

Belangrijke factoren bij de bepaling van de energiebehoefte voor verwarming en koeling in commerciële en industriële gebouwen

Barbara Wauman

September 29, 2016

1 Inleiding

De doelstelling van dit onderdeel van het onderzoek bestaat uit de identificatie van de meest bepalende (gebouw)factoren op de energieprestatie van commerciële en industriële gebouwen. Om hiertoe te komen, werden twee pistes gevolgd: (1) een uitgebreide analyse van concrete voorbeeldbouwprojecten en (2) de berekening van de energiebehoefte voor verwarming en koeling voor een brede selectie gebouwvarianten van een typisch commercieel en industrieel gebouw. Dit document beschrijft de resultaten van het tweede deel.

Omwille van de beperkingen van de EPB-methode als berekenings¹ - en optimalisatietool², worden de resultaten van deze studie gebaseerd op de output van dynamisch simulaties. Zowel de netto energiebehoefte voor verwarming (zonder elektriciteitsverbruik van ventilatoren) als voor koeling werden bestudeerd.

In § 2, wordt een beschrijving gegeven van de gebouwen die gebruikt werden voor de simulaties. Er wordt een overzicht gegeven van de geïmplementeerde gebruiksprofielen en gebouweigenschappen. In § 4 wordt op basis van de simulatieresultaten aangetoond wat de invloed is van de geselecteerde maatregelen op de energieprestatie van de typegebouwen.

2 Simulatiemodel en -kader

Voor de simulaties werd gebruik gemaakt van de simulatietool TRNSYS [1] met de klimaatdata voor een (gematigd) referentiejaar in Ukkel [2]. In deze paragraaf worden verschillende afspraken toegelicht die betrekking hebben tot de uitvoering van de dynamische simulaties voor de energiebehoefte van KMO gebouwen. Verder wordt een overzicht gegeven van de geïmplementeerde gebouwmodellen, gebouweigenschappen en inputparameters en wordt gemotiveerd waarom specifiek voor deze parameters en gebouwmodellen werd gekozen.

2.1 Gebouwkenmerken en -functie

Bij het opstellen van de simulatiemodellen werd vertrokken van soortelijke internationale onderzoeksprojecten [3, 4]. Deze data werd vervolgens afgetoetst aan de hedendaagse Vlaamse bouwpraktijk en geldende bouwvoorschriften voor commerciële en industriële gebouwen.

In een poging om realistische variaties in bestaande KMO-gebouwen op een vereenvoudigde manier in rekening te brengen, werden voor de dynamische gebouwsimulaties verschillende

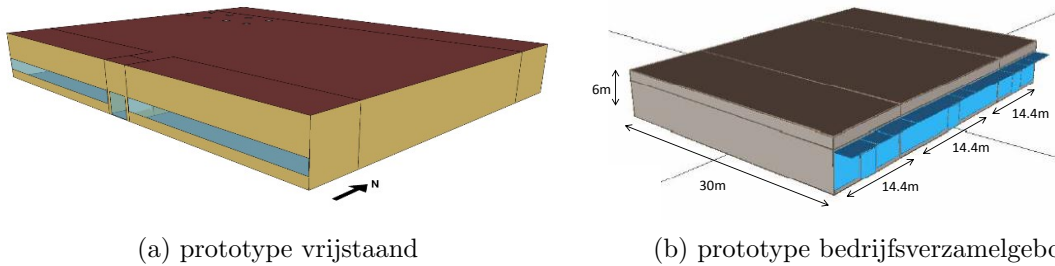
¹Door de stationaire maandgemiddelde berekeningswijze wordt er abstractie gemaakt van de dynamische effecten zoals bezonning, gebruikersgedrag, warmteopslag in de wanden en het aan- en uitschakelen van de verwarming.

²Voor de uitvoering van de parametersanalyse werden een groot aantal simulaties uitgevoerd. Om dit proces te automatiseren, werd MATLAB gekoppeld aan TRNSYS.

gebouwvarianten in beschouwing genomen waarbij gebouweigenschappen (*e.g.* **vorm**, **indeling**) en **gebouwebruik** werden gevarieerd.

Voor de simulaties werden twee **gebouwwormen** beschouwd:

- 'vrijstaand': representatief voor commerciële (*i.e.* grote winkel) en industriële gebouwen (*i.e.* KMO gebouw met opslag-, distributie- of productieruimte).
- 'verzamelgebouw': representatief voor kleinere, aaneengeschakelde KMO-gebouwtjes



Figuur 1: Gebouwwormen voor commerciële gebouwen zoals geïmplementeerd in het dynamisch simulatiemodel TRNSYS([3, 4])

Voor beide prototypes, werden vervolgens enkele (typische) **gebouwkenmerken** vastgelegd:

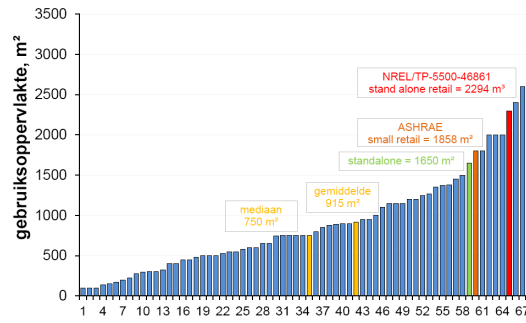
- aantal verdiepingen: 1 bouwlaag, 6 m hoog
- raamfractie (WWR³)
 - 'Vrijstaand': WWR = 70%
 - 'Verzamelgebouw': WWR = 25%
- afmetingen + gebruiksoppervlakte
 - 'Verzamelgebouw': 14.4 x 30 x 6 m per unit, $A = 43.2 \text{ m}^2$ (per unit), $V = 259.2 \text{ m}^3$ (per unit), $A_T = 1217$ (units aan buitenzijde) of 1037 (unit in midden) m^2
 - 'Vrijstaand': 55 x 30 x 6 m, $A = 1650 \text{ m}^2$, $V = 9900 \text{ m}^3$, $A_T = 4481 \text{ m}^3$

De resultaten van een vergelijkende analyse met 67 kleine tot middelgrote supermarkten zijn weergegeven in *Figuur 2*.

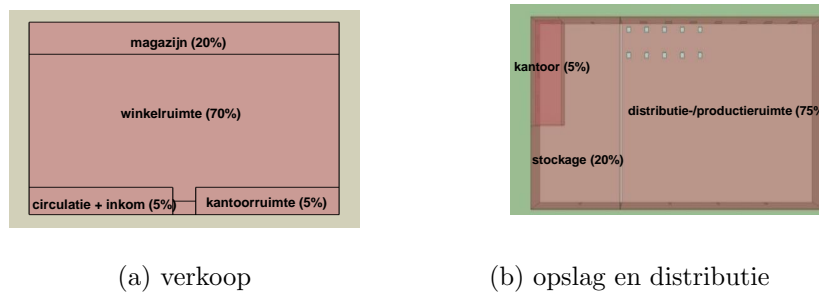
Verder werden voor de geselecteerde typegebouwen, drie hypothetische **gebruiksscenario's** vastgelegd op basis van informatie uit een soortgelijk onderzoek [5]. Hierdoor kon de invloed op het energiegebruik voor verwarming en koeling bij aanpassingen aan de gebouwschil geëvalueerd worden bij verschillende gebouwebruiken en dus voor verschillende interne warmtewinsten en ventilatiedebieten, gebouwindelingen, insteltemperaturen voor verwarming en raamoppervlakten.

- commerciële gebouwen gebruikt voor verkoop van producten of kledij (*Figuur 3 (a)*)
- industriële gebouwen gebruikt voor logistieke functies, opslag en distributie (*Figuur 3 (b)*)

³In de KMO typegebouwen worden er enkel ramen voorzien in de voorgevel. Koepels en lichtstraten worden hier in deze studie niet in beschouwing genomen.



Figuur 2: Toetsing van de oppervlakte voor het typegebouw 'Standalone' aan werkelijke oppervlaktes van kleine en middelgrote supermarkten in Vlaanderen en referentiegebouwen gebruikt in soortgelijke onderzoeksprojecten ([3, 4]).



Figuur 3: Indeling van de typegebouwen in verschillende zones.

In praktijk worden verschillende gebouwconstructies toegepast in KMO-gebouwen. Op basis van een analyse van de gebouwschillen van bestaande KMO gebouwen en in overleg met de gebruikersgroep, werden 4 representatieve varianten voor de **samenstelling** van de gebouwschil bepaald, dewelke werden gebruikt voor de simulatiemodellen:

- volledige **beton**structuur
- **binnendozen** voor buitenwanden, in combinatie met betonvloer en steeldeck dakplaten
- **stalen** buitenwanden en dakplaten, in combinatie met een betonvloer
- **houten** wandafwerking, in combinatie met een betonvloer en steeldeck dakplaten

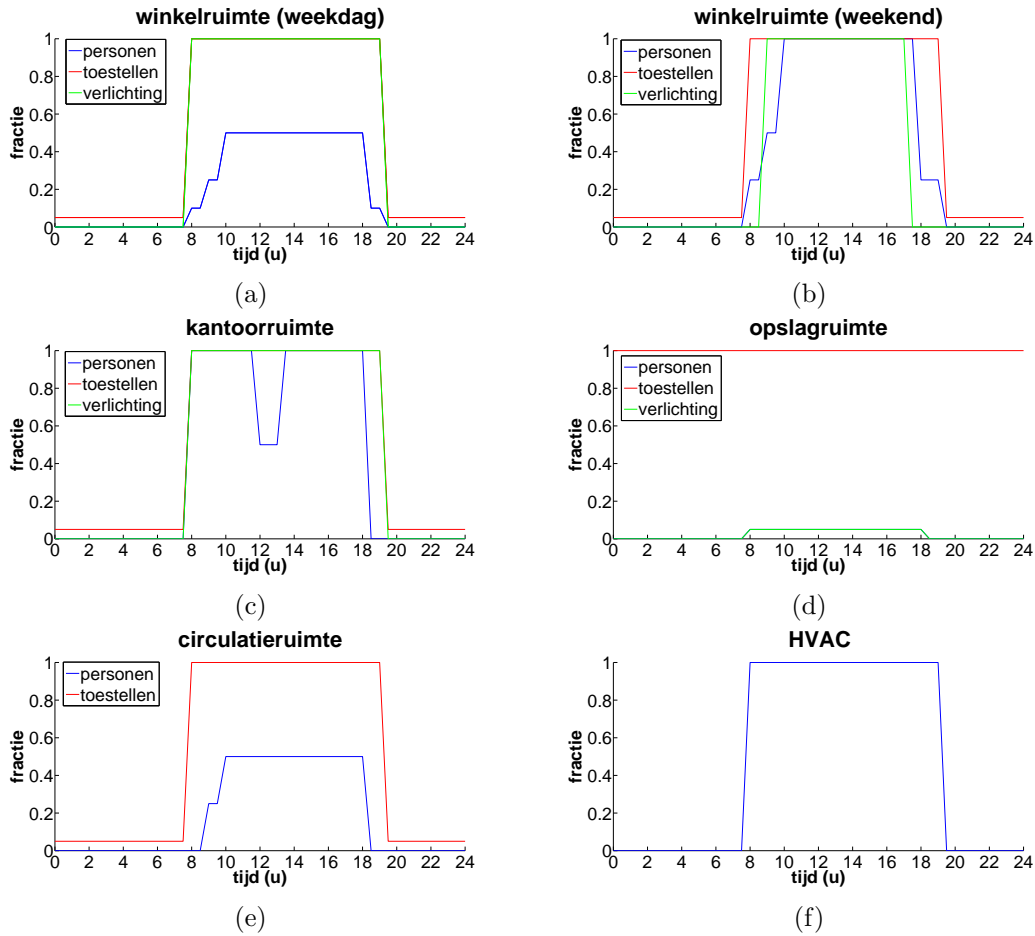
Tabel 1: Overzicht van de wandopbouw voor de verschillende beschouwde constructietypes.

binnen-buiten	beton	binnendoos	staal	hout
gevel	beton (11cm) - PUR - beton (7cm)	stalen plaat - MW	sandwichpaneel - PUR	OSB - houtskelet/MW - houtvezelplaat
dak	beton ⁽¹⁾ (4cm) - PUR - EPDM	steeldeck (PUR)	steeldeck (PUR)	steeldeck (PUR)
vloer	chape (8cm) - beton (15cm) - PUR	idem beton	idem beton	idem beton

⁽¹⁾ Betonnen TT-dakelementen

2.2 Gebouwegebruik

Voor de weekends en zon- en feestdagen wordt vertrokken van het jaar 2007. De eerste dag van het jaar is een maandag. Voor de verschillende gebruiksscenario's (verkoop, stockage en distributie) worden voor een 24-uur periode typische gebruiksprofielen vastgelegd voor verlichting, voor bezetting en dus hieraan gerelateerde interne warmtewinsten door personen - en voor ventilatie(fractie) op basis van de activiteitendatabank [6] die ondermeer gebruikt wordt in het dynamisch simulatieprogramma EnergyPlus. Ter illustratie worden de gebruiksschema's voor de verschillende gebouwzones van een commercieel gebouw voorgesteld in *Figuur 4* (a) tot en met (f).



Figuur 4: Gebruiksschema's **commerciële** gebouwen.

De veronderstellingen betreffende de bezetting (m^2/pers) en interne warmtewinsten (W/pers of W/m^2) zijn samengevat in *Tabel 2*, *Tabel 3* en *Tabel 4*, respectievelijk.

Tabel 2: Bezetting zone ifv activiteit [6].

bezetting [m^2/pers]	commercieel	industrieel
werkruimte	9.1	14.3
kantoren	14.3	14.3
opslagruimtes	9.1	9.1
circulatie + inkom	5	-

Tabel 3: Interne warmtewinsten door personen ivf activiteit [6].

warmtewinst per persoon [W/pers]	commercieel	industrieel
werkruimte	120	180
kantoren	120	120
opslagruimtes	120	140
circulatie + inkom	120	-

Tabel 4: Interne warmtewinsten door elektrische toestellen ivf activiteit ([6]).

bezetting [m ² /pers]	commercieel	industrieel
werkruimte	5	5
kantoren	10	10
opslagruimtes	25	2
circulatie + inkom	5	-

2.3 HVAC en verlichting

2.3.1 Verwarming en koeling

Aangezien de focus van het onderzoeksproject beperkt is tot de evaluatie van maatregelen aan de gebouwschil en dus beperkt blijft tot evaluatie van de energiebehoefte, werden de systemen voor klimatisatie op een vereenvoudigde manier opgenomen in de dynamische simulaties. Zowel voor verwarming als koeling werd een ideaal systeem (*i.e.* perfecte regeling, onbeperkt verwarmings- en koelvermogen) verondersteld. De berekende verwarmings- en koelbehoefte stellen dus de hoeveelheid energie voor die idealiter nodig is om onderstaande vooropgestelde comfortniveaus te garanderen:

- winkelruimte: 20°C
- kantoorruimte: min. 20°C - max. 29°C (richtwaarden Welzijn op het werk)
- opslag- en distributieruimte: min. 15.6°C [3, 4, 5].

Voor de bepaling van de energiebehoefte voor verwarming en koeling werd een intermitterend verwarmings- en koelsysteem verondersteld, waarbij de temperatuur 's nachts en tijdens de weekends werd verlaagd respectievelijk verhoogd. De ingestelde setback bedroeg 5°C voor verwarming en 30°C voor koeling.

2.3.2 Ventilatie

In overeenstemming met de binnenluchtkwaliteitseisen zoals vermeld in de richtlijnen voor Welzijn op het Werk en in EN 15251 [7], werd het voorziene ventilatiedebiet in elke zone bepaald als het maximum van 30 m³/(h.pers) en 1.3 m³/(h.m²). De ventilatie werd tijdsgestuurd volgens de geldende bezettingsschema's. In het geval een mechanisch ventilatiesysteem met warmteterugwinning werd voorzien, werd de efficiëntie van de warmtewisselaar gelijkgesteld aan 75%. Tevens werd in dat geval een bypass geïnstalleerd dewelke werd ingeschakeld zodra:

- $\theta_{lucht,toevoer} > 22^\circ\text{C}$ (Om pendelgedrag te voorkomen, werd een hysteresis van 2°C voorzien.)
- $14^\circ\text{C} < \theta_{lucht,buiten} < \theta_{lucht,binnen}$ (in geval bezetting)
- $10^\circ\text{C} < \theta_{lucht,buiten} < \theta_{lucht,binnen}$ (in geval GEEN bezetting)

2.3.3 Verlichting

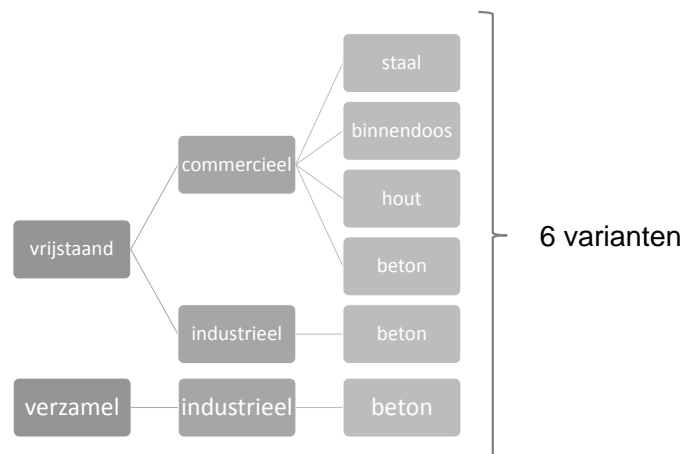
Het geïnstalleerd vermogen voor verlichting voor de verschillende gebouwzones worden voorgesteld in *Tabel 5*.

Tabel 5: Geïnstalleerd vermogen voor verlichting voor verschillende KMO-gebouwzones [6].

geïnstalleerd vermogen [W/m^2]	commercieel	industrieel
werkruimte	10	10
kantoren	10	10
opslagruimtes	0	0

Het gebruik van de verlichting gebeurt op basis van de verlichtingsschema's, opgesteld voor de verschillende zones en gebouwgebruiken, zoals oa. voorgesteld in *Figuur 4*.

Tenslotte, om het totaal aantal uit te voeren simulaties te beperken, werd het aantal beschouwde simulatiemodellen beperkt tot 6 (zie *Figuur 5*).



Figuur 5: Overzicht gebouwssimulatiemodellen betrokken binnen dit onderzoeksproject.

3 Parameterstudie

Om de bepalende factoren voor de energiebehoefte voor verwarming en koeling te kunnen definiëren, werd een parameterstudie uitgevoerd waarbij de invloed van de energie-efficiëntie van de gebouwschil (U-waarde schildelen, luchtdichtheid), de aanwezigheid van bouwknoopen, de voorziening van zonwering en de impact van warmteterugwinning op de ventilatielucht op de energiebehoefte werd bestudeerd.

Voor de **isolatiegraad** van de gebouwschil, werden de R en U-waarden gevarieerd tussen de EPB-eis dd.2014 en de state-of-the-art bouwpraktijk.

- U-waarden (combinatie van ontwerpwaardes en uitvoering) van dak, vloer en wanden variëren in 4 discrete stappen tussen 0.1 en 0.24 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
- Voor de ramen en beglazing werd een variatie voorzien van de U-waarden van zowel de beglazing (U-waarden = 1.1 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ = dubbele beglazing, 1 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ = dubbele, extra

zonwerende beglazing) of $0.6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) = 3\text{-dubbele beglazing}$) als de raamprofielen (U-waarde = 2.9, 1.8 of $0.8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)⁴

De **luchtdichtheitsgraad** van de gebouwschil, uitgedrukt aan de hand van de v_{50} -waarde, werd gevarieerd in 4 discrete stappen tussen $12 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ en $1 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$.⁵

Voor de **zonwering** werden zowel zonwerende beglazing als buitenzonwering (= screens die - in geval gesloten - 70% van de invallende zonstraling tegenhouden) beschouwd.

- de g-waarde van de beglazing varieerde tussen 0.26 en 0.6, afhankelijk van het type beglazing (dubbel \leftrightarrow 3-dubbel, al dan niet zonwerende beglazing).
- In het geval screens werden voorzien⁶, werd uitgegaan van een automatische bediening in functie van de invallende zonstraling op de gevel en de binnentemperatuur. De screens werden omlaag gestuurd wanneer invallende zonstraling $I_{tot} > 250 \text{ W}/\text{m}^2$. Om pendelgedrag te voorkomen werd een hysteresis van $100 \text{ W}/\text{m}^2$ voorzien.

Wat betreft de **aanwezigheid van bouwknopen** (koudebruggen), werden 2 scenario's ingerekend end welke bij benadering kunnen omschreven worden als:

- EBP-aanvaarde bouwknopen + een aantal niet opgelost (wandaansluitingen, dakopstand, boord onderaan wanden)
- EBP-aanvaarde bouwknopen + alles opgelost wat kan

Voor de **ventilatie** werd ofwel een systeem C (mechanische extractie), ofwel een systeem D (mechanische balansventilatie met $\eta_{WTW} = 75\%$) voorzien.

De combinatie van al deze parameters, resulteert in > 15900 simulatiecases per gebouwvariant.

4 Resultaten sensitiviteitsanalyse

Aan de hand van de simulatieresultaten van de parameterstudie kon de impact van verschillende ontwerpkeuzes op de energiebehoefte voor verwarming en koeling worden bepaald (= sensitiviteitsanalyse). De resultaten van deze studie worden grafisch voorgesteld aan de hand van box plots, die het maximum, het bovenste kwartiel, de mediaan, het onderstaand kwartiel en het minimum van alle simulatieresultaten tonen. Verder wordt de invloed van elke parameter becijferd aan de hand van de absolute en relatieve energiebesparing bij variatie tussen minimum en maximum waarde van de parameter. Tenslotte wordt de sensitiviteit van elke parameter uitgedrukt aan de hand van de gestandaardiseerde correlatiecoëfficiënt⁷. De energiebehoefte voor verwarming en koeling zijn bepaald op jaarbasis en uitgedrukt per m^2 gebruiksooppervlakte. Voor de resultaten van het 'bedrijfsverzamelgebouw' werd het gemiddelde van de 3 aparte KMO-gebouwtjes genomen.

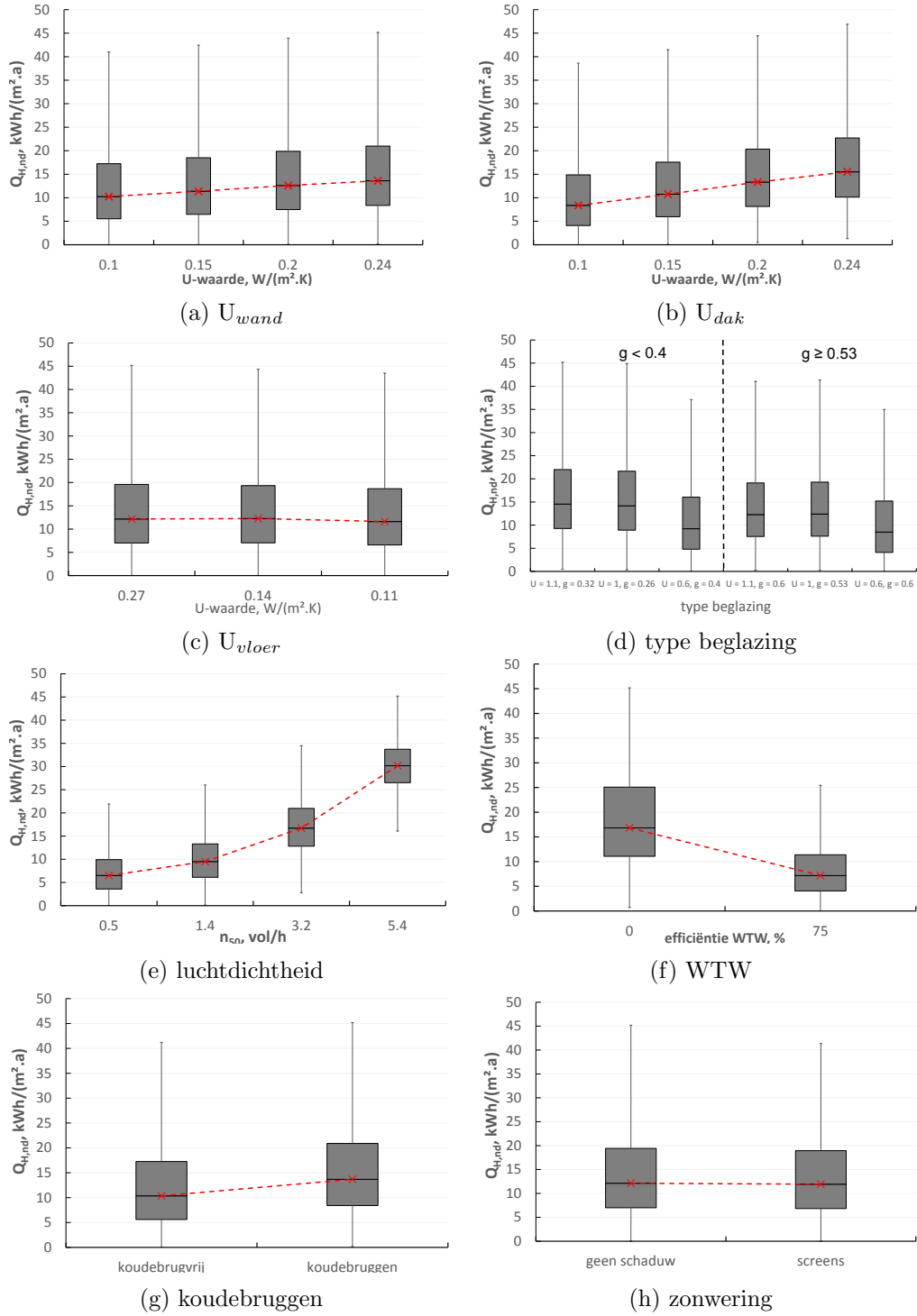
⁴Voor de parameteranalyse werden enkele combinaties vooraf uitgesloten omdat verwacht mag worden dat deze in praktijk niet voorkomen. Zo werden enkel de 2 meest performante raamprofielen (U-waarde = 1.8 of $0.8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) gecombineerd met 3-dubbele beglazing.

⁵In het geval een ventilatiesysteem D met warmteterugwinning wordt voorzien, wordt een minimale luchtdichtheid van de gebouwschil verwacht zoals opgelegd door de norm EN 13799. Voor de parameteranalyse wordt ventilatiesysteem D dus enkel gecombineerd met een gebouwschil met v_{50} -waarde $\leq 3 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$.

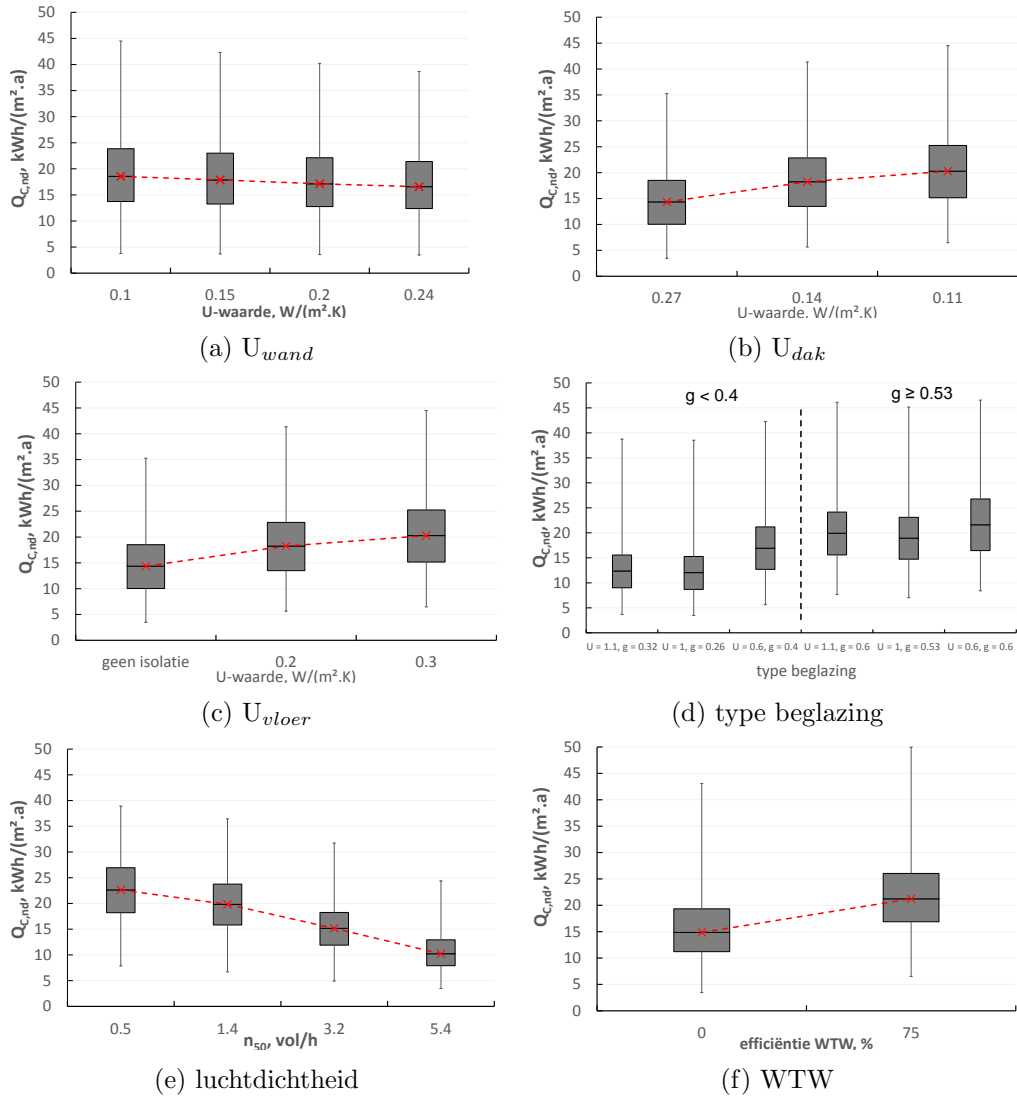
⁶Zonwerende beglazing wordt nooit gecombineerd met screens.

⁷Het verband tussen 2 variabelen wordt uitgedrukt aan de hand van de correlatiecoëfficiënt. Echter, om de invloed van de verschillende parameters onderling te vergelijken, moet rekening gehouden worden met de standaarddeviatie van de variaties van elke parameter. De sensitiviteit wordt daarom geëvalueerd aan de hand van de gecorrigeerde of gestandaardiseerde correlatiecoëfficiënten.

Als voorbeeld worden de resultaten van het vrijstaand commercieel gebouw met een stalen constructie getoond. *Figuur ??* (a) tot en met (h) tonen de resultaten voor de jaarlijkse netto energiebehoefte voor verwarming. *Figuur ??* (a) tot en met (f) tonen de resultaten voor de jaarlijkse netto energiebehoefte voor koeling.



Figuur 6: Boxplots (box = 25-75%, foutenbalken = 0-100%) voor de netto energiebehoefte voor **verwarming** voor een **vrijstaand, commercieel** gebouw met een **stalen** gebouwschil (rode kruisen geven de medianen aan).



Figuur 7: Boxplots (box = 25-75%, foutenbalken = 0-100%) voor de netto energiebehoefte voor koeling voor een **vrijstaand, commercieel** gebouw met een **stalen** gebouwschil (rode kruisen geven de medianen aan).

Tabel 6: **Absolute en relatieve energiebesparing voor verwarming** ($\Delta Q_{H,nd}$) bij variatie tussen minimum en maximum waarde van verschillende gebouwparameters voor een commercieel, vrijstaand gebouw (staal).

		STAAL			
		geen WTW		WTW	
		$\Delta Q_{H,nd}$, kWh/(m ² .a)	$\Delta Q_{H,nd}$, %	$\Delta Q_{H,nd}$, kWh/(m ² .a)	$\Delta Q_{H,nd}$, %
U_{wand}	0.24 → 0.1 W/(m ² .K)	3.58	21.5%	2.70	36.9%
U_{dak}	0.24 → 0.1 W/(m ² .K)	7.65	39.6%	5.82	60.5%
U_{vloer}	geen isolatie → 0.1 W/(m ² .K)	0.88	5.2%	0.51	9.3%
$U_{beglazing}$	U = 1.1 → 0.6 W/(m ² .K)	3.26	23.1%	2.32	45.1%
$U_{raamprofiel}$	U = 2.9 → 0.8 W/(m ² .K)	3.68	19.9%	2.83	32.2%
$n_{50}^{(1)}$	5.4 → 0.5 vol/h	20.45	68.9%	2.45	42.7%
koudebruggen		3.49	21.0%	2.69	36.4%

⁽¹⁾ in geval een ventilatiesysteem D met WTW wordt voorzien, wordt de maximale waarde voor n_{50} beperkt tot 1.4 vol/h.

Tabel 7: **Absolute en relatieve energiebesparing voor koeling** ($\Delta Q_{C,nd}$) bij variatie tussen minimum en maximum waarde van verschillende gebouwparameters voor een commercieel, vrijstaand gebouw (staal).

		STAAL			
		geen WTW		WTW	
		$\Delta Q_{C,nd}$, kWh/(m ² .a)	$\Delta Q_{C,nd}$, %	$\Delta Q_{C,nd}$, kWh/(m ² .a)	$\Delta Q_{C,nd}$, %
U_{wand}	0.24 → 0.1 W/(m ² .K)	-1.63	-11.1%	-2.45	-12.1%
U_{dak}	0.24 → 0.1 W/(m ² .K)	-2.44	-16.3%	-4.05	-20.5%
U_{vloer}	geen isolatie → 0.1 W/(m ² .K)	-5.50	-49.5%	-6.54	-38.8%
$U_{beglazing}$	U = 1.1 → 0.6 W/(m ² .K)	-0.89	-4.6%	-1.72	-6.6%
$U_{raamprofiel}$	U = 2.9 → 0.8 W/(m ² .K)	-2.06	-15.3%	-2.90	-15.6%
$n_{50}^{(1)}$	5.4 → 0.5 vol/h	-9.71	-100.6%	9.02	29.2%

⁽¹⁾ in geval een ventilatiesysteem D met WTW wordt voorzien, wordt de maximale waarde voor n_{50} beperkt tot 1.4 vol/h.

Tabel 8: Gestandaardiseerde correlatiecoëfficiënt voor de netto energiebehoefte voor **verwarming** in volgorde van impact voor een **vrijstaand, commercieel** gebouw.

Commercieel, vrijstaand		BINNENDOOS	STAAL	HOUT	BETON
$n_{50}^{(1)}$	5.4 → 0.5 vol/h	0.83	0.83	0.83	0.84
WTW	0 → 75%	-0.56	-0.55	-0.56	-0.56
U_{dak}	0.24 → 0.1 W/(m ² .K)	0.28	0.28	0.28	0.28
$U_{beglazing}$	U = 1.1 → 0.6 W/(m ² .K)	0.19	0.19	0.19	0.19
$U_{raamprofiel}$	U = 2.9 → 0.8 W/(m ² .K)	0.18	0.18	0.18	0.18
bouwknopen		0.17	0.17	0.17	0.08
U_{wand}	0.24 → 0.1 W/(m ² .K)	0.10	0.13	0.12	0.12
U_{vloer}	geen isolatie → 0.1 W/(m ² .K)	0.03	0.03	0.03	0.03

⁽¹⁾ enkel voor de gevallen met ventilatiesysteem C

Tabel 9: Gestandaardiseerde correlatiecoëfficiënt voor de netto energiebehoefte voor **verwarming** in volgorde van impact voor een **industrieel** vrijstaand en bedrijfsverzamelgebouw (**beton**).

industrieel (beton)		verzamelgebouw	vrijstaand
$n_{50}^{(1)}$	5.4 → 0.5 vol/h	0.83	0.84
WTW	0 → 75%	-0.65	-0.65
U_{dak}	0.24 → 0.1 W/(m ² .K)	0.27	0.26
U_{wand}	0.24 → 0.1 W/(m ² .K)	0.16	0.12
bouwknopen		0.01	0.08
$U_{raamprofiel}$	U = 2.9 → 0.8 W/(m ² .K)	0.06	0.06
$U_{beglazing}$	U = 1.1 → 0.6 W/(m ² .K)	0.06	0.06
U_{vloer}	geen isolatie → 0.1 W/(m ² .K)	0.04	0.02

⁽¹⁾ enkel voor de gevallen met ventilatiesysteem C

Tabel 10: Gestandaardiseerde correlatiecoëfficiënt voor netto energiebehoefte voor **koeling** in volgorde van impact voor een **vrijstaand, commercieel** gebouw.

commercieel, vrijstaand		BINNENDOOS	STAAL	HOUT	BETON
$n_{50}^{(1)}$	5.4 → 0.5 vol/h	-0.63	-0.64	-0.63	-0.65
WTW	0 → 75%	0.45	0.45	0.45	0.45
U_{vloer}	geen isolatie → 0.1 W/(m ² .K)	-0.37	-0.37	-0.37	-0.37
$U_{raamprofiel}$	U = 2.9 → 0.8 W/(m ² .K)	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19
$U_{beglazing}$	U = 1.1 → 0.6 W/(m ² .K)	-0.18	-0.19	-0.19	-0.19
U_{dak}	0.24 → 0.1 W/(m ² .K)	-0.17	-0.17	-0.17	-0.19
zonwering	g-waarde	0.12	0.12	0.12	0.12
U_{wand}	0.24 → 0.1 W/(m ² .K)	-0.09	-0.11	-0.11	-0.11

⁽¹⁾ enkel voor de gevallen met ventilatiesysteem C

Uit deze resultaten blijkt dat vooral de keuze van het ventilatiesysteem - of beter de aanwezigheid van een warmtewisselaar (WTW) - en de luchtdichtheid de meest invloedrijke factoren zijn voor zowel de energiebehoefte voor verwarming als voor de energiebehoefte voor koeling. Verder treedt bij dalende U-waarden van de bouwschil een daling van de energiebehoefte voor verwarming en een stijging van de koelbehoefte op. Hoewel de impact van een betere isolatie van de gebouwschil (vooral U_{dak} - zie *Tabel 6*) iets meer doorweegt in het geval een ventilatiesysteem D met warmtewisselaar (WTW) is voorzien, blijft de invloed van de U-waarden op de energiebehoefte over het algemeen beperkt. De gestandaardiseerde correlatiecoëfficiënt variëren tussen $SCC_{U_{vloer}} = 0.03$ en $SCC_{U_{dak}} = 0.3$ voor verwarming en tussen $SCC_{U_{wand}} = -0.11$ en $SCC_{U_{vloer}} = -0.4$ voor koeling. Omdat de EPB-eisen dd. 2014 als bovengrens voor de U-waarden van de schildelen werden gebruikt, werd voor deze parameterstudie reeds vertrokken van een (redelijk) goed geïsoleerde bouwschil. Hierdoor zijn de transmissieverliezen eerder beperkt en wegen de ventilatieverliezen in verhouding meer door. Dit verklaart de significante invloed van warmtewisselaar ($SCC_{WTW} = -0.56$ à -0.65) en de luchtdichtheid van de schil ($SCC_{n_{50}} > 0.8$) op de energiebehoefte enerzijds en de eerder beperkte impact van de U-waarden anderzijds. Vooral de lage impact van de vloerisolatie op de energiebehoefte voor verwarming valt sterk op ($SCC_{U_{vloer}} = 0.03$). Aanbrengen van een horizontale isolatielaag (PIR, 11 cm) onder de vloer verlaagt de energiebehoefte voor verwarming met amper 6 (zie *Tabel 6* - geen WTW) tot 9% (zie *Tabel 6* - WTW) ten opzichte van een niet geïsoleerde vloer. Daarentegen neemt de koelvraag met $\pm 45\%$ toe doordat de thermische capaciteit van het onderliggend grondmassief wordt kortgesloten. Er kan dus besloten worden dat een verdere verlaging van de U-waarden ($< 0.24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$), slechts beperkte of zelfs geen winst oplevert, zeker wat betreft het isoleren van de vloer.

Uit de simulatieresultaten blijkt verder dat de energievraag voor verwarming significant beïnvloed wordt door de aanwezigheid van (slechte) bouwknopen. Aan de hand van simulaties werd de invloed van extra lineaire warmteverliezen ter hoogte van de dakrand ($\psi = 0.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, lengte = 172.2 m), betonplint - indien aanwezig⁸ - ($\psi = 0.4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, lengte = 172.2 m) en de verticale muuraansluitingen ($\psi = 0.28 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, lengte = 25.2 m) bepaald. Uit de simulatiesresultaten blijkt dat door deze bouwknopen aan te pakken het mogelijk is de energievraag voor verwarming met 20 (zie *Tabel 6* - geen WTW) tot 30% (zie *Tabel 6* - WTW) te doen dalen. Deze besparing behoort tot dezelfde grootte-orde als de energiebesparing door verlaging van de U-waarde van de schildelen. De laatste omvat daarentegen wel de isolatie van het hele verliesoppervlak.

Wat de koelvraag betreft, blijft de impact van de aanwezigheid van automatische gestuurde zonwering of zonwerende beglazing beperkt. Dit is mogelijks te wijten aan het feit dat de ramen op het Noorden georiënteerd zijn en dat de raamoppervlakten - en dus de zonwinsten - over het algemeen beperkt blijven.

Tenslotte werd de robuustheid van de resultaten bekeken. Wanneer de simulatieresultaten van de 6 cases (zie *Figuur 5*) onderling vergeleken worden, blijkt dat vergelijkbare resultaten bekomen werden. De invloed van het *gebruik* (= vergelijking commercieel tov industrieel, vrijstaand, beton) van het gebouw is beperkt. Voor industriële en commerciële gebouwen worden dezelfde meest invloedrijke parameters bekomen: n_{50} , de aanwezigheid van een warmtewisselaar (WTW) en U_{dak} . De bijhorende waarden voor de gestandaardiseerde correlatiecoëfficiënten wijken wel iets af. Zo bedraagt $SCC_{WTW} -0.65$ voor de gebouwen met een industriële functie en ± -0.56 voor de gebouwen met een commerciële functie. Verder zijn $SCC_{beglazing}$ en $SCC_{raamprofiel}$ lager in industriële gebouwen. Dit is te wijten aan het verschil in raamfractie ($WWR_{ind} = 25\%$ tov $WWR_{com} = 70\%$).

Verder worden ook gelijkaardige besluiten bekomen wanneer we de robuustheid naar **gebouwworm** evalueren (zie *Tabel 9*). Enkel de invloed van de bouwknopen en vloerisolatie wijkt iets af. Aangezien bij het bedrijfsverzamelgebouw verschillende KMO gebouwtjes aan elkaar gekoppeld worden, zijn het aantal aanwezige bouwknopen door verticale muuropbouw beperkt wat resul-

⁸Enkel bij de gebouwvarianten met wandopbouw uit staal, binnendozen en hout wordt onderaan een betonnen plint met hoogte = 1 m voorzien.

teert in een lagere waarde voor $SCC_{bouwknop,verzamel}$. De $SCC_{U_{vloer}}$ is daarentegen iets hoger voor het bedrijfsverzamelgebouw, omwille van de beperktere vloeroppervlakte, in verhouding grotere perimeter en dus hogere transmissieverliezen door heen de vloer.

Tenslotte blijkt ook de impact van de verschillende **gebouwschillen** op de resultaten van de sensitiviteitsanalyse beperkt. Er is enkel een verschil waarneembaar voor $SCC_{bouwknopen,beton}$. Omdat er voor de gebouwen met wandopbouw uit beton geen extra plint onderaan de wand - en bijgevolg ook geen bijhorende bouwknop - wordt voorzien, is de invloed van de bouwknopen op de energiebehoefte voor verwarming iets lager. Verder heeft verschil in massa vooral impact op de koelbehoefte, dewelke in massieve constructies (beton) gemiddeld 3% lager is dan in lichtere constructies (staal).

5 Besluit en aanbevelingen

Uit de sensitiviteitsanalyse zijn de meest invloedrijke parameters op de energiebehoefte in commerciële en industriële gebouwen bepaald. Hieruit kunnen enkele besluiten en aanbevelingen naar ontwerp van KMO-gebouwen worden afgeleid.

In volgorde van belangrijkheid, kwamen de luchtdichtheid van de gebouwschil, de keuze van het ventilatiesysteem (WTW of niet) en de isolatie van het dak als belangrijkste parameters naar voor. De invloed van de eerste 2 parameters wordt groter naargelang de bouwschil betere geïsoleerd is en ventilatieverliezen meer doorwegen in de totale warmteverliezen. Vanuit energetisch standpunt wordt daarom een goede uitvoering van de bouwschil, met extra aandacht voor luchtdichtheid, ten stelligste aanbevolen. Gezien de toenemende impact van de ventilatieverliezen in geïsoleerde gebouwen, moet ook de plaatsing van een warmteterugwinning worden overwogen. Echter, wanneer voor een mechanische balansventilatie (met WTW) wordt geselecteerd moet naast de energiebehoefte voor verwarming ook rekening gehouden worden met de toenemende hulpenergie voor ventilatoren, dewelke in dit onderdeel van de studie buiten beschouwing zijn gelaten (zie verder resultaten kostenoptimale studie). Verder kan ook worden besloten dat, gezien de geringe invloed van verdere verlaging van de U-waarden van de schildelen, een verder doorgedreven isolatie van opake en transparante schildelen slechts beperkte energiewinsten oplevert. Integendeel, een stijging van de koelvraag kan mogelijks optreden, zeker in geval door de aanwezigheid van vloerisolatie een deel van het (natuurlijk) koelpotentieel verloren gaat door kortsluiting van de thermische massa van het onderliggend grondmassief. Belangrijk is ook de aandacht voor bouwknopen. De extra energieverliezen die door 'slechte' bouwknopen kunnen optreden bereiken snel significante waarden. Aandacht voor de (correcte) uitvoering van wandopbouw, -aansluitingen, raamaansluitingen, etc. is daarom sterk aangewezen.

6 References

References

- [1] S. Klein, W. Beckham, and D. Mitchell, "TRNSYS 17.1: A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA,," 2010.
- [2] Meteororm, "Metetest. Meteororm versie 5.1 - Edition 2005," 2005.
- [3] B. Liu, R. E. Jarnagin, D. W. Winiarski, M. F. McBride, and G. C. Crall, "Technical Support Document : The Development of the Advanced Energy Design Guide for Small Retail Buildings," Tech. Rep. September, Pacific Northwest National Laboratory, Washington, DC, USA, 2006.

- [4] E. Bonnema, M. Leach, S. Pless, E. Bonnema, M. Leach, and S. Pless, “Technical Support Document : Development of the Advanced Energy Design Guide for Medium to Big Box Retail Buildings 50 % Energy Savings Technical Support Document : Development of the Advanced Energy Design Guide for Medium to Big Box Retail Buildings ,” Tech. Rep. June, NREL, 2013.
- [5] B. Lee, M. Trcka, and J. L. M. Hensen, “Rooftop photovoltaic (PV) systems : a costbenefit analysis study of industrial halls,” *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 9, no. March 2013, pp. 319–326, 2013.
- [6] “National Calculation Methodology (NCM) modelling guide for buildings other than dwellings in England and Wales,” Tech. Rep. January, Department for Communities and Local Government: London, London, UK, 2010.
- [7] EN 15251, *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing air quality, thermal environment, lighting and acoustics*. 2007.