

ONDERZOEK NAAR HET POTENTIEEL VAN HYBRIDE ADAPTIEVE THERMISCHE ENERGIEOPSLAGSYSTEMEN VOOR LAAG- ENERGIEWONINGEN

P. Hoes^{1,2}, M. Trcka², J.L.M. Hensen² and B. Hoekstra Bonnema³

¹Materials innovation institute (M2i), Nederland

²Technische Universiteit Eindhoven (TU/e), Nederland

³Corus Construction Centre, Nederland

SAMENVATTING

In conventionele gebouwen is de thermische massa een permanente gebouweigenschap die afhankelijk is van het gebouwontwerp. Gebouwen met een permanente thermische massa zullen echter niet onder alle omstandigheden optimaal presteren. In dit artikel wordt daarom een gebouwconcept geïntroduceerd dat de voordelen benut van zowel een thermisch licht als een thermisch zwaar gebouw. Het concept bestaat uit een lichtgewicht constructie met een hybride adaptieve thermische energieopslagcapaciteit (hybrid adaptable thermal storage, HATS). Dit zogenaamde HATS-concept verbetert de gebouwprestaties en vergroot de robuustheid voor veranderend gebruikersgedrag, seizoenswisselingen en klimaatveranderingen.

Met behulp van gebouw simulatie wordt in dit artikel het potentieel van het HATS-concept onderzocht en gekwantificeerd. Simulaties van een casestudy in Nederland laten zien dat de optimale hoeveelheid thermisch massa afhankelijk is van het gebruikersgedrag en seizoenswisselingen. Dit impliceert dat de gebouwprestaties van de casestudy zullen verbeteren door gebruik te maken van het HATS-concept. Verder is het potentieel gekwantificeerd met behulp van een vereenvoudigd HATS-model. Berekningen van de casestudy met het HATS-model laten zien dat de warmtevraag met 35% afneemt, terwijl het thermisch comfort sterk verbetert vergeleken met de casestudy die gebruik maakt van een permanente thermische massa.

INLEIDING

Nationaal en internationaal beleid eist een verlaging van de energievraag in de gebouwde omgeving. Nederlandse huishoudens gebruiken 20% van het totale landelijke energiegebruik [1]; hiervan wordt 65% gebruikt voor ruimteverwarming en warm tapwater [2]. Deze cijfers laten zien dat een verlaging van het energiegebruik voor verwarming in woningen een grote invloed zal hebben op het totale energiegebruik. Een verlaging van het energiegebruik zal echter samen moeten gaan met handhaving of, beter nog, een verbetering van het bestaande thermische comfort. Deze doelstellingen kunnen alleen worden gerealiseerd door het toepassen van nieuwe gebouwconcepten (een samenspel van gebouwvorm, bouwmethode, installatie en regelsysteem).

Naast de genoemde energie- en comforteisen wordt de vraag naar nieuwe gebouwconcepten ook door andere factoren gestimuleerd. Een belangrijke factor is bijvoorbeeld de behoefte om de milieubelasting van gebouwen te verlagen door het terugdringen van het materiaalgebruik. Dit leidt namelijk tot een vermindering van bouwafval (nu wordt een derde van de totale Nederlandse afvalberg toegeschreven aan de bouw), een vermindering van grondstofwinning, een verlaging van de energiebehoefte voor de productie van bouwmaterialen en lichter transport [3]. Het materiaalgebruik kan worden teruggedrongen door gebruik te maken van (nieuwe) gebouwconcepten met lichtgewicht bouwconstructies. Een andere factor die het gebruik van dit soort lichtgewicht bouwconstructies stimuleert, is de hoge prijs voor bouwgrond in Nederland. Hierdoor neemt de vraag naar lichtgewicht bouwconstructies voor bijvoorbeeld top-up renovaties van bestaande gebouwen toe. Staalskeletbouw is erg geschikt om toe te passen als lichtgewicht constructie. Bovendien zijn de bouwkosten voor staalskeletbouw lager en is de bouwtijd korter vergeleken met de in Nederland conventionele bouwmethoden die gebruik maken van baksteen of beton. Over het algemeen leiden lichtgewicht constructies (zoals staalskeletbouw en houtskeletbouw) echter tot gebouwen met een lage thermische massa, waardoor de kans op comfortproblemen (oververhitting) toeneemt.

In dit artikel wordt het potentieel van een nieuw lichtgewicht gebouwconcept gepresenteerd. Dit concept verlaagt de warmtevraag en verhoogt tegelijkertijd het thermische comfort. Verder vergroot het concept de robuustheid voor veranderend gebruikersgedrag (bijvoorbeeld door veranderingen in aanwezigheidspatronen), seizoenswisselingen en klimaatveranderingen.

Dit artikel beschrijft enkele resultaten van een lopend promotieonderzoek gefinancierd door het Materials innovation institute (M2i).

THERMISCHE MASSA

De thermische massa geeft aan in welke mate een materiaal energie kan opslaan en afgeven. Materialen met een hoge specifieke warmtecapaciteit, een gemiddelde warmtegeleiding en een hoge infrarood emissiecoëfficiënt hebben een geschikte thermische massa om te gebruiken in gebouwen [4]. Om effectief gebruik te kunnen maken van de thermische massa moet de massa (thermisch) gekoppeld zijn aan de ruimtes in het gebouw. De massa moet bijvoorbeeld niet bedekt worden met warmte-isolerende materialen. Over het algemeen zorgen betonnen gebouwconstructies (muren, vloeren) voor zware gebouwen met een hoge thermische massa.

In Nederland wordt door gebouwonwerpers veelal gedacht dat gebouwen met een hoge thermische massa altijd leiden tot een lager energiegebruik en een hoger thermisch comfort dan gebouwen met een lage thermische massa. Enkele studies laten dit soort resultaten inderdaad zien [3, 4, 5], andere studies laten echter zien dat de positieve invloed van de thermische massa niet moet worden overschat [7]. Onder bepaalde omstandigheden kan de traagheid van de thermische massa er bijvoorbeeld voor zorgen dat een snel reagerend gebouw met een lage thermische massa energie-efficiënter is dan een traag reagerend gebouw met een hoge thermische massa.

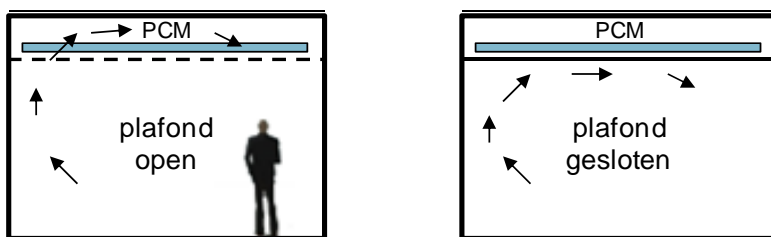
In conventionele gebouwen is de thermische massa een permanente gebouweigenschap die afhankelijk is van het gebouwonwerp. Zoals hierboven beschreven zullen gebouwen met een permanente thermische massa echter niet onder alle omstandigheden optimaal kunnen presteren. In dit artikel wordt daarom een gebouwconcept geïntroduceerd dat de voordelen benut van zowel een thermisch licht als een thermisch zwaar gebouw. Het concept bestaat uit een lichtgewicht (staalskeletbouw) gebouw met een adaptieve thermische energieopslagcapaciteit. Dit nieuwe gebouwconcept wordt beschreven in de volgende paragraaf.

HYBRIDE ADAPTIEVE THERMISCHE ENERGIEOPSLAGSYSTEMEN (HATS)

Met behulp van thermische energieopslag(TES)-systemen en TES-materialen is het mogelijk om de thermische energieopslagcapaciteit van een gebouw te vergroten. In de literatuur worden verschillende TES-systemen beschreven [8]. De TES-systemen kunnen worden ingedeeld naar korte termijn opslag (uur, dag) en lange termijn opslag (seizoen, jaar). Verder kunnen de systemen worden gecategoriseerd naar de volgende drie groepen:

- Voelbare energieopslag, energie wordt opgeslagen of onttrokken aan een medium met een continue temperatuurverandering in de tijd (bijvoorbeeld energieopslag in water of beton);
- Latente energieopslag, energie wordt opgeslagen in een medium door middel van een faseverandering van het medium (energieopslag in zogenaamde Phase Change Materials (PCM's) zoals paraffine of zouthydraten);
- Thermochemische energieopslag, energie wordt opgeslagen in thermochemische reacties.

Twee of meerdere TES-systemen kunnen worden gecombineerd tot een hybride thermisch energieopslagsysteem, bijvoorbeeld PCM's in lichtgewicht betonnen wanden: latente energieopslag in combinatie met voelbare energieopslag. Vanuit thermisch perspectief gedraagt een lichtgewicht gebouw met een extra thermische opslagcapaciteit zich hetzelfde als een zwaargewicht gebouw. Om gebruik te kunnen maken van zowel de voordelen van een lage als van een hoge thermische massa, moet de opslagcapaciteit adaptief zijn in de tijd. Dergelijke systemen noemen wij hybride adaptieve thermische energieopslagsystemen (HATS). Een voorbeeld van een HATS-concept is een ruimte met PCM's, waarvan de PCM's op ieder gewenst moment kunnen worden geïsoleerd van de ruimte. Dit zou bijvoorbeeld kunnen door de PCM's te plaatsen boven een verlaagd plafond dat (thermisch) geopend en gesloten kan worden (zie afbeelding 1). Een HATS-concept kan bijvoorbeeld ook bestaan uit zogenaamde thermisch actieve bouwdeel systemen (TABS).



Afbeelding 1: Voorbeeld van een HATS-concept dat gebruik maakt van het isoleren van PCM's.

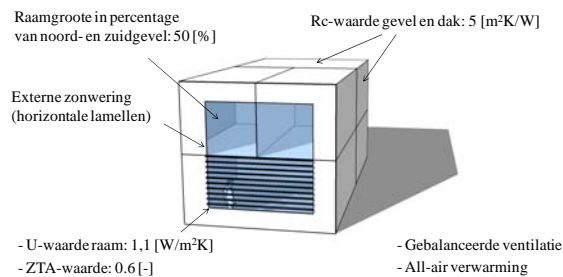
CASESTUDY

In samenwerking met het Corus Construction Centre is een casestudy gedefinieerd van een woning. Deze casestudy is gebruikt om het potentieel van HATS (verlagen warmtevraag en verhogen comfort) te onderzoeken. De casestudy is gebaseerd op de woningen van het Zonne-entree project in Apeldoorn [9]. De woning is gesimuleerd met behulp van het gebouwssimulatieprogramma ESP-r [10]. De woning bestaat uit vijf ruimtes: zone A (zuid georiënteerd) en B (noord georiënteerd) op de begane grond en zone C en D (zuid georiënteerd) en E (noord georiënteerd) op de eerste verdieping (zie afbeelding 2). In deze casestudy wordt de woning verwarmd door middel van een all-air systeem. De luchttemperatuur wordt geregeld op 21°C wanneer de ruimtes worden gebruikt en 14°C wanneer de ruimtes niet worden gebruikt; meer details worden gegeven in tabel 1 en afbeelding 2. De zuidgevel is voorzien van buitenzonwering (horizontale lamellen). Tijdens de wintermaanden is de zonwering opgetrokken om optimaal gebruik te kunnen maken van de zon. Tijdens de zomer wordt de zonwering neergelaten met de lamellen onder een hoek van 0 graden (horizontaal). Bij een irradiantie hoger dan 300 W/m² worden de lamellen gedraaid naar 80 graden. Twee gebruikersprofielen zijn gedefinieerd:

- Aanwezigheidsprofiel 'avond': bewoners zijn aanwezig van 18 uur tot 24 uur;
- Aanwezigheidsprofiel 'dag & avond': bewoners zijn aanwezig van 8 uur tot 24 uur;

Prestatie-indicatoren

De bouwprestatie is beoordeeld aan de hand van twee prestatie-indicatoren: de warmtevraag en de gewogen temperatuur onder- en overschrijdingsuren (GTO-uren). De warmtevraag is berekend in kWh/m² per jaar. De onder- en overschrijdingsuren zijn gewogen door middel van een functie die afhankelijk is van de PPD [11] en zijn vervolgens gesommeerd voor het hele jaar.



Afbeelding 2: Case study gebaseerd op de woningen van Zonne-entree Apeldoorn, aanzicht op de zuidgevel.

Tabel 1: Inputparameters van de casestudy Zonne-entree Apeldoorn.

Inputparameters	Waarde	Eenheid
1 Aanwezigheid	avond	[-]
2 Interne warmtelasten	4,0	[W/m ²]
3 Glas type (U-waarde)	1,3	[W/m ² K]
4 Raam grootte	50	[%]
5 Warmteweerstand gevel	5	[m ² K/W]
6 Infiltratie ($q_{infiltratie;qv10;spec}$)	0,08	[dm ³ /s p.m ²]
7 Temperatuur aanwezigheid	21	[°C]
8 Temperatuur afwezigheid	14	[°C]
9 Ventilatie	1,0	[dm ³ /s p.m ²]

ONDERZOEK NAAR HET POTENTIEEL VAN HATS

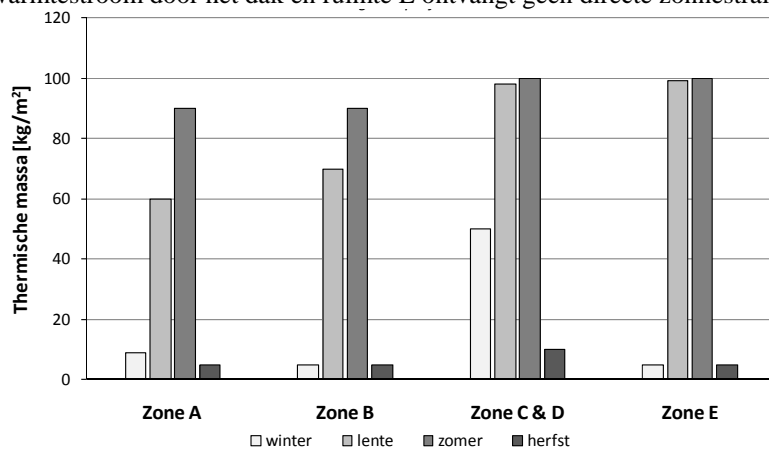
De potentiële meerwaarde van HATS voor de casestudy is onderzocht door de optimale hoeveelheid thermische massa van de casestudy te onderzoeken. De optimale hoeveelheid thermische massa is gedefinieerd als de hoeveelheid (permanente) thermische massa die de beste bouwprestaties levert (gebaseerd op een trade-off tussen beide prestatie-indicatoren). De gevoeligheid van de optimale hoeveelheid thermische massa (in het vervolg van dit artikel: 'de optimale massa') voor bijvoorbeeld seizoenswisselingen impliceert dat de bouwprestatie zal profiteren van de implementatie van HATS.

De optimale massa is onderzocht met behulp van het Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) [12]. Dit is een bekend en veel gebruikt optimalisatie algoritme, dat al eerder is gebruikt in bouwprestatiesimulatie [11, 12]. Het optimalisatie algoritme verandert de thermische massa van het gebouw door de dichtheid van de materialen te variëren die thermisch gekoppeld zijn met het binnenklimaat. De benodigde dichtheid is berekend aan de hand van de specifiek werkzame massa (SWM). De SWM is een vereenvoudigde methode om de thermische massa te kwantificeren. De SWM is gedefinieerd als het quotiënt van de massa van de thermisch actieve lagen van alle oppervlakken in een ruimte en de som van alle oppervlakken in de ruimte. Een lage thermische massa is bijvoorbeeld een SWM van 5 kg/m² (lichtgewicht vloeren en muren), een gemiddelde thermische massa is een SWM van 50 kg/m² (betonnen vloeren en lichtgewicht wanden) en een hoge thermische massa is een SWM van 100 kg/m² (zwaar betonnen vloeren en muren).

De optimale massa is berekend per oriëntatie en per vloerniveau (m.a.w. voor ruimte 'A', 'B', 'C en D' en 'E') voor elke seizoen met het aanwezigheidsprofiel 'avond'. De thermische massa van de ruimtes is gevarieerd van 5 kg/m² tot 100 kg/m². De ruimtes zijn onderling thermisch ontkoppeld door middel van een laag isolatiemateriaal in de ruimte scheidende wanden.

Resultaten optimalisatie thermische massa

Afbeelding 3 laat de optimale thermische massa zien per ruimte en per seizoen. Om oververhitting te voorkomen in de lente en in de zomer vragen de ruimtes op de eerste verdieping (C, D en E) om een hogere thermische massa dan de ruimtes op de begane grond (A en B). In de winter is dit alleen het geval voor ruimtes C en D. Dit wordt veroorzaakt doordat de buitenzonwering niet wordt gebruikt in de winter, waardoor directe zonnestraling de ruimte binnenkomt. Samen met de warmtestroom door het (platte) dak zorgt dit bij een lage thermische massa voor oververhitting. De relatief lage thermische massa's voor de ruimtes A en E vergeleken met de ruimtes C en D worden veroorzaakt door zowel verschillen in het vloerniveau als in de oriëntatie: ruimte A heeft geen warmtestroom door het dak en ruimte E ontvangt geen directe zonnestraling.



Afbeelding 3: Gesimuleerde optimale thermische massa voor de casestudy met aanwezigheidsprofiel 'avond'.

Gevoeligheid van de optimale thermische massa voor seizoenswisselingen

De invloed van seizoenswisselingen op de optimale thermische massa is weergegeven in afbeelding 3. Een lage thermische massa is vereist in de winter en een hoge thermische massa in de zomer. De invloed kan worden gekwantificeerd met behulp van de gemiddelde relatieve verandering (GRV) van de optimale massa gedurende de seizoenen (een relatieve verandering ten opzichte van de gemiddelde waarde van de thermische massa van de specifieke ruimte). Een hoge GRV betekent een sterke gevoeligheid van de optimale massa voor de seizoenswisselingen. De ruimtes in deze casestudy laten hoge GRV's zien: voor ruimtes A, B, C, D en E respectievelijk 83%, 88%, 54%, 54% en 90%.

Deze resultaten laten zien dat de optimale massa gevoelig is voor seizoenswisselingen. Dit impliceert dat het toepassen van een adaptieve thermische massa of een adaptieve thermische energieopslagcapaciteit potentie heeft om de warmtevraag te verlagen en het aantal GTO-uren te verkleinen. In [11] is de optimalisatie van de thermische massa in meer detail beschreven. Uit [11] volgt dat de optimale massa ook gevoelig is voor veranderingen in de gebruikersprofielen.

KWANTIFICEREN VAN HET POTENTIEEL VAN HATS

Het potentieel van HATS voor deze casestudy is gekwantificeerd door middel van een vereenvoudigd HATS-model. In het HATS-model wordt aangenomen dat het mogelijk is om dagelijks een 'ideale' wisseling te hebben tussen een lage thermische massa en een hoge thermische massa. Hiertoe zijn twee simulaties uitgevoerd; een simulatie met een SWM van 5 kg/m² (lichtgewicht) en een simulatie met een SWM van 100 kg/m² (zwaargewicht). Het HATS-model selecteert de beste thermische massa per ruimte gebaseerd op de laagste warmtevraag of het hoogste comfort. Op deze manier neemt het model aan dat er een ideaal geregelde adaptieve thermische massa bestaat. Met andere woorden, er is geen vertraging in de systeemrespons en er worden geen effecten meegenomen van het op- en ontladen van de thermische massa wanneer deze is geïsoleerd van de ruimte. In werkelijkheid zal de invloed van deze effecten afhankelijk zijn van het gekozen HATS-concept en de gekozen regelstrategie.

De berekeningen zijn uitgevoerd met een autonome adaptieve thermische massa per ruimte. Eerst bespreken we de resultaten van ruimtes B en C; vervolgens bespreken we de gesommeerde resultaten van alle ruimtes in het gebouw.

Warmtevraag en comfort van ruimtes B en C

Tabel 2 toont de warmtevraag voor ruimtes B en C per aanwezigheidsprofiel (de warmtevraag vergeleken met het vereenvoudigde HATS-model is weergegeven tussen de haakjes). In sommige gevallen zijn de verschillen tussen het vereenvoudigde HATS-model en de conventionele permanente thermische massa erg klein. Bijvoorbeeld in ruimte B met aanwezigheidsprofiel ‘avond’ is het verschil met de lage thermische massa slechts 1%. In andere gevallen zijn de verschillen groter. Bijvoorbeeld in ruimte B met aanwezigheidsprofiel ‘avond’ is het verschil met de hoge thermische massa 30% (vanaf hier wordt alleen nog de naam van de ruimte genoemd met het aanwezigheidsprofiel, bijvoorbeeld ruimte B ‘avond’). Een laag percentage betekent dat het vereenvoudigde HATS-model niet vaak heeft gewisseld tussen de twee thermische massa’s. In het geval van ruimte B ‘avond’ betekent dit dat gedurende het stookseizoen de lage thermische massa voor het merendeel van de gesimuleerde dagen het meest energie-efficiënt is; de adaptieve thermische massa is niet gebruikt om de warmtevraag te verlagen. In het geval van ruimte C ‘dag & avond’ is de hoge thermische massa gedurende het stookseizoen het meest energie-efficiënt. Ruimte C ‘avond’ en ruimte B ‘dag & avond’ gebruiken gedurende het stookseizoen beide de mogelijkheden van de adaptieve thermische massa om de warmtevraag te verlagen, respectievelijk met 17% en 8% vergeleken met lage thermische massa en 23% en 8% vergeleken met hoge thermische massa.

Tabel 3 laat de gewogen over- en onderschrijdingsuren (GTO-uren) zien van ruimtes B en C. Voor deze ruimtes zal de hoge thermische massa altijd resulteren in het kleinste aantal GTO-uren: 0% verschil met het vereenvoudigde HATS-model. Met andere woorden, voor deze ruimtes zal het thermisch comfort niet verbeteren door te adapteren naar de lage thermische massa.

Tabel 2: Warmtevraag van ruimtes B en C [kWh/m² per jaar] per aanwezigheidsprofiel.

	Lage thermische massa (5 kg/m ²)	Hoge thermische massa (100 kg/m ²)	Vereenvoudigde HATS-model
<i>avond:</i>			
ruimte B	17.5 (+1%)	22.4 (+30%)	17.3
ruimte C	13.2 (+14%)	14.2 (+23%)	11.6
<i>dag & avond:</i>			
ruimte B	27.2 (+8%)	27.2 (+8%)	25.1
ruimte C	19.9 (+57%)	13.0 (+3%)	12.6

Tabel 3: Aantal GTO-uren van ruimtes B en C [uren per jaar] per aanwezigheidsprofiel.

	Lage thermische massa (5 kg/m ²)	Hoge thermische massa (100 kg/m ²)	Vereenvoudigde HATS-model
<i>avond:</i>			
ruimte B	165 (+14510%)	1(+0%)	1
ruimte C	101 (-)	0(+0%)	0
<i>dag & avond:</i>			
ruimte B	327 (+6111%)	5(+0%)	5
ruimte C	737 (+1053%)	64(+0%)	64

Het werkelijke potentieel van HATS kan worden bestudeerd door de resultaten van de warmtevraag (tabel 2) en de GTO-uren (tabel 3) te combineren. In het Nederlandse klimaat wordt het grootste gedeelte van de warmtevraag gevraagd in de winter en vallen de meeste GTO-uren in de zomer. Hierdoor zal het potentieel voor HATS hoog zijn wanneer een andere thermische massa wordt gebruikt om de energievraag te verlagen dan om het aantal GTO-uren te verkleinen (dit betekent immers dat er gedurende het jaar gewisseld wordt van thermische massa). Verder zal het potentieel voor HATS ook hoog zijn wanneer de adaptieve thermische massa wordt gebruikt om de waarde van minimaal één van de twee prestatie-indicatoren te verbeteren.

De simulatieresultaten laten zien dat ruimte B ‘avond’ naar de lage thermische massa wisselt om de warmtevraag te verlagen en dat deze ruimte naar de hoge thermische massa wisselt om het aantal GTO-uren te verkleinen: de gebouwprestatie is verbeterd door gebruik te maken van HATS. Ruimte C ‘avond’ en ruimte B ‘dag & avond’ gebruiken HATS om de warmtevraag te verlagen, terwijl het aantal GTO-uren wordt verkleind door te wisselen naar de hoge thermische massa: de gebouwprestatie is verbeterd door gebruik te maken van HATS. Ruimte C ‘dag & avond’ gebruikt de hoge thermische massa gedurende de meeste gesimuleerde dagen om de warmtevraag te verlagen en om het aantal GTO-uren te verkleinen: de gebouwprestaties is niet significant verbeterd door het gebruik van HATS. Uit deze resultaten kan worden geconcludeerd dat het potentieel voor HATS hoger is voor het aanwezigheidsprofiel ‘avond’ dan voor het aanwezigheidsprofiel ‘dag & avond’.

Warmtevraag en comfort van het hele gebouw

De warmtevraag en het aantal GTO-uren per ruimte zijn gesommeerd om de gebouwprestatie van het hele gebouw te kunnen analyseren. De resultaten laten zien dat het vereenvoudigde HATS-model de warmtevraag van het hele gebouw verlaagd met 6% tot 27% vergeleken met respectievelijk de lage en hoge thermische massa. Tegelijkertijd wordt het comfortniveau van de hoge thermische massa gehandhaafd (tabel 4 en 5). De resultaten laten zien dat in het bijzonder de casestudy met het aanwezigheidsprofiel ‘avond’ profiteert van HATS.

De resultaten van de vorige paragrafen tonen aan dat het aanwezigheidsprofiel een grote invloed heeft op het potentieel van HATS. De invloed van andere parameters wordt onderzocht in de volgende paragraaf.

Tabel 4: Warmtevraag voor het hele gebouw [kWh/m^2 per jaar].

	Lage thermische massa (5 kg/m^2)	Hoge thermische massa (100 kg/m^2)	Vereenvoudigde HATS-model
avond	15.9 (+7%)	18.5 (+25%)	14.8
dag & avond	25.0 (+27%)	20.9 (+6%)	19.7

Tabel 5: Aantal GTO-uren voor het hele gebouw [uren per jaar].

	Lage thermische massa (5 kg/m^2)	Hoge thermische massa (100 kg/m^2)	Vereenvoudigde HATS-model
avond	699(+10325%)	7(+0%)	7
dag & avond	2850(+1358%)	196(+0%)	196

ONDERZOEK NAAR HET POTENTIEEL VAN HATS MET EEN GEVOELIGHEIDSANALYSE

In de vorige paragraaf hebben we het potentieel van HATS gekwantificeerd voor de casestudy, zoals het gebouw is ontworpen door de architect. In deze paragraaf onderzoeken we of het mogelijk is om het potentieel te vergroten door het originele ontwerp aan te passen. Als eerste definiëren we de parameters die het potentieel van HATS beïnvloeden. Deze invloedrijke parameters worden bepaald door het toepassen van een gevoeligheidsanalyse op het vereenvoudigde HATS-model. Als methode voor de gevoeligheidsanalyse wordt een Monte Carlo analyse met regressieanalyse (MCA) gebruikt [15]. De invloedrijke parameters worden gebruikt om (realistische) varianten van de casestudy (basis case) te maken. Vervolgens is het gekwantificeerde potentieel per variant berekend met het vereenvoudigde HATS-model. Tenslotte zijn de resultaten geanalyseerd en is het maximale potentieel bepaald.

Inputparameters

De waarden van de inputparameters voor de gevoeligheidsanalyse zijn gebaseerd op waarden gebruikt in de praktijk (zie tabel 6). De ‘basiswaarden’ zijn gebaseerd op het ontwerp van het Zonne-entree project (tabel 1). De minimale eisen uit de tabel zijn gebaseerd op de eisen uit het Bouwbesluit. De strenge eisen zijn gebaseerd op de waarden die gebruikt worden voor Passief Huizen. In de Monte Carlo analyse is het ‘avond’-aanwezigheidsprofiel gebruikt (dit profiel liet in de vorige paragraaf het hoogste potentieel zien).

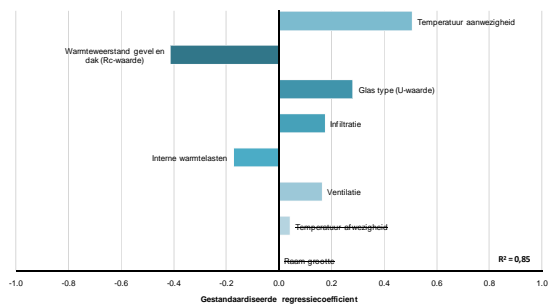
Tabel 6: Inputparameters voor de gevoeligheidsanalyse.

Inputparameters	Inputwaarde			Eenheid
	Basis	1	2	
Interne warmtelasten	4,0	2,0	6,0	$[\text{W/m}^2]$
Glastype (U-waarde)	1,3	0,7	2,7	$[\text{W/m}^2\text{K}]$
Raamgrootte	50	25	90	$[\%]$
Warmteweerstand gevel	5	3	8	$[\text{m}^2\text{K/W}]$
Infiltratie ($q_{\text{infiltratie};qv10;\text{spec}}$)	0,08	0,03	0,12	$[\text{dm}^3/\text{s p.m}^2]$
Temperatuur aanwezigheid	21	20	22	$[\text{°C}]$
Temperatuur afwezigheid	14	13	15	$[\text{°C}]$
Ventilatie	1,0	0,8	1,2	$[\text{dm}^3/\text{s p.m}^2]$

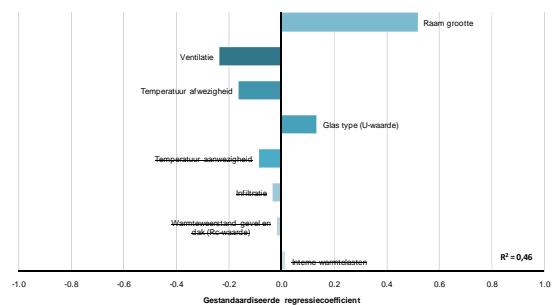
Resultaten gevoeligheidsanalyse

De invloed van de parameters op de prestatie-indicatoren is geanalyseerd voor het gehele gebouw (de gesommeerde waarden). In afbeelding 4 en 5 zijn de resultaten van de MCA weergegeven voor de twee prestatie-indicatoren. De parameters die in de regressieanalyse niet significant blijken ($p > 0,05$), zijn doorgestreept in de grafieken. De parameters zijn gesorteerd van grote invloed (hoge waarden van de gestandaardiseerde regressiecoëfficiënt, SRC) naar kleine invloed.

De parameters ‘temperatuur aanwezigheid’ en ‘warmteweerstand gevel en dak’ zijn door de gevoeligheidsanalyse geïdentificeerd als de twee meest invloedrijke parameters voor de warmtevraag (met een SRC van 0,51 and 0,41). ‘Raamgrootte’ en ‘ventilatie’ zijn aangewezen als de meest invloedrijke parameters voor het aantal GTO-uren (met een SRC van 0,52 en 0,24).



Afbeelding 4: Resultaten van de gevoeligheidsanalyse (MCA) met het vereenvoudigde HATS-model voor de warmtevraag van het hele gebouw.



Afbeelding 5: Resultaten van de gevoeligheidsanalyse (MCA) met het vereenvoudigde HATS-model voor het aantal GTO-uren van het hele gebouw.

Deze vier meest invloedrijke parameters zijn gebruikt om verschillende casestudy varianten te definiëren. De niet invloedrijke parameters zijn gefixeerd op de basiswaarden; de invloedrijke parameters zijn gevarieerd tussen 'waarde 1' en 'waarde 2' van tabel 6. Met behulp van de varianten kunnen de elementaire effecten en de interactie van de invloedrijke parameters op de prestatie van HATS worden onderzocht.

Resultaten van varianten met hoog potentieel

Om zeker te zijn van een comfortabel binnenklimaat worden alleen de varianten beschouwd met een aantal GTO-uren lager dan 200 per jaar. In tabel 7 en 8 zijn voor beide prestatie-indicatoren de resultaten te zien voor de varianten met de grootste verbetering door toepassing van HATS. Variant 1 bestaat uit een gebouw met een raamgrootte van 90% (waarde 2), een warmteweerstand van gevel en dak van 3 m²K/W (waarde 1), een setpoint voor verwarming van 20°C (waarde 1), een ventilatiehoeveelheid van 1,2 dm/s per m² (waarde 2) en met de overige parameters op de basiswaarden. Variant 2 is hetzelfde als variant 1 met uitzondering van de warmteweerstand, deze is 8 m²K/W (waarde 2). De resultaten tonen een maximale verlaging van de warmtevraag van 35% en een maximale vermindering van het aantal GTO-uren van 1295% (variant 1).

Tabel 7: Warmtevraag voor het hele gebouw [kWh/m² per jaar]; tussen de haakjes is het verschil met het vereenvoudigde HATS-model weergegeven.

	Lage thermische massa (5 kg/m ²)	Hoge thermische massa (100 kg/m ²)	Vereenvoudigde HATS-model
1	14.1 (+9%)	17.4 (+35%)	12.9
2	8.5 (+15%)	9.7 (+31%)	7.4

Tabel 8: Het aantal GTO-uren voor het hele gebouw [uren per jaar]; tussen de haakjes is het verschil met het vereenvoudigde HATS-model weergegeven.

	Lage thermische massa (5 kg/m ²)	Hoge thermische massa (100 kg/m ²)	Vereenvoudigde HATS-model
1	2059(+1295%)	149(+1%)	148
2	1844(+1076%)	157(+0%)	157

CONCLUSIE

De resultaten van de optimalisatie van de thermische massa laten zien dat de optimale hoeveelheid thermische massa gevoelig is voor seizoenswisselingen. Dit impliceert dat het toepassen van HATS potentie heeft om de warmtevraag van de casestudy te verlagen en het aantal GTO-uren te verkleinen.

De resultaten van berekeningen met een vereenvoudigd HATS-model laten zien dat het voor deze casestudy mogelijk is om de warmtevraag maximaal met 35% te verlagen, vergeleken met een gebouwconcept met een conventionele permanente thermische massa. Verder is het HATS-concept in staat om het aantal GTO-uren te verminderen met maximaal 1295% vergeleken met een conventioneel gebouw met lage thermische massa.

In het verdere verloop van dit project zullen verschillende HATS-concepten worden gedefinieerd en gemodelleerd. De prestaties van deze concepten zullen sterk afhankelijk zijn van de toegepaste regelsystemen. Om de HATS-concepten optimaal te laten presteren zullen daarom nieuwe regelmethoden moeten worden ontwikkeld. Deze methoden zullen worden gebaseerd op Model Predictive Control (MPC) regelsystemen, waarin de prestaties van het systeem worden geoptimaliseerd door gebruik te maken van een verschuivende tijdshorizon.

VERANTWOORDING

Dit onderzoek is uitgevoerd onder projectnummer M81.1.08319 in het kader van het onderzoeksprogramma van het Materials innovation institute M2i (www.m2i.nl).

LITERATUUR

- [1] Eurostat (2007) – *Panorama of Energy* – ISBN 92-79-03894-X.
- [2] Opstelten, I., Bakker, E., Kester, J., Borsboom, W., Elkhuizen, B. (2007) – *Bringing an energy neutral built environment in the Netherlands under control* – Proceedings of Clima 2007 WellBeing Indoors.
- [3] Lichtenberg, J.J.N. (2009) – *Nieuwe benadering van bouwen: duurzaam en economisch tegelijk* – Facility Management Magazine, vol. 173, pp. 29-33.
- [4] Walsh R., Kenny, P., Brophy, V. (2006) – *Thermal mass & sustainable building* – Irish concrete federation, UCD Energy Research Group, University College Dublin.
- [5] Balaras, C.A. (1995) – *The role of thermal mass on the cooling load of buildings* – Energy and Buildings, vol. 24, pp. 1-10.
- [6] Kosny, J., Petrie, T., Gawin, D., Childs, P., Desjarlais, A., Christian, J. (2001) – *Thermal storage - Energy savings potential in residential buildings* – Buildings Technology Center, ORNL.
- [7] Vaan de, C.F.M., Wiedenhoff, F.J.M., Hensen, J.L.M. (2009) - *Massa is genuanceerde ballast* - Bouwen met Staal, Vol. 42, No. 211, p. 42-46.
- [8] Dincer, I. (2002) – *On thermal energy storage systems and applications in buildings* – Energy and Buildings, vol. 34, pp. 377-388.
- [9] Website (08-2010) www.courage.nl/nl/projecten/wonen/cpog_zonne_entree/
- [10] Clarke, J.A. (2001) – *Energy simulation in building design* – second edition, Oxford, Butterworth-Heinemann.
- [11] Hoes, P., Trcka, M., Hensen, J.L.M., B. Hoekstra Bonnema (2010) – *Exploring the optimal thermal mass to investigate the potential of a novel low-energy house concept* – Proceedings 10th International Conference for Enhanced Building Operations.
- [12] Deb, K., Meyarivan, T., Pratap, A., Agarwal, S. (2002) - *A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II* - IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 6, no. 2, pp. 182-197.
- [13] Emmerich, M.T.M., Hopfe, C., Marijt, R., Hensen, J.L.M., Struck, C., Stoelinga, P.A.L. (2008) – *Evaluating optimization methodologies for future integration in building performance tools* - Proceedings of the 8th Int. Conf. on Adaptive Computing in Design and Manufacture.
- [14] Hopfe, C.J. (2009) – *Uncertainty and sensitivity analysis in building performance simulation for decision support and design optimization* – PhD thesis University of Technology Eindhoven.
- [15] Saltelli A., Tarantola S., Campolongo F., Ratto M. (2004) – *Sensitivity Analysis in Practice* – John Wiley & Sons.