i hvert underområde svarer til hhv. 20 % vinduesareal og orientering 0°, 20 % vinduesareal og orientering 90°, 30 % vinduesareal og orientering 0° og så videre.



Figur 19. Sammenligning mellem modeller med hhv. lav og høj varmekapacitet.

I modsætning til, hvad der gjorde sig gældende for etageboliger, betyder varmekapaciteten her relativt meget. Den største betydning af varmekapaciteten er 1,68 kW_p og i gennemsnit medfører de høje varmekapaciteter et behov for solceller som er 1,09 kW_p lavere end for tilsvarende lave varmekapaciteter. Den største betydning forekommer for de komplekse bygninger, men forskellene er begrænsede.

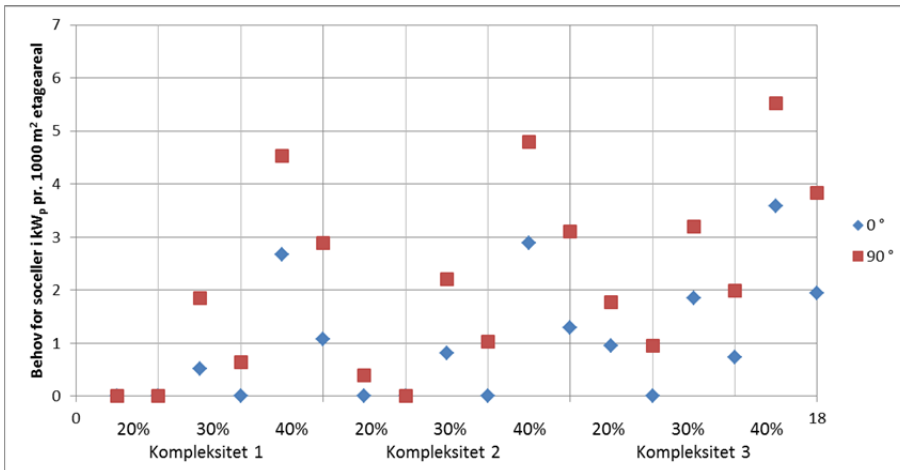
I områderne svarende til "fri beliggenhed" har orienteringen tydeligvis en relativt stor betydning, specielt ved de store vinduesarealer. I områderne svarende til "tæt bebyggelse" ligger sættene parvis, hvilket viser, at orienteringen ikke betyder noget.

Orientering

For kontorbygningers vedkommende er vinduesarealernes størrelse i de to facader ens, og dermed giver det kun mening at rotere bygningen 90°, således at bygningen som udgangspunkt har facader mod nord/syd og ved 90° mod øst/vest. I foregående afsnit blev det konkluderet, at orienteringen ikke betyder noget hvis bygningen ligger i tæt bebyggelse, og derfor er disse resultater ikke medtaget i analysen.

Figur 20 viser sammenligningen mellem modeller med forskellige orienteringer af facaderne. Figuren er opdelt i 9 områder, hvoraf de tre første er "lav kompleksitet", de næste 3 "middel kompleksitet" osv. For hvert niveau af

kompleksitet er der hhv. 20 %, 30 % og 40 % vinduesareal, og indenfor hver af disse findes to sæt data som svarer til hhv. lav og høj varmekapacitet.

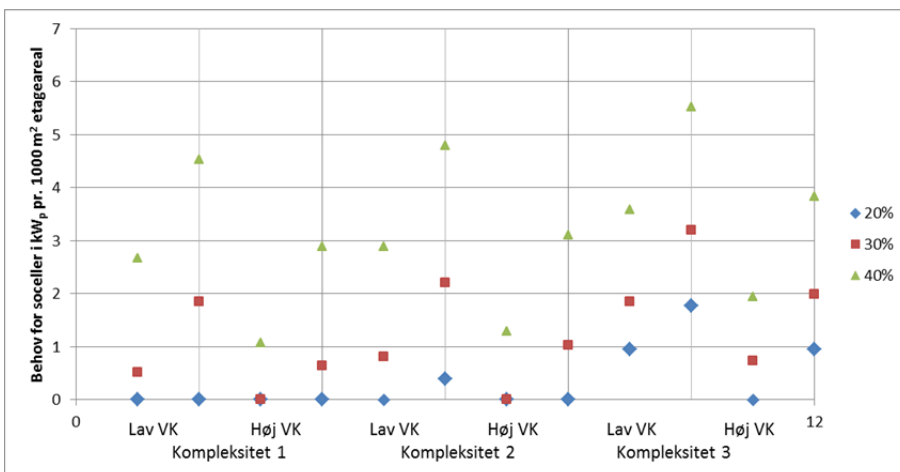


Figur 20. Sammenligning mellem modeller med orientering hhv. 0° og 90°.

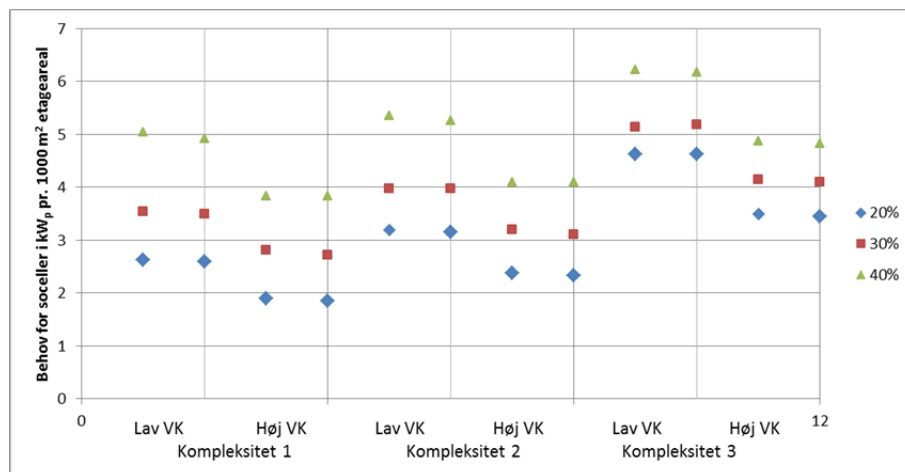
Af Figur 20 er det tydeligt, at orienteringen af bygningen betyder relativt lidt ved de mindste vinduesarealer. For de store vinduesarealer stiger behovet for solceller med ca. 1,87 kW_p når bygningen orienteres mod øst/vest, og det er ca. samme niveau uafhængigt af kompleksitet og varmekapacitet. Samme tendens ses for 30 % vinduesareal, hvor stigningen ca. 1,33 kW_p. Analysen viser altså, at hvis bygningen orienteres mod øst/vest i stedet for nord/syd, så stiger energibehovet med nogenlunde samme størrelse uafhængigt af facadens kompleksitet og bygningens varmekapacitet.

Vinduer

Figur 21 og Figur 22 viser forskellen i behovet for solceller i afhængighed af vinduesarealet for hhv. bygninger med "fri beliggenhed" og bygninger i "tæt bebyggelse". Figureerne er opdelt i kompleksitet og varmekapacitet som vist på x-aksen. Datasættene er skiftevis for 0° og 90° orientering af bygningen.



Figur 21. Sammenligning mellem modeller med hhv. 20, 30 og 40 % vinduesareal. Frit beliggende bygninger.

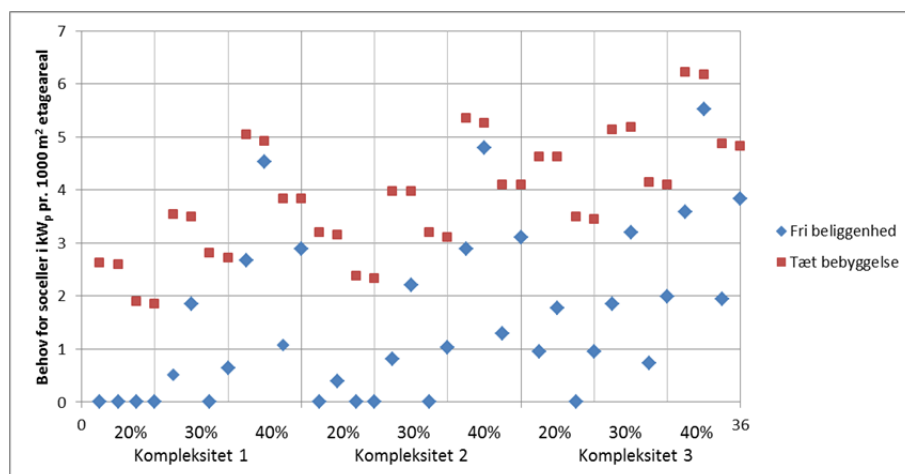


Figur 22. Sammenligning mellem modeller med hhv. 20, 30 og 40 % vinduesareal. Bygninger i tæt bebyggelse.

Energibehovet, og dermed behovet for solceller, bliver generelt størst, når vinduesarealerne er store – med ganske få undtagelser. Når vinduesarealet forøges fra 20 % til 30 % medfører det i gennemsnit en forøgelse af behovet for solceller med ca. 0,90 kW_p, og når vinduesarealet øges fra 30 % til 40 % forøges behovet for solceller i gennemsnit med 1,94 kW_p. Betydningen er generelt lidt lavere, svarende til hhv. 0,76 kW_p og 1,10 kW_p for bygninger beliggende i tæt bebyggelse. Værdierne er stort set uafhængige af facadens kompleksitet.

Fri beliggenhed kontra tæt bebyggelse

Kontorbygninger beliggende i tæt bebyggelse har, ligesom etageboliger, et væsentligt større behov for solceller end tilsvarende frit beliggende bygninger. Figur 23 viser en sammenligning mellem kontorbygninger med fri beliggenhed og tilsvarende bygninger i tæt bebyggelse.



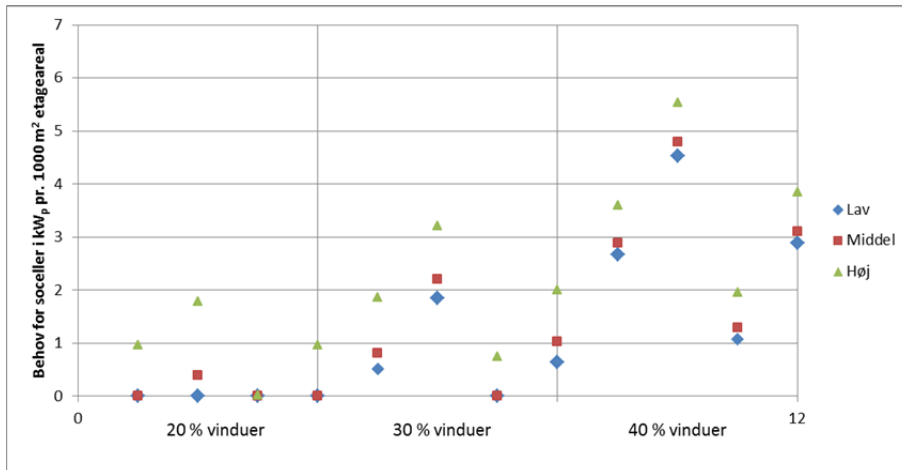
Figur 23. Sammenligning mellem modeller med hhv. fri beliggenhed og i tæt bebyggelse.

For kontorbygningers vedkommende betyder kompleksiteten af facaden ikke ret meget for forskellen, i modsætning til hvad der gjorde sig gældende for etageboliger. I gennemsnit skal en kontorbygning i tæt bebyggelse bruge 2,31 kW_p flere solceller end tilsvarende bygning med fri beliggenhed, og den største forskel (3,67 kW_p) forekommer for en bygning med høj kompleksitet af facaden, 20 % vinduesareal og lav varmekapacitet.

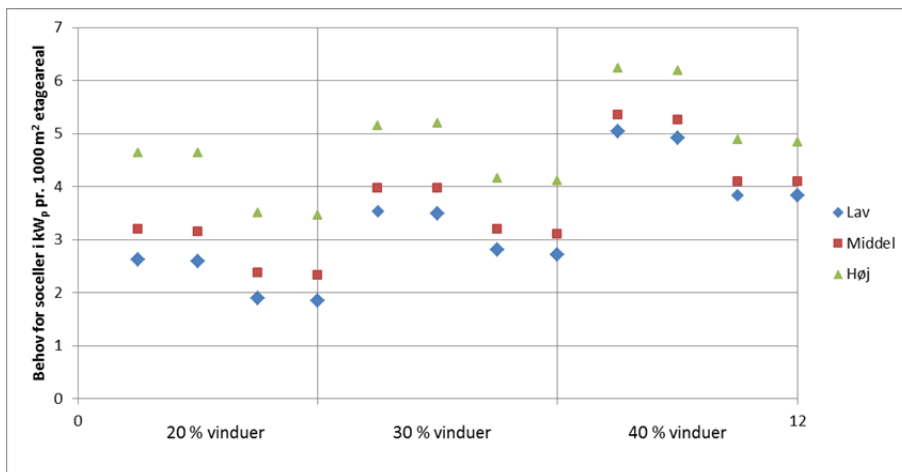
Kompleksitet

Figur 24 og Figur 25 viser sammenligninger mellem bygninger med hhv. lav, middel og høj kompleksitet, svarende til hhv. bygninger med "fri beliggenhed" og bygninger i "tæt bebyggelse". Der er tre områder med hver 4 sæt

data. De to første sæt i hvert område er "lav varmekapacitet" og hhv. 0° og 90° orientering, derefter to sæt med høj varmekapacitet osv.



Figur 24. Sammenligning mellem modeller med hhv. lav, middel og høj kompleksitet. Frit beliggende bygninger.



Figur 25. Sammenligning mellem modeller med hhv. lav, middel og høj kompleksitet. Bygninger i tæt bebyggelse.

Figureerne viser, ligesom for etageboliger, at springet fra lav til middel kompleksitet ikke betyder så meget for behovet for solceller, mens springet fra middel til høj kompleksitet betyder væsentligt mere. Den gennemsnitlige stigning i behovet for solceller er 0,19 kW_p fra lav til middel og 0,82 kW_p fra middel til høj, når bygningen er frit beliggende og 0,41 kW_p og 1,06 kW_p når den er beliggende i tæt bebyggelse. Kompleksiteten af facaden betyder altså relativt set ca. det samme for etageboligers og kontorbygningers behov for solceller.

Økonomi for alternativ til vedvarende energi

Et af formålene med nærværende analyse er at belyse, i hvilket omfang det er muligt at energiforbedre de analyserede bygningers konstruktioner og systemer, således at manoen for at opfylde BR15 opnås denne vej rundt som alternativ til solceller og bestemme de økonomiske konsekvenser heraf.

Bygningerne i denne analyse har i udgangspunktet allerede et ret højt isoleringsniveau, og de anvendte systemer er generelt ret energieffektive. Derfor er der grænser for, hvor langt man kan komme med yderligere forbedringer.

For både etageboliger og kontorbygninger kan der laves forbedringer i ventilationsanlæggenes energieffektivitet. I de oprindelige løsninger er der benyt-

tet et anlæg med 80 % varmegenvinding og en SEL-værdi på $1,2 \text{ kJ/m}^3$, og dette kan forbedres til 85 % varmegenvinding og en SEL-værdi på $1,1 \text{ kJ/m}^3$.

For vinduernes vedkommende kan U-værdien forbedres fra de oprindelige $0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$ til $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ ved at vælge de bedste løsninger på markedet.

Herudover kan man i etageboliger forbedre rørisoleringen af rørene til cirkulation af varmt brugsvand, så varmetabet reduceres. Rørisoleringens tykkelse forøges fra 25 mm til 60 mm, og varmetabskoefficienten forbedres herved fra $0,2 \text{ W/mK}$ til $0,1 \text{ W/mK}$.

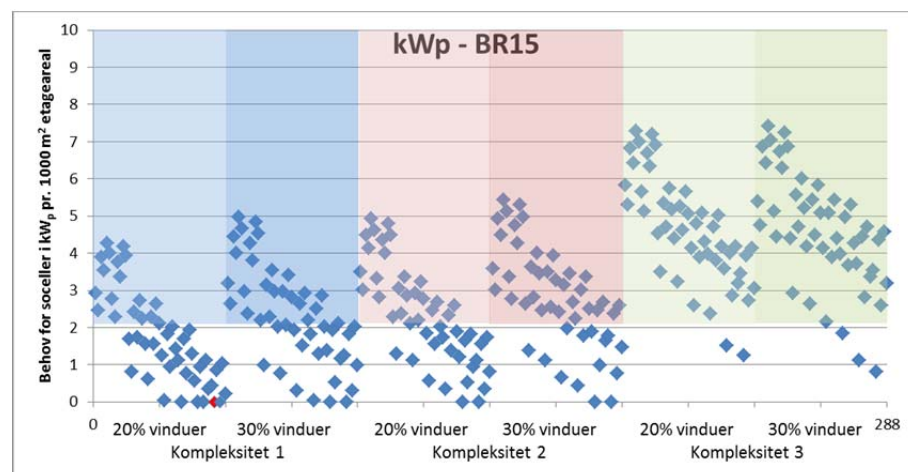
I både etageboliger og kontorbygninger kan man ligeledes forestille sig at forbedre ydervæggens U-værdi fra hhv. $0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$ og $0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$ til hhv. $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ og $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$, svarende til at forøge isoleringstykkelsen fra hhv. 300 mm til 350 mm og fra 200 mm til 250 mm (eller alternativt at anvende et isoleringsmateriale med en lavere varmeledningsevne).

Gennemføres alle disse tiltag i bygninger med 6 etager, svarer det til en reduktion af energibehovet på ca. $4,9 \text{ kWh/m}^2$ i etageboliger og $4,0 \text{ kWh/m}^2$ i kontorbygninger. Tabel 19 viser betydningen af de enkelte tiltag.

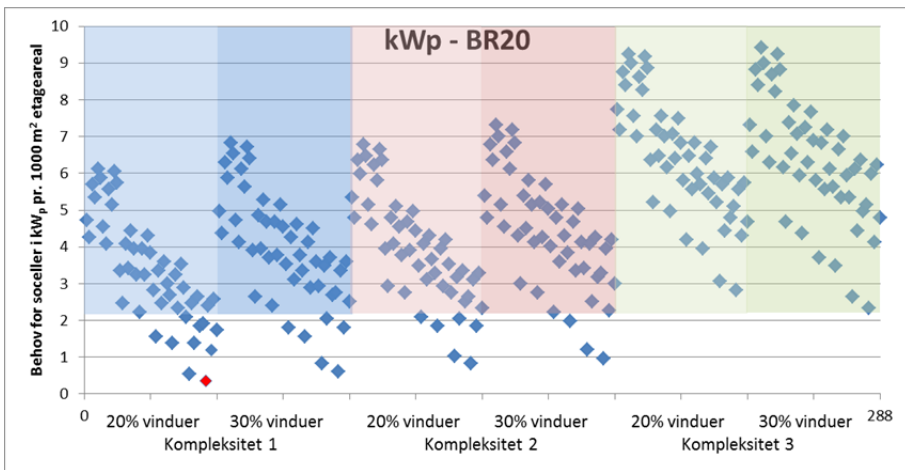
Tabel 19. Besparelspotentiale for etageboliger og kontorbygninger ved gennemførelse af energiforbedringer for konstruktioner og systemer, kWh/m^2 .

	Etagebolig		Kontorbygning	
	BR15	BR20	BR15	BR20
Bedre vinduer	1,7	1,2	1,4	1,1
Bedre ventilationsanlæg	1,8	1,4	2,1	1,5
Bedre U-værdi for ydervæg	0,5	0,4	0,5	0,4
Bedre rørisolering	0,9	0,7	-	-
Total	4,9	3,7	4,0	3,0

Disse tal kan omsættes til en tilsvarende kW_p -ydelse ved at dividere med 2,32 (ift. BR15 energirammekravet) og 1,67 (ift. BR20 energirammekravet), idet 1 kW_p giver en reduktion af energibehovet på 2,32 hhv. 1,67 kWh/m^2 for hhv. BR15 og BR20 energirammekravet. Herved får man værdierne $2,1 \text{ kW}_p$ for etageboliger og $1,7 \text{ kW}_p$ for kontorbygninger ift. BR15 og $2,2 \text{ kW}_p$ for etageboliger og $1,8 \text{ kW}_p$ for kontorbygninger ift. BR20. Niveauerne indtegnes på figurer svarende til hhv. Figur 6 og Figur 16, og dermed får man et overblik over hvor mange af analysens bygninger, der vil kunne "undvære" solcelleanlæg ved at gennemføre alternative energibesparende tiltag i bygningerne.



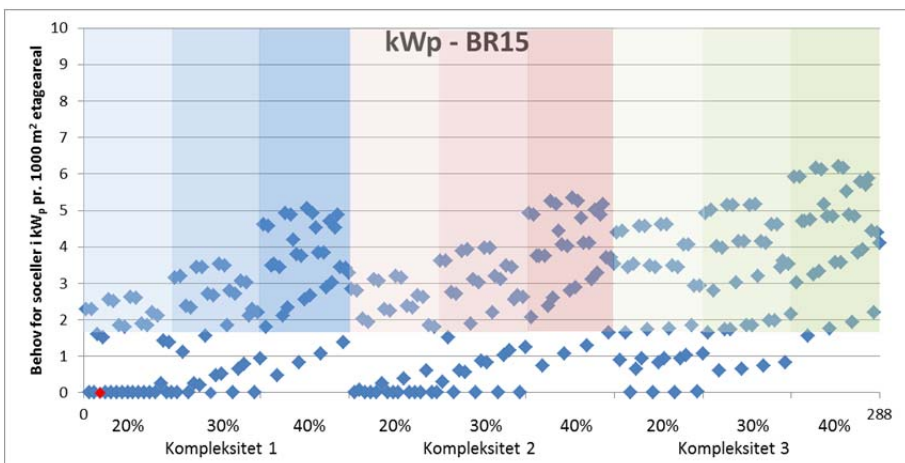
Figur 26. Nødvendig supplerende kW_p -ydelse for et solcelleanlæg for at etageboligbygningen opfylder BR15 energirammekravet. Bygninger placeret i det "hvide" område kan energiforbedres til at opfylde kravet uden brug af solceller.



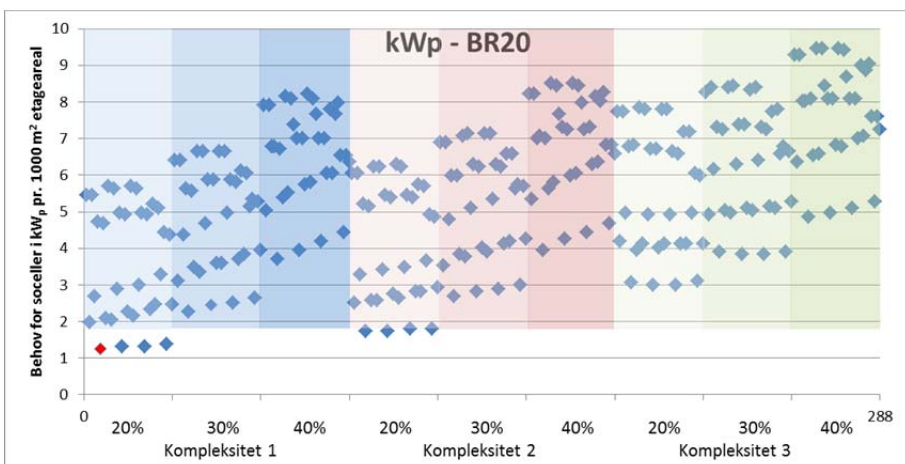
Figur 27. Nødvendig supplerende kW_p-ydelse for et solcelleanlæg for at etageboligbygningen opfylder BR20 energirammekravet. Bygninger placeret i det "hvide" område kan energiforbedres til at opfylde kravet uden brug af solceller.

For etageboligers vedkommende findes der varianter som, uanset facade-kompleksitet og vinduesareal, vil kunne bringes til at opfylde BR15 energirammekravet uden brug af solceller. Det er specielt bygninger i 2 etager, bygninger som ikke er orienteret med de største vinduesarealer mod syd og bygninger beliggende i tæt bebyggelse, som er vanskelige at energieffektivisere til at opfylde BR15 energirammekravet.

Figur 28 viser de tilsvarende resultater for kontorbygninger.



Figur 28. Nødvendig supplerende kW_p-ydelse for et solcelleanlæg for at kontorbygningen opfylder BR15 energirammekravet. Bygninger placeret i det "hvide" område kan energiforbedres til at opfylde kravet uden brug af solceller.



Figur 29. Nødvendig supplerende kW_p-ydelse for et solcelleanlæg for at kontorbygningen opfylder BR20 energirammekravet. Bygninger placeret i det "hvide" område kan energiforbedres til at opfylde kravet uden brug af solceller.

For kontorbygningers vedkommende er det faktisk kun bygninger med høj kompleksitet og 40 % vinduer, som kun har én enkelt variant, som kan opfylde BR15 energirammekravet. Generelt er det bygninger som er orienteret øst-vest i stedet for syd-nord og bygninger i tæt bebyggelse, som ikke kan bringes til at opfylde BR15 energirammekravet ved energieffektivisering.

Det er umiddelbart vanskeligt at prissætte de energibesparende tiltag omtalt i dette afsnit, idet forbedringerne ikke er direkte dækket af prisbøger som fx V&S priser [6]. V&S priser har fx kun ydervægge med op til 300 mm isolering. Omkostningerne ved de energibesparende tiltag er derfor så vidt muligt ekstrapoleret fra V&S priser, og dermed er opnået sammenhængen vist i Tabel 20.

Tabel 20. Marginalpriser for forbedring af energieffektivitet og solceller.

Konstruktion/System	Tiltag	Pris
Ydervæg	Ekstra 50 mm isolering	120 kr./m ² ydervæg
Vinduer	Forbedring fra 0,9 W/m ² K til 0,8 W/m ² K	370 kr./m ² vindue
Ventilationsanlæg	Forbedring fra 80 % og 1,2 kJ/m ³ til 85 % og 1,1 kJ/m ³	25 kr./m ² etageareal
Rør	Forbedring fra 25 mm til 60 mm rørisolering	50 kr./m rør
Solceller		7.300 kr./kW _p

Ud fra priserne i Tabel 20, arealer af ydervægge og vinduer, rørlængder mv. for hver enkelt type og størrelse af bygning, kan man bestemme prisen for at spare, hvad der svarer til 1 kW_p ved i stedet for solceller at anvende energieffektivisering af bygningens konstruktioner og systemer. I Tabel 21 og Tabel 22 er vist resultaterne af disse beregninger (gældende for 2015 energirammekravet). Priserne i tabellerne kan sammenholdes med prisen for solceller angivet i Tabel 20, og dermed kan man se, hvorvidt det er mere økonomisk at gennemføre tiltagene i stedet for alternativt at installere et solcelleanlæg. Priserne for de energibesparende tiltag må dog forventes at blive reduceret i takt med den byggetekniske udvikling.

Tabel 21. Pris for at spare 1 kW_p i etageboliger ved forbedring af ydervæg, vinduer, rør eller ventilation.

Etager [#]	Vinduer [%]	Ydervæg [kr.]	Vinduer [kr.]	Rør [kr.]	Ventilation [kr.]
2	20	53.793	25.111	2.874	7.483
	30	43.448	34.499		
3	20	80.690	34.499	3.352	10.477
	30	65.172	48.580		
4	20	107.586	43.886	3.831	13.470
	30	86.897	62.661		
6	20	161.379	62.661	4.789	19.456
	30	130.345	90.824		

Tabel 22. Pris for at spare 1 kW_p i kontorbygninger ved forbedring af ydervæg, vinduer eller ventilation.

Etager [#]	Vinduer [%]	Ydervæg [kr.]	Vinduer [kr.]	Ventilation [kr.]
2	20	65.214	56.418	15.873
	30	48.662	84.627	
	40	32.110	112.836	
3	20	97.821	84.627	22.222
	30	72.993	126.940	
	40	48.166	169.253	
4	20	130.428	112.836	28.571
	30	97.324	169.253	
	40	64.221	225.671	
6	20	195.641	169.253	41.270
	30	145.986	253.880	
	40	96.331	338.507	

Sammenlignes tabellerne med prisen for at spare 1 kW_p via solceller er det tydeligt, at tiltagene vedrørende ydervæggen og vinduerne er væsentligt dyrere end at opnå samme reduktion i energibehovet ved solceller. Prisen for at installere et mere energieffektivt ventilationsanlæg er nogenlunde samme størrelsesorden som prisen for solceller i de mindste etageboliger, men ellers er det generelt en dyrere løsning end solceller. Isolering af rør til varmt brugsvand i etageboliger er billigere end solceller, men giver kun en relativ beskedne reduktion i energibehovet.

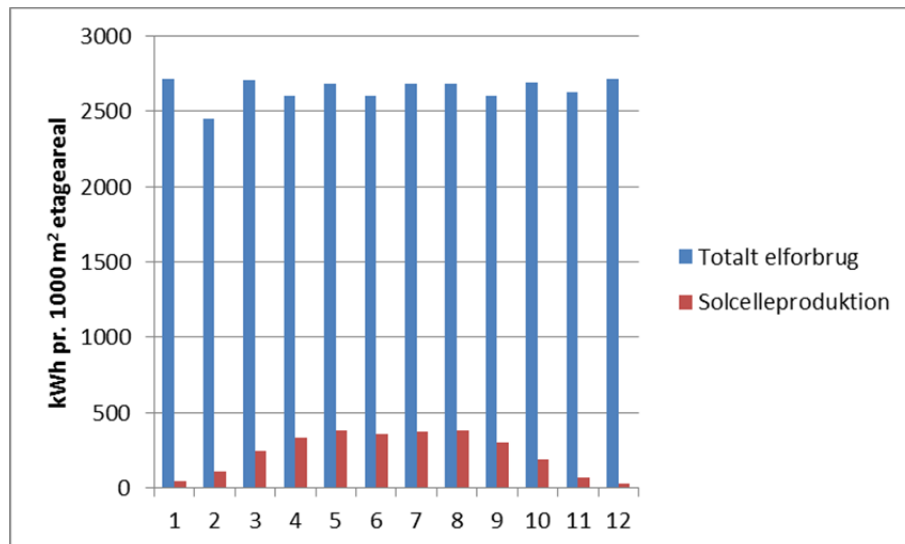
Analysen viser altså, at solceller er klart den mest økonomiske måde at opfylde energirammen på. Energieffektivisering af konstruktioner og systemer er væsentligt dyrere, og i øvrigt vil man hermed kun kunne bringe nogle af bygningerne til at opfylde energirammekravene.

Betydning for el-nettet

Der bygges i gennemsnit (2005-2015) ca. 500.000 m² etageboliger og 1.000.000 m² kontorbygninger om året i Danmark.

I gennemsnit skal etageboliger analyseret i denne rapport bruge 3,1 kW_p pr. 1000 m² etageareal for at opfylde BR15 energirammekravet og 4,7 kW_p pr. 1000 m² etageareal for at opfylde kravene til Bygningsklasse 2020.

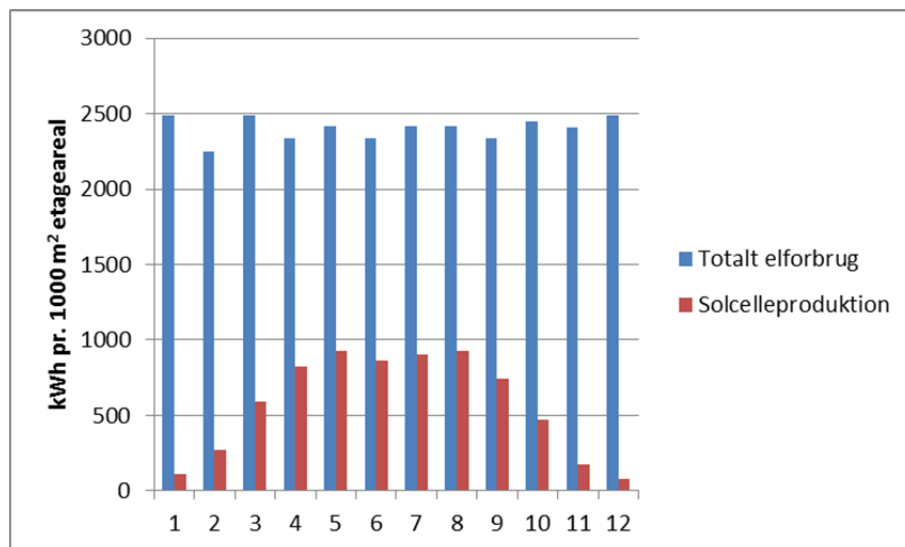
Hvis man fra analysen tager en bygning, som har det gennemsnitlige behov, kan det fx være en bygning i 6 etager, med høj kompleksitet, 20 % vinduesareal, varmekapacitet 160 Wh/K m², orienteret 90 grader og med fri beliggenhed. For at opfylde 2015 kravet skal bygningen bruge 66 m² solceller. Man kan så optegne sammenhængen mellem bygningens totale elforbrug og produktionen af el fra solcellerne, som vist i Figur 30.



Figur 30. Solcelleproduktion og elforbrug til bygningsdrift i kWh for etagebolig.

Af Figur 30 er det tydeligt at elforbruget fra solcellerne ikke overstiger det totale elforbrug.

Hvis man i stedet betragter den bygning, som har det største behov for solceller, og kigger på solcelleproduktion og det totale elforbrug, så får man resultaterne vist i Figur 31.

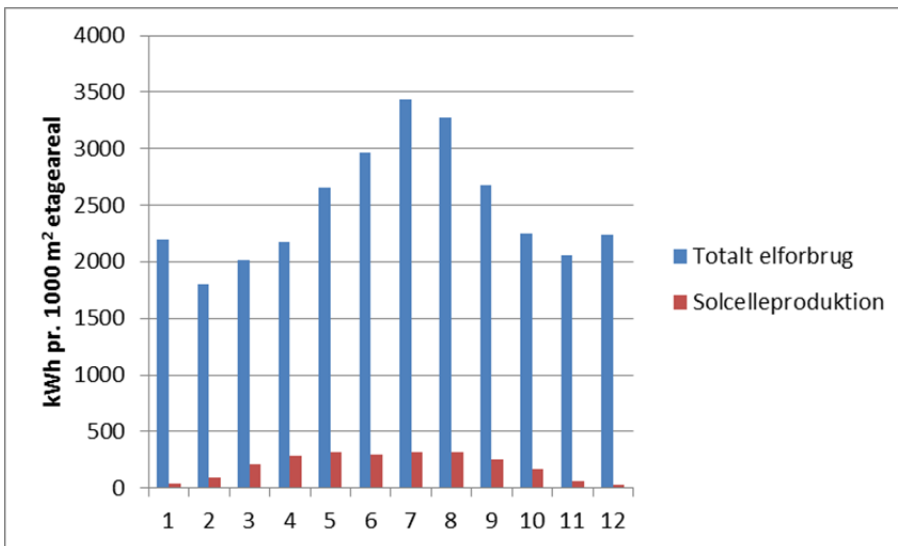


Figur 31. Solcelleproduktion og elforbrug til bygningsdrift i kWh for etagebolig (worst case).

Igen er det tydeligt, at solcelleproduktionen ikke overstiger det totale elforbrug i bygningen.

Hvis man laver den samme analyse for kontorbygninger, så skal de i gennemsnit bruge 2,6 kW_p pr. 1000 m² etageareal for at opfylde BR15 energirammekravet og 5,7 kW_p pr. 1000 m² etageareal for at opfylde kravene til Bygningsklasse 2020.

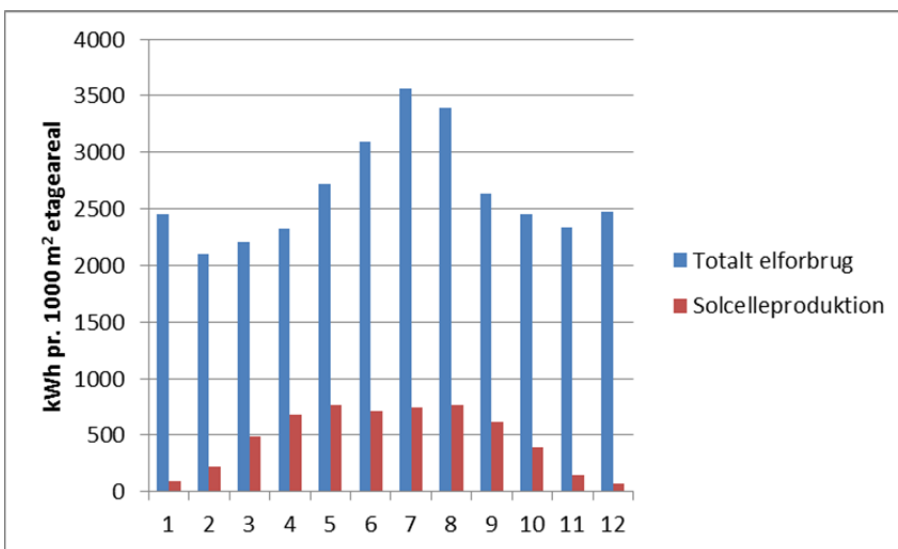
Hvis man igen tager en bygning, som giver det gennemsnitlige behov, er det fx en bygning i 3 etager, med middel kompleksitet, 40 % vinduesareal, varmekapacitet 80 Wh/K m², orienteret 0 grader og med fri beliggenhed. For at opfylde 2015 kravet skal bygningen udstyres med 48 m² solceller. Igen optegnes sammenhængen mellem bygningens elforbrug til bygningsdrift og produktionen af el fra solcellerne, se Figur 32.



Figur 32. Solcelleproduktion og elforbrug til bygningsdrift i kWh for kontorbygning.

Betragtes Figur 32 er det tydeligt, at elproduktionen fra solceller ikke overstiger det totale elforbrug.

Bygningen med størst behov for solceller giver resultater som vist i Figur 33.



Figur 33. Solcelleproduktion og elforbrug til bygningsdrift i kWh for kontorbygning (worst case).

Af figuren er det igen tydeligt, at solcelleproduktionen ikke overstiger det totale elforbrug.

Det bemærkes i øvrigt generelt for kontorbygninger, at elforbruget til bygningsdrift er væsentligt højere i sommer- end vinterperioden. Dette skyldes, at der er et elforbrug til køling af bygningen i sommerperioden, og der kunne formentlig opnås en mindre energibesparelse, hvis der kunne indføres passiv køling. Dette er dog ikke analyseret nærmere.

Figur 30 – Figur 33 viser månedlige resultater, og heri er der ikke taget højde for samtidigheden i elforbrug og elproduktion. I Håndbog for Energikonsulenter [7] er der angivet tabeller for, i hvilket omfang solcelleproduceret el kan udnyttes direkte i bygningen.

For etageboligers vedkommende vil der for den bygning, som har et gennemsnitligt behov for solceller være en samlet solcelleproduktion, som er ca. 9 % af det totale elforbrug i bygningen. Fra håndbogen kan dermed aflæses, at ca. 70 % af solcelleproduktionen vil kunne anvendes direkte i bygningen.

For den bygning som har det største behov, vil solcelleproduktionen udgøre ca. 24 % af det totale elforbrug i bygningen, og herudfra kan aflæses, at ca. 64 % af solcelleproduktionen vil kunne bruges direkte i bygningen.

Herudfra kan fastlægges, hvor mange kWh/år pr. 1000 m² opvarmet etageareal bygningerne sender ud på elnettet. For etageboliger er det i gennemsnit ca. 850 kWh, og for etagebygningen med det højeste energibehov er det ca. 2500 kWh.

For kontorbygninger vil der for den bygning, som har et gennemsnitligt behov for solceller, være en samlet solcelleproduktion som er ca. 8 % af det totale elforbrug i bygningen, og dermed vil ca. 65 % af solcelleproduktionen kunne anvendes direkte i bygningen. For kontorbygningen, som har det største behov, vil solcelleproduktionen udgøre ca. 18 % af det totale elforbrug i bygningen, og herudfra kan aflæses, at ca. 65 % af solcelleproduktionen vil kunne bruges direkte i bygningen.

For kontorbygninger sendes altså i gennemsnit ca. 850 kWh til elnettet, og for kontorbygningen med det højeste energibehov er det ca. 2000 kWh.

Hvis man sammenholder disse resultater med, hvor mange m² der hvert år bygges af de to bygningstyper; 500.000 m² etageboliger og 1.000.000 m² kontorbygninger, svarer dette totalt til en udbygning af den solcelleproducerede el på 3,6 GWh pr. år, og heraf vil de ca. 1,3 GWh udveksles med elnettet. I 2015 var den totale solcelleproduktion i Danmark 605 GWh.

Analysen i indledningen viser dog, at der kun bruges solceller på ca. 30 % af bygninger, der opfylder BR15. Dette antyder, at kompleksiteten af disse bygninger og øvrige parametre som fordrer brugen af solceller, kun sjældent medfører behov for solceller, og dermed er ovenstående gennemsnitsbetragtning nok urealistisk. Beregningen kunne imidlertid være et rimeligt bud på det behov, der vil opstå, når BR2020 træder i kraft, hvor man forventeligt vil se behov for solceller på ca. 96 % af alle nye bygninger.

Parcelhuse

Der gennemføres en mindre analyse af behovet for at indregne solceller i energirammen for parcelhuse. Til analysen benyttes et parcelhus på 150 m², som i udgangspunktet opfylder energikravene i bygningsreglementet.

Ligesom for etageboliger og kontorbygninger laves en analyse af betydningen af forskellige parametre. Der laves analyser for varmekapaciteten, orienteringen af bygningen, vinduesarealet, facadens kompleksitet og skyggeforholdene.

Parcelhusets energibehov for referencesituationen er vist i Tabel 23.

Tabel 23. Nøgletal og energibehov for parcelhuset i referencesituationen [kWh/m²].

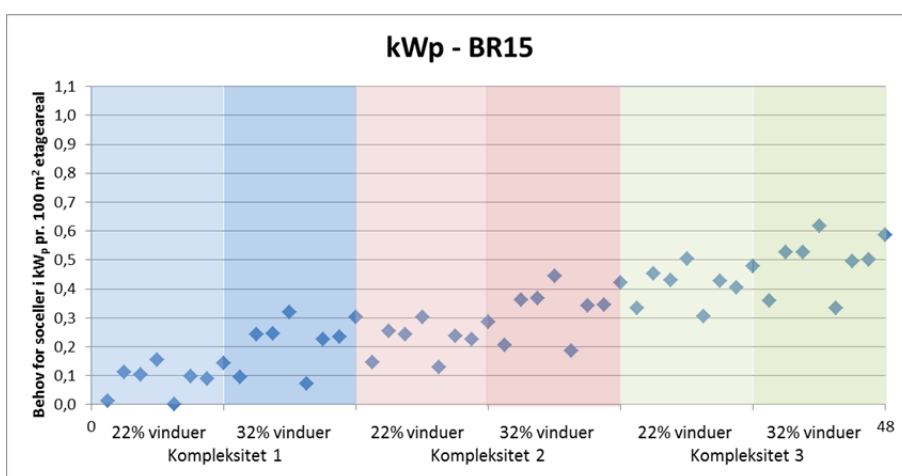
Bygning	2015				2020	
	Varme	El	Energibehov	Energiramme	Energibehov	Energiramme
Parcelhus	37,8	2,6	36,7	36,7	27,3	20,0

For parcelhuset gennemføres parametervariationer som vist i Tabel 24.

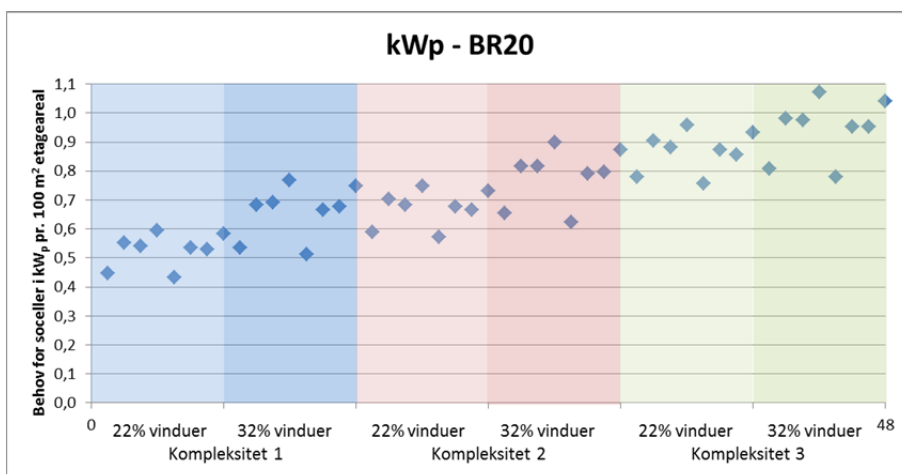
Tabel 24. Parametervariationer for parcelhus.

Parameter	Variation	# varianter
Facadekompleksitet	Rynkefaktor og	0 % og 0,14 W/m ² K
	U _y dervæg	50 % og 0,14 W/m ² K
		50 % og 0,20 W/m ² K
Vinduesareal ift. opvarmet etageareal	22 og 32 %	2
Varmekapacitet	80 og 160 Wh/K m ²	2
Orientering	0° og 270°	2
Skygger	Fri beliggenhed og Skyggefuld beliggenhed	2
Total		48

Figur 34 og Figur 35 viser resultaterne for parcelhuset.



Figur 34. Nødvendig kW_p-ydelse for solcelleanlæg for at opfylde BR15 kravet.



Figur 35. Nødvendig kW_p-ydelse for solcelleanlæg for at opfylde Bygningsklasse 2020 kravet.

Det højeste energibehov er 51,0 kWh/m² og fås for modellen med den mest komplekse facade, de største vinduer, lav varmekapacitet, orienteret 270° dvs. med de store vinduespartier mod øst og i skyggefuld beliggenhed.

Betragtes resultaterne i Figur 34 ses det, at kompleksiteten af facaden har en relativt stort betydning for behovet for solceller. Fra kompleksitet 1 til 2 (forøgelse af ydervægsarealet) stiger behovet med i gennemsnit 0,13 kW_p og fra kompleksitet 2 til 3 stiger det med 0,17 kW_p.

Vinduesarealet har også en væsentlig betydning, og i gennemsnit medfører en forøgelse af vinduesarealet fra 22 % til 32 % en forøgelse af behovet for solceller på 0,10 kW_p.

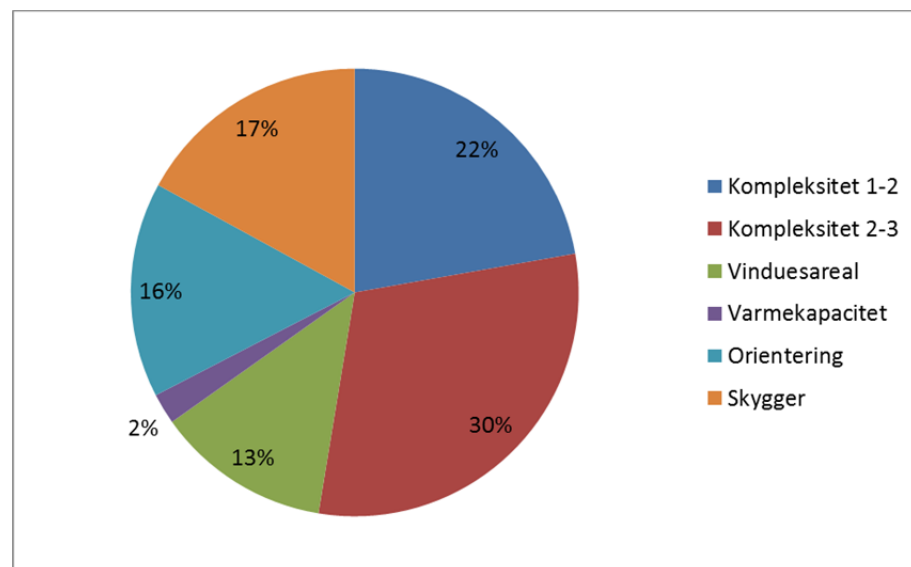
De første 4 resultater i hvert område er lav varmekapacitet og de efterfølgende 4 er høj varmekapacitet. Der er stort set ikke forskel på disse resultater, hvilket viser at varmekapaciteten er stort set uden betydning.

De første 2 resultater i hvert område er orientering 0° og de efterfølgende 2 er 270°. Sammenligner man disse data sætvis, er det tydeligt at orienteringen af bygningen har væsentlig betydning, og i gennemsnit stiger behovet for solceller med 0,10 kW_p når bygningen roteres.

Det første resultat i hvert område er fri beliggenhed, og det efterfølgende er skyggefuld beliggenhed. Sammenlignes disse resultater er det også tydeligt, at skygger har en væsentlig betydning for resultaterne. I gennemsnit skal der bruges 0,10 kW_p flere solceller, når bygningen har skyggefuld beliggenhed.

Hvis man sammenligner Figur 34 og Figur 35 kan det ses, at der i forhold til 2015-kravet skal bruges yderligere ca. 0,45 kW_p for at opfylde 2020-kravet.

På tilsvarende vis som for etageboliger og kontorbygninger kan der laves et fordelingsdiagram, som viser, hvordan de enkelte parametre påvirker energibehovet, se Figur 36.



Figur 36. Betydningen af enkeltparametre for parcelhuset.

Alternativet til solceller er en yderligere forbedring af bygningernes klimaskærm eller systemer. Basismodellen er imidlertid meget energieffektiv i udgangspunktet, og derfor er der ikke mange muligheder for at reducere energibehovet.

Vinduerne kan udskiftes med nogle, som er et niveau bedre (svarende til A+ vinduer), og herved opnås en besparelse på 4,1 kWh/m² for grundmodellen. Herudover kan ydervæggen isoleres bedre, svarende til at varmetabet reduceres med ca. 20 %, fx ved at ændre fra tung til let ydervæg, og herved reduceres energibehovet med 1,3 kWh/m². De øvrige konstruktioner og bygningens systemer er så energieffektive, som de kan blive.

En samtidig forbedring af vinduer og ydervæg, vil altså kunne reducere behovet for solceller med ca. 0,23 kW_p, og hvis man sammenholder dette med Figur 34 og Figur 35 medfører det, at i alt 18 modeller vil kunne opfylde kravet til BR15, mens ingen modeller kan opfylde 2020 kravet uden solceller.

Større bygninger

I større bygninger (fx hospitaler) er der andre udfordringer, som medfører at mankoen i forhold til at opfylde energirammen bliver større end i kontorbygninger.

De bygninger, som vil stå med de største udfordringer, er netop hospitalsbyggeriet, idet der er en række særlige krav omkring specielt ventilation og belysning, som vil medføre et højere energibehov.

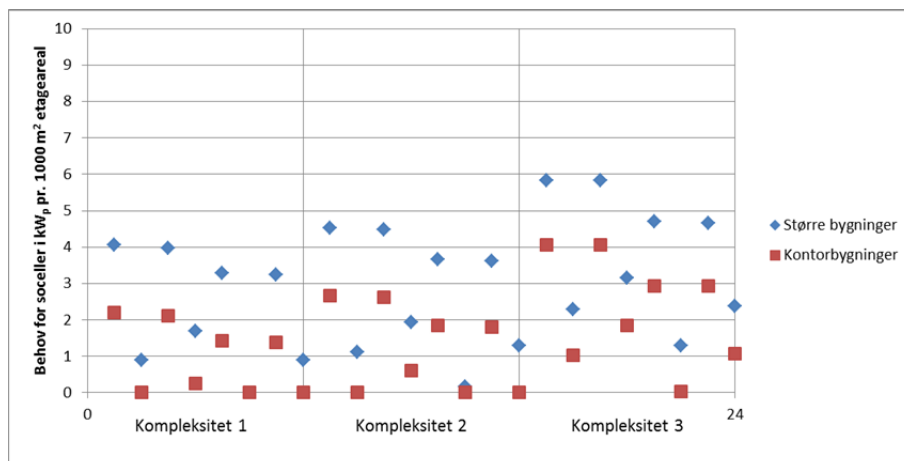
På hospitaler er der behov for særlige filtre i ventilationsanlægget, som igen medfører et større tryktab i kanalsystemet og dermed et større elforbrug til ventilatorerne. Anvendelsen af hhv. et almindeligt M5 filter (mediumfilter – fjerner pollen, trafikforurening mv.) og et F8 filter (finfilter – fjerner bakterier, svampesporer, skimmel mv.) giver totalt set en forøgelse af tryktabet på ca. 10 %, og dermed en forøgelse af elforbruget til lufttransport på ca. 10 %.

Ventilation med varmegenvinding kræver også særlige forbehold i hospitaler, idet man ikke kan anvende almindelige roterende varmevekslere pga. risikoen for, at aftræksluften i et vist omfang blandes med indblæsningsluften. Der skal derfor bruges varmevekslere, hvor der ikke er risiko for at luftstrømmene blandes, og disse vekslere har typisk en lidt lavere effektivitet end tilsvarende roterende vekslere. Det antages derfor at varmegenvindingsgraden vil være 75 % i stedet for 80 %.

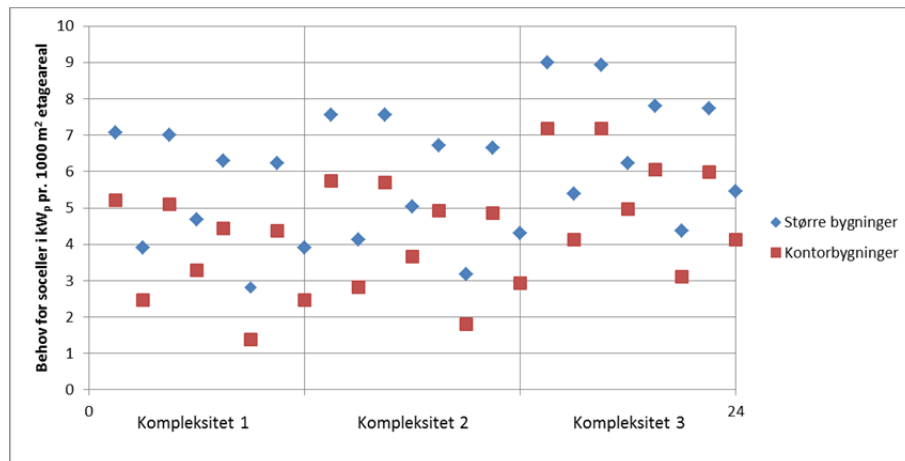
På hospitaler er der særlige krav til belysningen for at undgå blænding af liggende patienter fra loftsmonteret belysning. Dette vurderes, at medføre et forøget elforbrug til belysning på 1 W pr. 300 lux.

Der tages i beregningerne udgangspunkt i de største kontorbygninger, svarende til bygningerne med 6 etager, og i bygninger med de lave vinduesarealer, svarende til 20 % af etagearealet. Figur 37 og Figur 38 viser beregningsresultaterne for hhv. energirammekravet i BR15 og kravet til Bygningsklasse 2020. Resultaterne vises sammen med de tilsvarende kontorbygninger, således at forskellen i behovet for solceller tydeliggøres.

Hver figur viser 24 sæt data, hvoraf de 8 første er lav kompleksitet, de næste 8 middel kompleksitet og de sidste 8 høj kompleksitet. De første 4 sæt indenfor hver kompleksitet er lav varmekapacitet, og de næste 4 er høj varmekapacitet. Sæt 1 er tæt bebyggelse og 0° orientering og sæt 2 fri beliggenhed og 0° orientering, sæt 3 er tæt bebyggelse og 90° orientering, mens sæt 4 er fri beliggenhed og 90° orientering, og så fremdeles.



Figur 37. Nødvendig kW_p-ydelse for solcelleanlæg for at de større bygninger opfylder BR15 energirammekravet. Til sammenligning er vist tilsvarende resultater for kontorbygninger.



Figur 38. Nødvendig kW_p-ydelse for solcelleanlæg for at de større bygninger opfylder Bygningsklasse 2020 energirammekravet. Til sammenligning er vist tilsvarende resultater for kontorbygninger.

Betragtes figurene er det tydeligt, at én enkelt bygning (sæt 6) opfylder BR15 energirammekravet uden brug af solceller, og en anden bygning med middel kompleksitet er meget tæt på at kunne opfylde kravet (sæt 14). Den bygning, som har det største energibehov, skal bruge ca. 6 kW_p for at opfylde BR15 energirammekravet og ca. 9 kW_p for at opfylde kravet til Bygningsklasse 2020. I gennemsnit skal de store bygninger bruge ca. 1,4 kW_p flere solceller end kontorbygninger. Forskellen er størst for de bygninger som ligger i tæt bebyggelse (sæt 1, 3, 5...), hvor der skal bruges ca. 1,8 kW_p og mindst for bygninger med fri beliggenhed, hvor der skal bruges ca. 1,2 kW_p.

Det er altså tydeligt, at større bygninger som udfordres energimæssigt af særlige krav til ventilation og belysning, vil kræve lidt flere solceller for at kunne opfylde bygningsreglementets energirammekrav, men der er tale om en relativt beskedne forøgelse af behovet.

Sammenfatning

Der er gennemført en analyse af behovet for at anvende vedvarende energi for at opfylde energirammen i Bygningsreglementet. Der er gennemført beregninger af i alt 288 etageboliger og 288 kontorbygninger. Herudover er der ligeledes lavet en mindre analyse af 48 parcelhuse. For også at dække de større bygninger (fx hospitaler mv.), er der lavet en ekstrapolation af resultaterne for kontorbygninger, svarende til 24 modeller.

Bygningstyperne (etageboliger, kontorbygninger og parcelhuse) er analyseret ved at variere forskellige parametre, som har indflydelse på bygningernes energibehov. De analyserede parametre er;

- Antallet af etager (kun etageboliger og kontorbygninger),
- kompleksiteten af facaden,
- vinduesarealet,
- varmekapaciteten,
- orienteringen og
- skyggeforholdene.

For de større bygninger er ikke analyseret på vinduesareal og antal etager.

Ud fra beregningerne er det analyseret, hvornår og i hvilket omfang bygningerne har brug for vedvarende energi for at opfylde energirammen.

Etageboliger

For etageboligers vedkommende varierer energibehovet fra 27,8 kWh/m² pr. år til 48,0 kWh/m² pr. år (BR15 energirammen er 30,3 kWh/m² pr. år). Bygningen med det største energibehov skal bruge et solcelleanlæg med ca. 7,5 kW_p pr. 1000 m² etageareal for at opfylde energirammen svarende til BR15 og ca. 9,5 kW_p pr. 1000 m² etageareal for at opfylde 2020-kravet.

I udgangspunktet opfylder ingen af bygningerne 2020-kravet, men analysen viser, at man teoretisk set kan opfylde 2020-kravet uden brug af solceller for de største bygninger (6 etager), hvis man optimerer samtlige bygningens konstruktioner og systemer, og samtidig sikrer at orientering, beliggenhed (skyggeforhold) mv. er optimale.

Den mest betydende parameter er antallet af etager, hvilket primært skyldes at bygningen har fuld, opvarmet kælder (i en bygning med 2 etager medfører kælderen fx en forøgelse af forbruget til varmt brugsvand på 25 %, og det varme brugsvand udgør op mod 50 % af det samlede energibehov). Den næstmest betydende parameter er kompleksiteten af facaden, og herudover betyder også orienteringen samt skyggeforholdene meget for energibehovet. Sidstnævnte parametre er naturligvis indbyrdes afhængige. Varmekapaciteten og vinduesarealet betyder stort set ingenting.

Kontorbygninger

For kontorbygninger varierer energibehovet fra 37,1 kWh/m² pr. år for bygningen med det laveste energibehov til 55,7 kWh/m² pr. år for bygningen med det højeste energibehov (BR15 energirammen er 41,5 kWh/m² pr. år). Bygningen med det højeste energibehov skal bruge et solcelleanlæg med

ca. 6,2 kW_p pr. 1000 m² etageareal for at opfylde energirammen svarende til BR15 og ca. 9,5 kW_p pr. 1000 m² etageareal for at opfylde 2020-kravet.

I udgangspunktet opfylder ingen af bygningerne 2020-kravet, men analysen viser, at man teoretisk set kan opfylde 2020-kravet uden brug af solceller, hvis man optimerer samtlige bygningens konstruktioner og systemer og samtidig sikrer, at orientering, beliggenhed (skyggeforhold) mv. er optimale.

Den vigtigste parameter er skyggeforholdene. Den næstmest betydende parameter er vinduesarealet, og derefter er det facadens kompleksitet. Varmekapaciteten har også en væsentlig betydning, og betydningen afhænger af vinduesarealet og skyggeforholdene. Orienteringen af bygningens facader betyder kun noget, hvis bygningen er frit beliggende.

Parcelhuse

For parcelhusene varierer energibehovet fra 36,7 kWh/m² pr. år for bygningen med det laveste energibehov til 51,0 kWh/m² pr. år for bygningen med det højeste energibehov (BR15 energirammen er 36,7 kWh/m² pr. år). Bygningen med det højeste energibehov skal bruge et solcelleanlæg med ca. 0,6 kW_p pr. 100 m² etageareal for at opfylde energirammen svarende til BR15 og ca. 1,1 kW_p pr. 100 m² etageareal for at opfylde 2020-kravet.

Behovet for solceller for parcelhuse ift. at opfylde energirammekravet er altså sammenligneligt med behovet for de øvrige bygningstyper (etagebolig og kontorbyggeri), hvis man ser behovet i forhold til det opvarmede etageareal.

Kigger man på muligheden for at energieffektivisere fremfor at anvende solceller, vil i alt 18 ud af 48 modeller kunne opfylde kravene, hvis ydervæggens isolering forøges samtidig med, at der anvendes bedre vinduer. Ingen bygninger vil imidlertid kunne opfylde kravet til Bygningsklasse 2020 uden brug af solceller.

For parcelhusenes vedkommende er den vigtigste parameter kompleksiteten af facaden, og herefter er det skyggeforhold, orientering og vinduesareal der betyder mest. Varmekapaciteten har meget lille betydning.

Større bygninger

For de større bygninger varierer energibehovet fra 40,8 kWh/m² pr. år for det laveste energibehov til 54,7 kWh/m² pr. år for det højeste energibehov (BR15 energirammen er 41,2 kWh/m² pr. år). Bygningen med det højeste energibehov skal bruge et solcelleanlæg med ca. 5,8 kW_p pr. 1000 m² etageareal for at opfylde BR15 og ca. 8,9 kW_p for at opfylde 2020-kravet.

Behovet for solceller i de større bygninger er i gennemsnit 1,4 kW_p højere end for tilsvarende kontorbygninger. De større bygninger har altså ikke et væsentligt større behov for solceller.

Største behov for solceller

Tabel 25 viser behovet for solceller for de mest komplicerede bygninger og bygninger udfordret af beliggenhed indenfor hver bygningstype.

Tabel 25. Behov for solceller i kW_p pr. 1000 m² bygning for at opfylde energirammerne i 2015 og 2020.

	BR15	BR20
Etageboliger	7,5	9,5
Kontorbygninger	6,2	9,5
Parcelhuse	6,0	11,0
Større bygninger	7,7*	11,0*

* De mest komplicerede bygninger er ikke medtaget i analysen af "større bygninger" (vist i Figur 37 og Figur 38) og derfor er resultaterne her højere, svarende til worst case.

Tallene i Tabel 25 er meget ensartede, og dermed er det tydeligt, at udfordringerne er stort set de samme uanset bygningstype. Etageboliger skal bruge mere end de øvrige bygningstyper for at opfylde 2015 energiramme-kravet, hvilket skyldes at varmtvandsforbruget spiller en væsentlig rolle i de mindste bygninger. Parcelhusene skal bruge mere end de øvrige bygningstyper for at opfylde 2020-kravet, hvilket også afspejler, at energiforbruget til varmt vand udgør en væsentlig del af energibehovet i en 2020-bygning.

Økonomi for alternativ til vedvarende energi

Med udgangspunkt i resultaterne for de 288 etageboliger og 288 kontorbygninger, er der lavet en analyse af de økonomiske aspekter ved, som alternativ til vedvarende energi, at energieffektivisere bygningerne.

I udgangspunktet opfylder 13 af 288 etageboliger energirammen, og hvis man forbedrer bygningernes systemer og konstruktioner, kan yderligere 80 bygninger bringes til at opfylde energirammen. Det er bygninger i 2 etager, bygninger som ikke har de store vinduesarealer orienteret mod syd og bygninger beliggende i tæt bebyggelse, der ikke kan bringes til at opfylde energirammen. Derudover kan kun få bygninger med høj facadekompleksitet bringes til at opfylde energirammen ved energieffektivisering alene.

For kontorbygningers vedkommende opfylder 39 af 288 bygninger energirammen i udgangspunktet. Hvis man energieffektiviserer bygningerne, kan yderligere 48 bygninger bringes til at opfylde energiramme-kravet. Her er det bygninger orienteret øst-vest i stedet for nord-syd og bygninger i tæt bebyggelse, som ikke kan bringes til at opfylde energiramme-kravet. De mest komplicerede bygninger med store vinduesarealer vil heller ikke umiddelbart kunne flyttes til at opfylde kravet.

Analysen viser endvidere, at prisen for at øge ydervæggens isoleringstykkelser eller at anvende bedre vinduer er væsentligt højere end at anvende solceller til at opnå samme reduktion i energibehovet. Et mere energieffektivt ventilationsanlæg vil i de mindste etagebygninger koste nogenlunde det samme som solceller, men i de større bygninger er det generelt dyrere end solceller. Bedre isolering af rør til varmt brugsvand er til gengæld billigere, end hvis man skal opnå samme reduktion af energibehovet vha. solceller.

For langt de fleste bygninger vil det altså ikke være muligt med en rimelig økonomi at opfylde energirammen uden brug af solceller.

Betydning for elnettet

Der er for etageboliger og kontorbygninger lavet en simpel analyse af, i hvilket omfang løsningen med at anvende vedvarende energi for at opfylde energiramme-kravet for samtlige bygninger vil påvirke elnettet.

Analysen viser, at etageboliger i snit vil sende ca. 850 kWh til elnettet pr. år, og for etagebygningen med det højeste energibehov er det ca. 2500 kWh pr.

år. Kontorbygninger vil i snit sende ca. 850 kWh til elnettet pr. år, og for kontorbygningen med det højeste energibehov er det ca. 2000 kWh pr. år.

Totalt set svarer dette til en udbygning af den solcelleproducerede el på ca. 3,6 GWh pr. år, og heraf vil de ca. 1,3 GWh udveksles med elnettet. I 2015 var den totale solcelleproduktion i Danmark 605 GWh.

Imidlertid er det kun ca. 30 % af 2015-bygninger som har solceller, og dermed er gennemsnitsbetragtningen ikke realistisk, men kunne til gengæld være et rimeligt bud på det behov, der vil opstå når BR2020 træder i kraft, hvor man forventeligt vil se behov for solceller på ca. 96 % af alle nye bygninger.

Konklusion

Der er gennemført en teoretisk analyse af behovet for at indregne vedvarende energi i energirammen. Analysen har primært fokuseret på etageboliger og kontorbygninger, men der er ligeledes lavet en mindre analyse for parcelhuse, og større bygninger som fx hospitaler mv.

I analysen er forudsat, at der opvarmes med fjernvarme og at der anvendes solcelleanlæg som vedvarende energi. Derudover er analysen begrænset af forudsætningerne givet i kapitlet "Beregningsmodeller".

Analyserne viser, at man kan bygge med stor frihedsgrad i facadeudtryk mv. og stadig opfylde BR15 uden brug af solceller, men det kræver en optimering af klimaskærmen og bygningens systemer. Hvis bygningen samtidig er meget kompliceret, eller voldsomt udfordret af beliggenhed (skyggeforhold) mv. opstår behovet for solceller. Det er også muligt at opfylde 2020 energirammen uden brug af solceller, men her skal bygningen energioptimeres på alle områder, samtidig med at beliggenhed og orientering mv. er optimale.

Analyserne viser også, at udfordringerne vil være nogenlunde de samme for de forskellige bygningstyper, både ift. nu gældende energirammekrav og i forhold til det forventede skærpede energikrav i 2020. Der er altså ikke stor forskel på behovet for solceller mellem bygningstyperne.

En økonomisk analyse af muligheden for at energieffektivisere bygningerne som alternativ til at anvende vedvarende energi viser, at det er væsentligt billigere at anvende vedvarende energi end at bruge mere isolering eller bedre systemer i bygningerne. Analysen er baseret på overslagsmæssige priser, men selv om der er en usikkerhed forbundet hermed, viser analysen at det er væsentligt dyrere at opnå reduktionen i energibehovet gennem energieffektivitet ift. at anvende vedvarende energi.

Analysen af betydningen for elnettet viser, at hvis man fastholder den nuværende kurs ift. muligheden for at indregne vedvarende energi i energirammen, samt de forventede skærpelser i energirammerne i 2020, vil dette medføre et behov for en udbygning af den solcelleproducerede el på ca. 0,5 % pr. år (ift. 2015-niveau). Behovet vil dog først for alvor opstå i forbindelse med indførelsen af 2020-kravene, hvor næsten alle bygninger vil inkludere vedvarende energi for at opfylde energikravene, og her vil den nødvendige udbygning af den solcelleproducerede el være ca. 1,3 % om året.

Overordnet set viser denne analyse, at muligheden for at indregne vedvarende energi i energirammen giver en stor fleksibilitet og frihed for byggeriet, samtidig med at man kan opretholde stramme krav til bygningers energiforbrug. Alternativet svarende til, at man fx fjerner muligheden for at indregne vedvarende energi og i stedet hæver energirammekravet tilsvarende for at gøre plads for arkitektonisk frihed mv., vil medføre, at de mere "almindelige" bygninger vil bruge mere energi.

Referencer

[1] Energy Performance of Buildings Directive, EPBD (Bygningsdirektivet), European Commission, 2010.

[2] Bygningsreglement 2010 (BR10). Økonomi- og Erhvervsministeriet, Erhvervs- og Byggestyrelsen. København 2010.

[3] Bygningers energibehov. SBI-anvisning 213, 4. udgave. Søren Aggerholm og Karl Grau, SBI, Aalborg Universitet.

[4] Bygningsreglement 2015 (BR15). Transport- og Bygningsministeriet, Trafik- og Byggestyrelsen. København 2015.

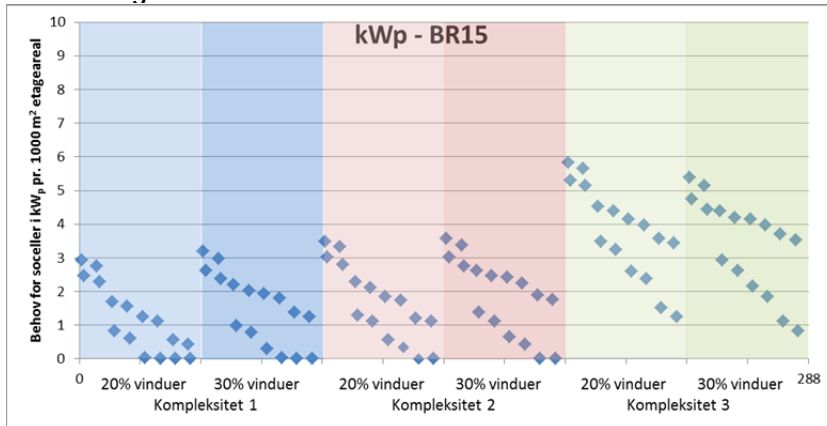
[5] DIALux Evo 6. DIAL GmbH 2015.
(<https://www.dial.de/en/dialux/download/dialux-evo-download/>)

[6] V&S Prisdata (on-line version via ByggeCentrum)
(<http://vsprisdata.byggecentrum.dk/Browser/Sigma.application>)

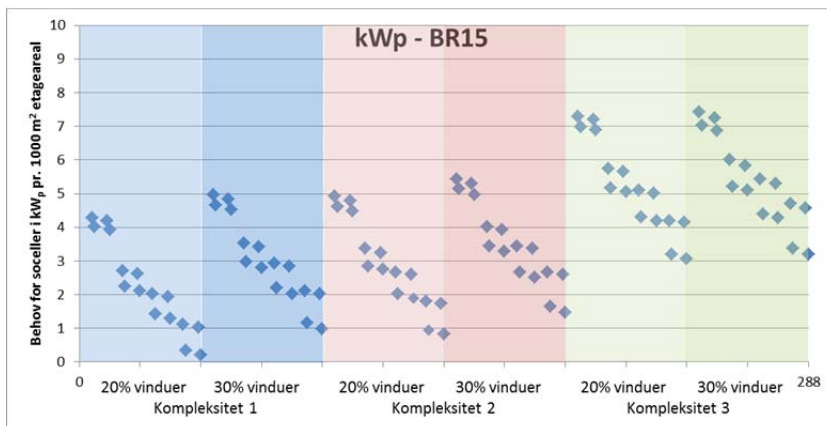
[7] Håndbog for Energikonsulenter 2016.
(<https://www.retsinformation.dk/Forms/R0710.aspx?id=176520>)

Appendiks A. Resultater for etageboliger

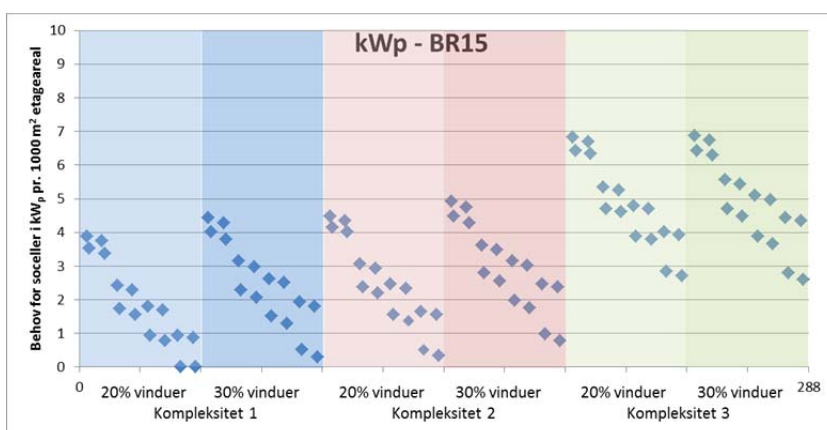
Orientering



Figur A.1. Orientering 0°.

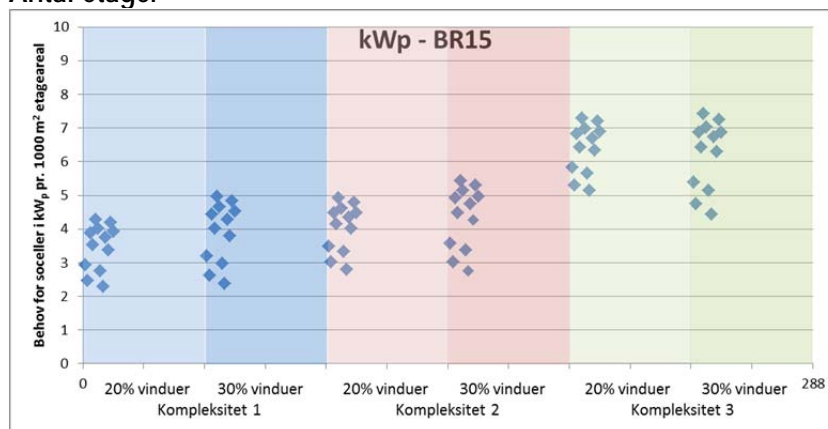


Figur A.2. Orientering 90°.

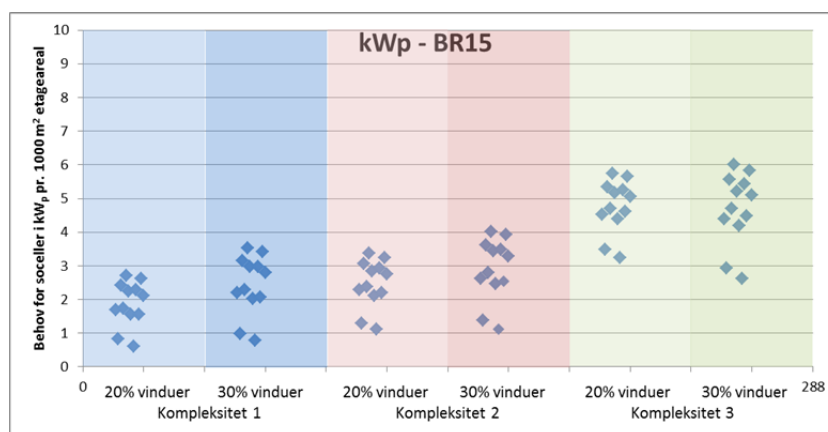


Figur A.3. Orientering 180°.

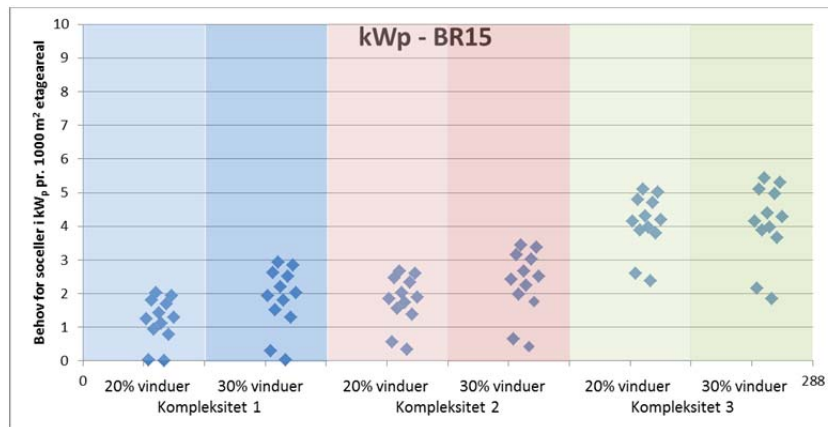
Antal etager



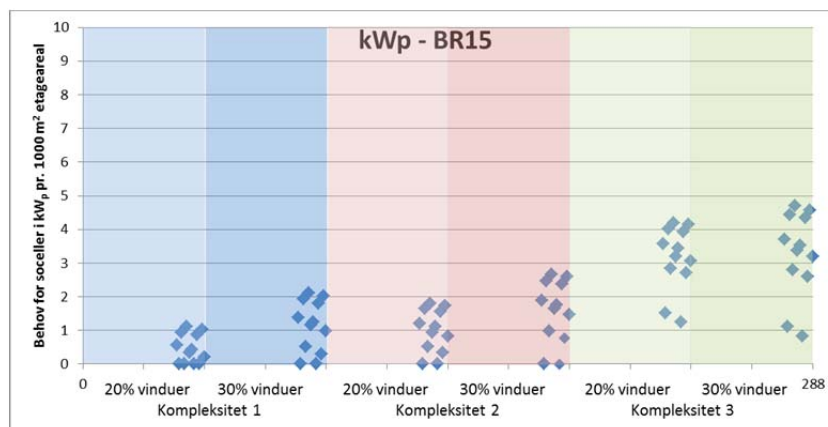
Figur A.4. Antal etager 2.



Figur A.5. Antal etager 3.

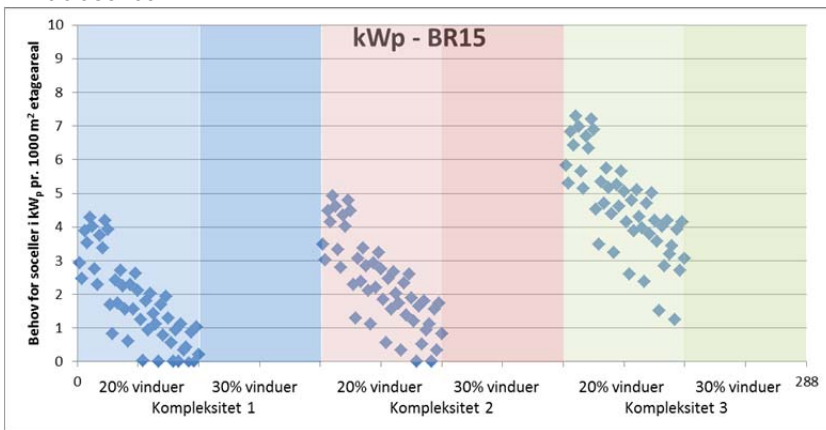


Figur A.6. Antal etager 4.

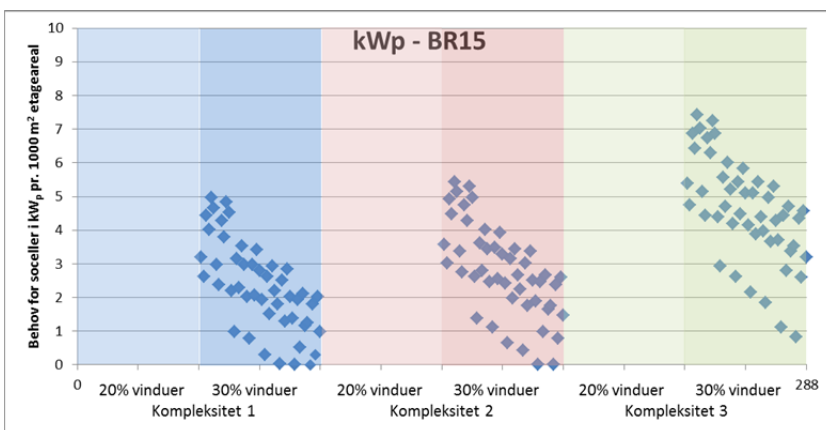


Figur A.7. Antal etager 6.

Vinduesareal

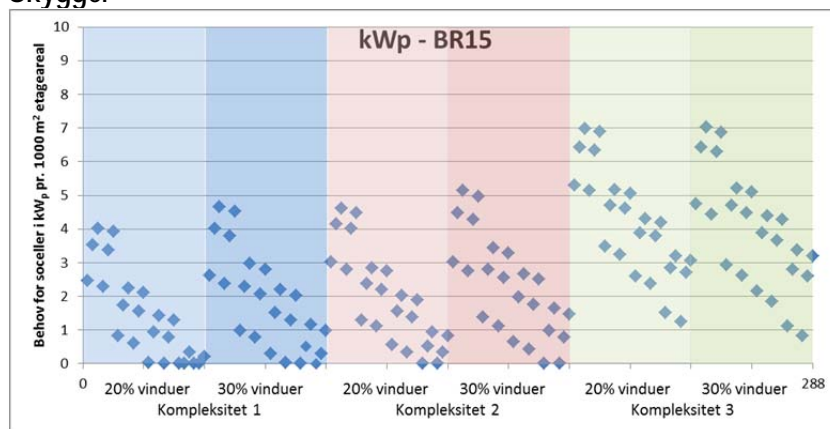


Figur A.8. Vinduesareal 20 %.

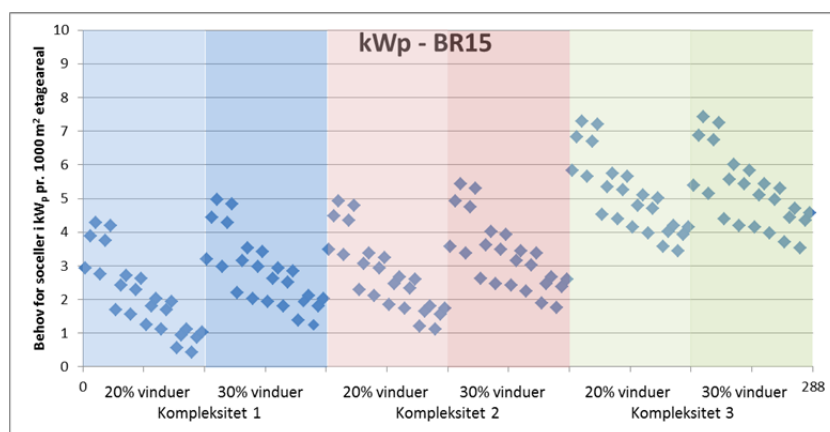


Figur A.9. Vinduesareal 30 %.

Skygger

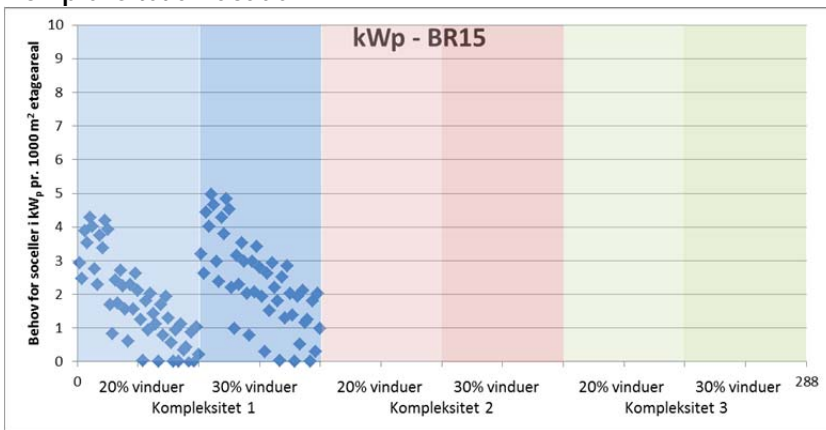


Figur A.10. Frit beliggende bygninger.

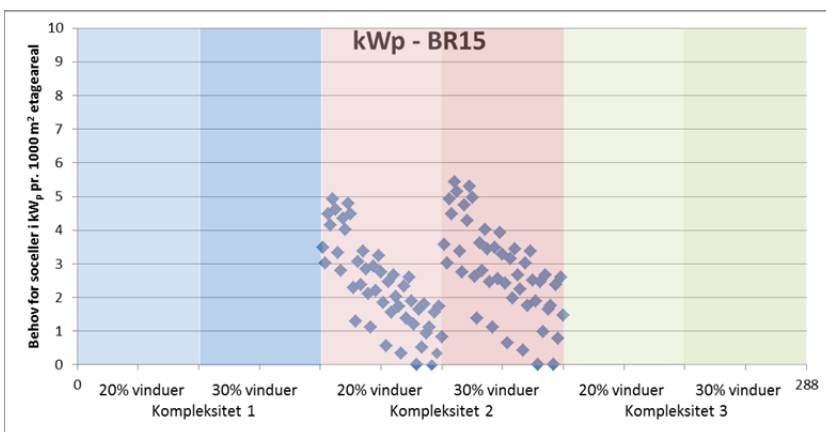


Figur A.11. Skyggefuldt beliggende bygninger.

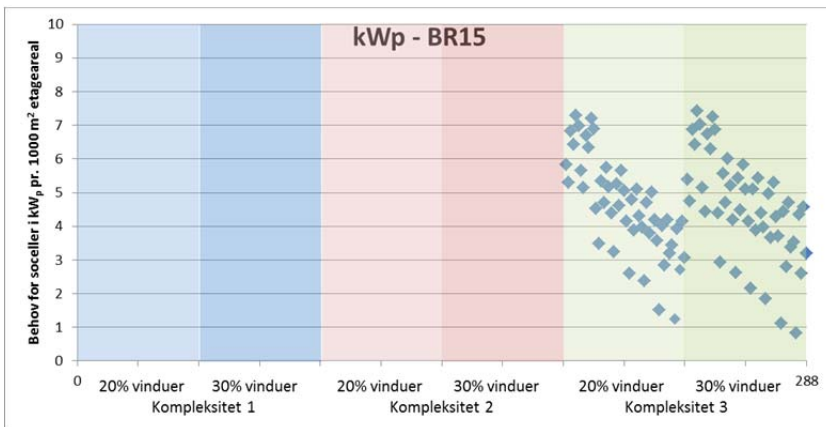
Kompleksitet af facade



Figur A.12. Lav kompleksitet.



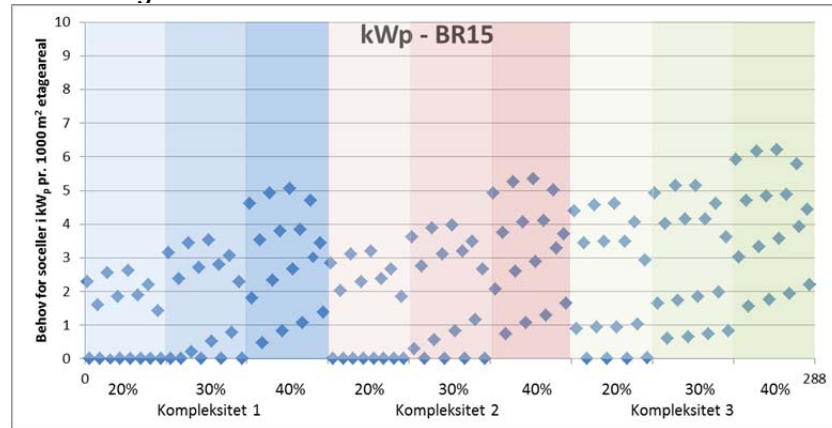
Figur A.13. Middel kompleksitet.



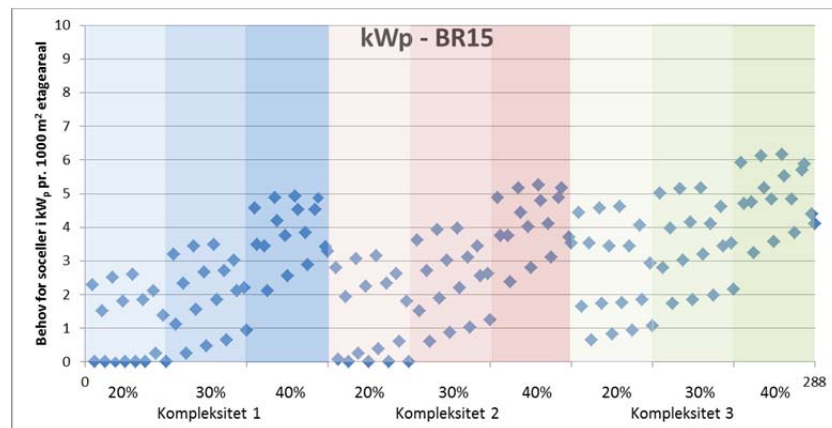
Figur A.14. Høj kompleksitet.

Appendiks B. Resultater for kontorbygninger

Orientering

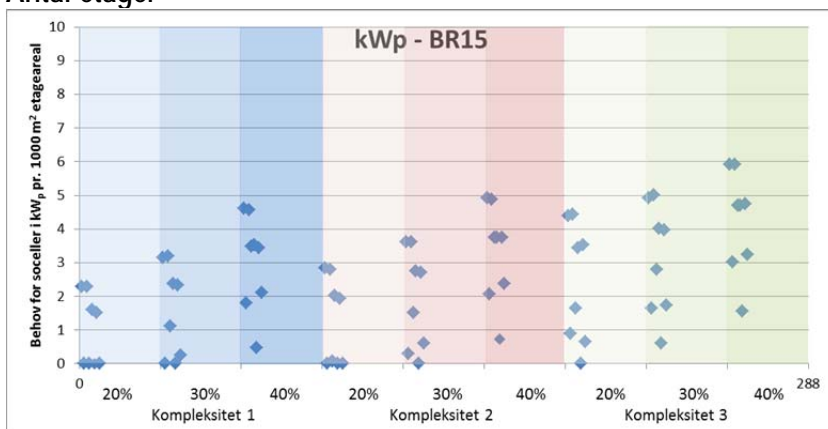


Figur B.1. Orientering 0°.

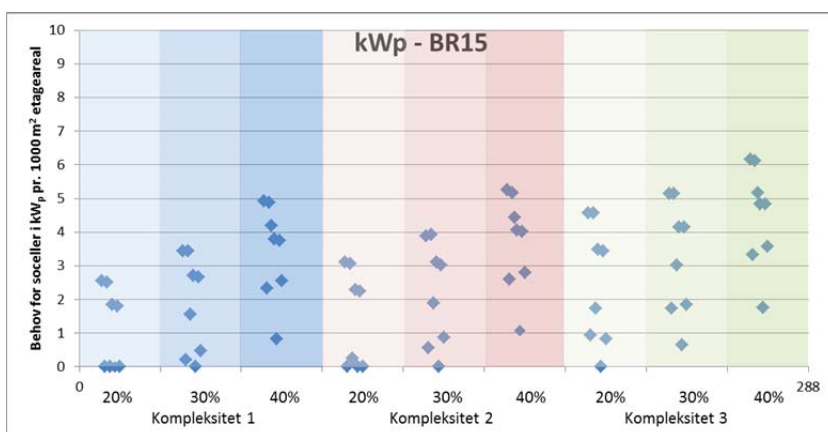


Figur B.2. Orientering 90°.

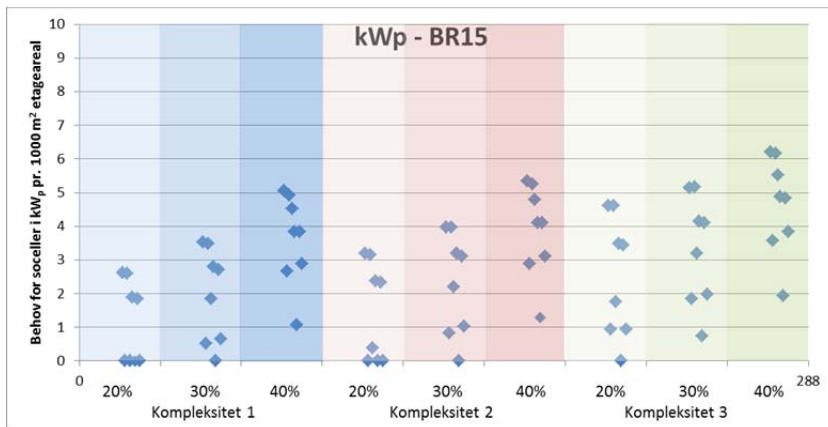
Antal etager



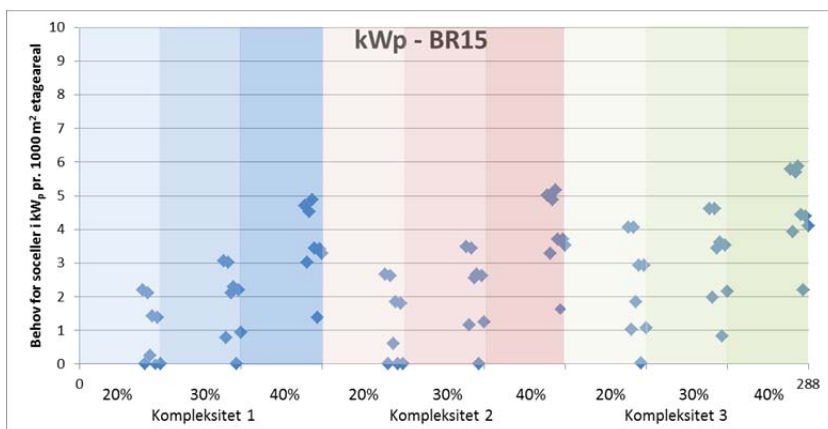
Figur B.4. Antal etager 2.



Figur B.5. Antal etager 3.

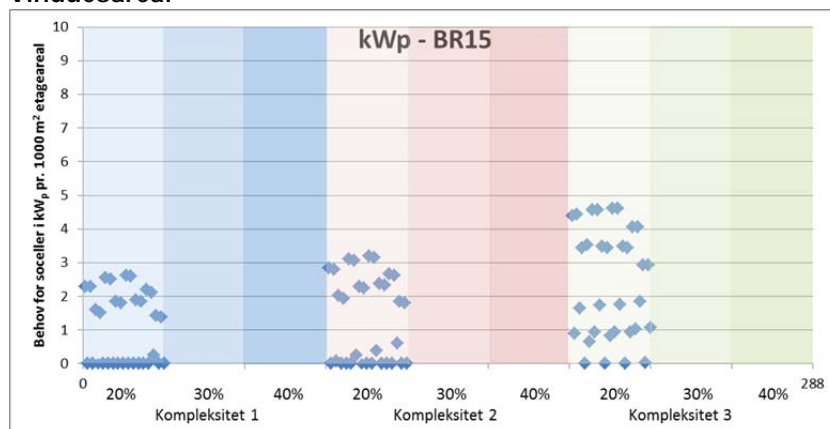


Figur B.6. Antal etager 4.

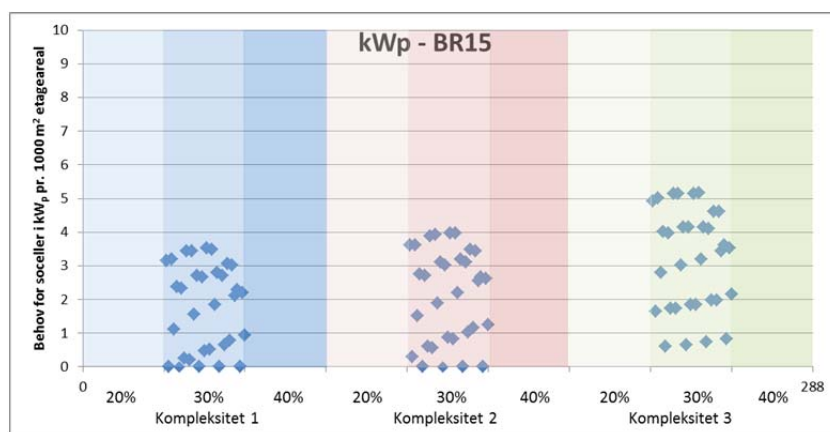


Figur B.7. Antal etager 6.

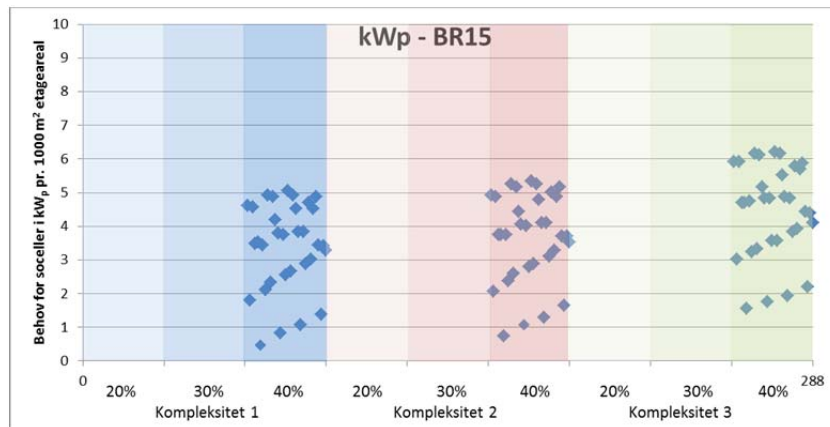
Vinduesareal



Figur B.8. Vinduesareal 20 %.

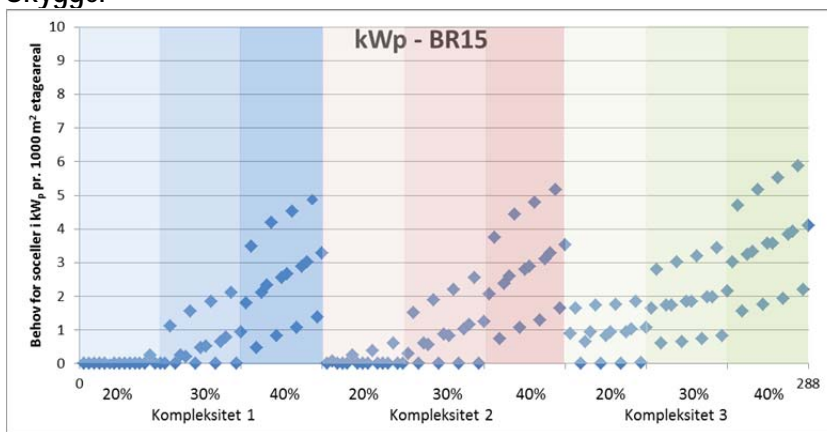


Figur B.9. Vinduesareal 30 %.

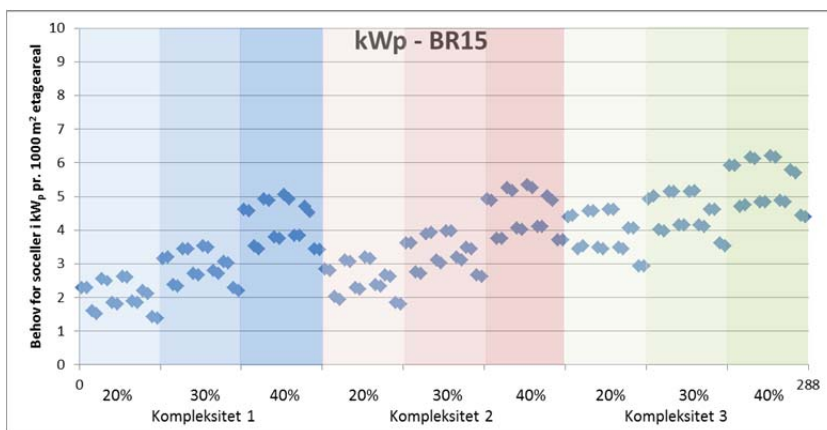


Figur B.10. Vinduesareal 40 %.

Skygger

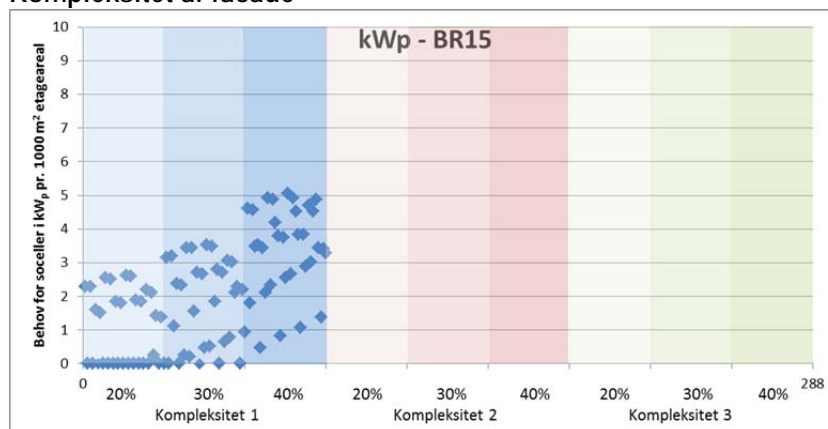


Figur B.10. Frit beliggende bygninger.

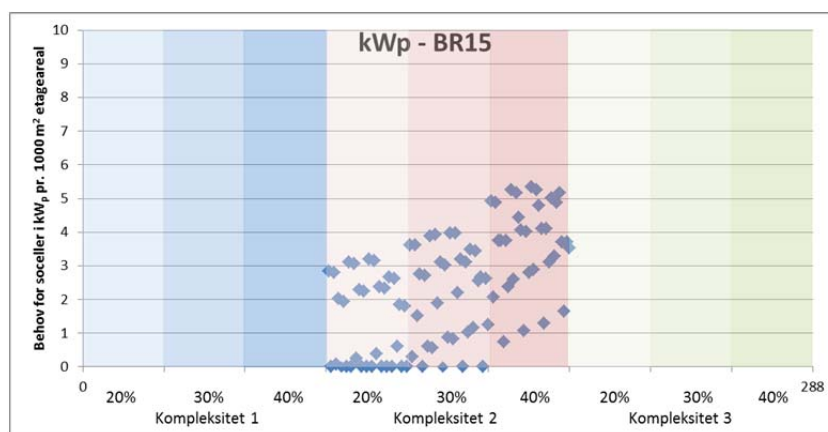


Figur B.11. Skyggefuldt beliggende bygninger.

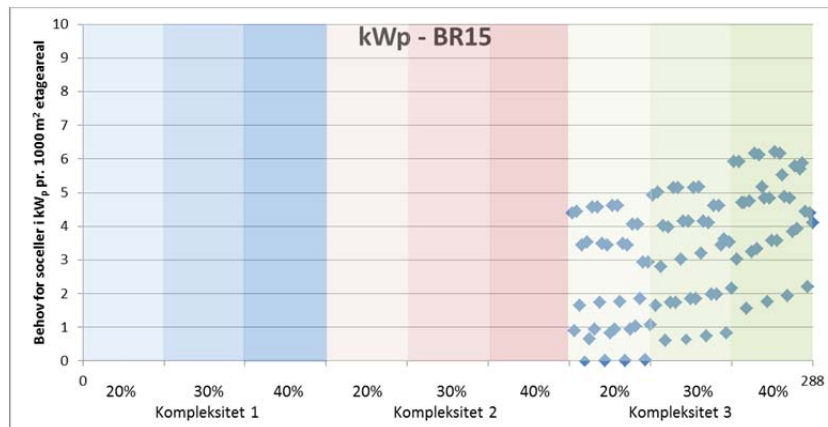
Kompleksitet af facade



Figur B.12. Lav kompleksitet.



Figur B.13. Middel kompleksitet.



Figur B.14. Høj kompleksitet.

Denne rapport analyserer behovet for at anvende vedvarende energi (VE) for at opfylde energirammen i bygningsreglementet. Der er gennemført beregninger af i alt 288 etageboliger og 288 kontorbygninger samt 48 parcelhuse. For større bygninger, fx hospitaler m.m., er der lavet en ekstrapolation af resultaterne for kontorbygninger, svarende til 24 bygninger.

Bygningstyperne er analyseret ved at variere forskellige parametre, som har indflydelse på bygningernes energibehov. De analyserede parametre er antallet af etager, facadens kompleksitet, vinduesarealet samt bygningernes varmekapacitet, orientering og skyggeforhold.

Ud fra beregningerne er det analyseret, hvornår og i hvilket omfang bygningerne har brug for vedvarende energi for at opfylde energirammen.