



OPENBARE RAPPORTAGE

IEBB- INTEGRALE ENERGIETRANSITIE BESTAANDE BOUW

Eindrapport deelproject 4.1 Digitalisering
bouwproces, PPS activiteit 7

Koppeling gebruikersgedrag aan gebouwmodel

Referentie: TEUE919003
Subsidieregeling: Meerjarig Missiegedreven Innovatie Programma

Datum: 7 juli 2025
Aantal pagina's: 22 (inclusief bijlagen)

Auteur: F.G.H. Koene
Rapportnummer: TNO 2025 R11086

Samenvatting

Introductie

Gebruikersgedrag bepaalt voor een groot deel de energievraag van woningen. Zo kan het energiegebruik van min of meer identieke woningen met verschillende bewoners een factor vier van elkaar verschillen. Dat speelt bij de warmtevraag van een woning (voor ruimteverwarming in het stookseizoen en warm tapwaterbereiding), maar in nog sterkere mate voor de koelvraag van woningen.

Er is steeds meer behoefte aan een inschatting van de koelvraag van een woning of van meerdere woningen, bijvoorbeeld in een buurt. Is die overal in Nederland hetzelfde? En hoe ontwikkelt die koelvraag zich in de toekomst? Wat is het effect van de toenemende koelvraag op de energievraag en netcongestie?

Doelstelling

De onderzoeksvraag luidt:

Hoe modelleren we het relevante gebruikersgedrag bij koeling, zoals raamgebruik, gebruik van zonwering, gebruik van airconditioning units, zoals temperatuursetpoint?

Aanpak

1. Literatuuronderzoek naar gebruikersgedrag bij koeling.
2. Kwantificeren van bovenstaand gebruikersgedrag in een aantal regels.
3. Opname van de regels in een dynamisch gebouwmodel.
4. Validatie van de met de modellen berekende koelvraag aan de hand van metingen bij acht goed geïsoleerde woningen in Dijk en Waard.

Resultaten en conclusies

Op basis van literatuuronderzoek is inzicht verkregen in het gebruikersgedrag bij koeling, in het bijzonder ten aanzien van het openen van ramen en zonwering, en het gebruik van een eventueel aanwezige airconditioning unit, zoals temperatuursetpoint en duur van gebruik.

De gedragingen zijn gekwantificeerd en in een aantal simpele regels gecodeerd voor gebruik in een eenvoudig dynamisch gebouwmodel.

De berekende koelvraag is gevalideerd aan de hand van metingen bij acht goed geïsoleerde woningen in Dijk en Waard. Hierbij zijn twee varianten van het gebouwmodel gebruikt, een basismodel en een variant waarbij de vloer met vloerverwarming als een aparte set van twee thermische massa's is gemodelleerd.

Beide modellen berekenen vrijwel dezelfde warmtevraag en koelvraag. Verder blijkt de spreiding in koelvraag groter dan die in de warmtevraag, waarschijnlijk door de onzekerheid in een groter aantal gebruikersgedragingen. Met name de berekende koelvraag kan een factor 2.5 verschillen van de gemeten waarde. Echter, voor alle woningen tezamen is de afwijking ca. 20%.

Het basis model voldoet als het enkel om de jaarlijkse warmte- of koelvraag gaat. Voor het goed beschrijven van het dynamisch thermisch gedrag van de woning, van belang bijvoorbeeld voor het optimaliseren van het energiegebruik en comfort presteert het model dat is uitgebreid met vloerverwarming beter.

Bijdrage MMIP doelstellingen

De renovatie-opgave is groot om in 2050 een energie-neutrale gebouwde omgeving te realiseren. Grootschalig toe te passen tools die zoveel mogelijk automatisch de benodigde bouwkundige gegevens van woningen ophalen is daarbij een noodzakelijk onderdeel van integrale pakketten om tot de gewenste schaalgrootte van woningverduurzaming te komen.

programma Integrale Energietransitie Bestaande Bouw

Openbare eindrapportage deelproject 4.1 Digitalisering bouwproces, PPS activiteit 7
Koppeling gebruikersgedrag aan gebouwmodel

Koeling van de woningen speelt een steeds grotere rol in de energievraag. De verwachting is dat het elektriciteitsgebruik van airconditioners toeneemt van een geschatte 1,6PJ in 2022 naar 4PJ in 2030 [1]. Het kwantificeren van de energievraag voor koeling, met name de uurlijkse energievraag van meerdere woningen in een buurt geeft inzicht in mogelijke problemen met netcongestie.

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	2
1 Programma IEBB	5
1.1 Inbedding in programma IEBB	5
1.2 Belang deelproject	5
1.2.1 Bijdrage aan de MMIP 3 en MMIP 4 doelen	5
1.2.2 Opbrengsten deelproject.....	5
2 Project gegevens.....	6
3 Inhoudelijk eindrapport	7
3.1 Inleiding.....	7
3.2 Doelstelling.....	7
3.3 Werkwijze.....	7
3.4 Resultaten.....	8
3.4.1 Gebruikersgedrag bij koeling (raamgebruik, gebruik van zonwering, gebruik airco)	8
3.4.2 Gebouwmodel.....	14
3.4.3 Validatie koelvraag bij acht goed-geïsoleerde NeroZero woningen in Dijk en Waard.....	16
4 Conclusies leerpunten en aanbevelingen.....	19
4.1 Conclusies.....	19
4.2 Leerpunten	19
4.3 Aanbevelingen	19
5 Literatuur.....	20
6 Bijlage A: gedetailleerde studie naar drijfveren voor het openen van ramen.....	21

programma Integrale Energietransitie Bestaande Bouw

Openbare eindrapportage deelproject 4.1 Digitalisering bouwproces, PPS activiteit 7
Koppeling gebruikersgedrag aan gebouwmodel

1 Programma IEBB

1.1 Inbedding in programma IEBB

Het consortium Integrale Energietransitie Bestaande Bouw heeft als ambitie het haalbaar, betaalbaar en opschaalbaar maken van de energietransitie in de bestaande (woning)bouw. Hierbij richten we ons specifiek op de opschaling naar 200.000 renovaties per jaar vóór het jaar 2030. Om dit te bereiken werken we verdeeld over 9 thema's, aan innovaties op het gebied van industrialisatie van renovatieconcepten (thema 1-4; MMIP 3.1 en 3.2), het transitieproces (thema 5-7; MMIP 3.3) en warmtetechnologie (thema 8 en 9; MMIP 4.1 en 4.3).

Het deelproject waar hierover wordt gerapporteerd maakt onderdeel uit van thema 4 Digitalisering en draagt bij aan de doelstelling van *MMIP 3.2 – Industrialisatie en digitalisering van het renovatieproces*.

Voor het bepalen van de energetische prestatie van een woning vóór en na renovatie is een rekenkern ontwikkeld. Het goed modelleren van gebruikersgedrag is een vereiste om realistische resultaten te behalen.

Dit deelproject van innovatieplan Integrale Energietransitie Bestaande Bouw is uitgevoerd met subsidies van het ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties en het ministerie van Economische Zaken en Klimaat, uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

1.2 Belang deelproject

1.2.1 Bijdrage aan de MMIP 3 en MMIP 4 doelen

De renovatie-opgave is groot om in 2050 een energie-neutrale gebouwde omgeving te realiseren. Grootschalig toe te passen tools die zoveel mogelijk automatisch de benodigde bouwkundige gegevens van woningen ophalen is daarbij een noodzakelijk onderdeel van integrale pakketten om tot de gewenste schaalgrootte van woningverduurzaming te komen.

Het snel en automatisch inzicht geven in de prestaties van verschillende renovatie-opties, zowel op het gebied van energiebesparing als comfortverbetering, helpt bewoners in hun keuze om een renovatie daadwerkelijk uit te voeren.

Koeling van de woningen speelt een steeds grotere rol in de energievraag, wat blijkt enerzijds uit het feit dat de laatste jaren 3,4% van de huishoudens een vaste airconditioning aanschafft [1] en anderzijds de verwachte hogere buitentemperaturen ten gevolge van de klimaatverandering. De verwachting is dat het elektriciteitsgebruik van airconditioners toeneemt van een geschatte 1,6PJ in 2022 naar 4PJ in 2030 [1]. Gebruikersgedrag zoals temperatuur setpoint van de airco, raamgebruik en gebruik van zonwering speelt daarbij een grote rol.

1.2.2 Opbrengsten deelproject

Een voorziene toepassing van de resultaten van dit deelproject is het implementeren van het gebruikersgedrag m.b.t. koeling te in het gebouwmodel van de warmteprofielengenerator (WPG). Dit is een online tool (<https://www.warmteprofielengenerator.nl/>).die het profiel (d.w.z. uurlijkse waarden) van de warmtevraag berekent van een grafisch te kiezen buurt in Nederland.

Door het berekenen van de koelvraag van een buurt is het mogelijk om het elektriciteitsgebruik van woningen voor het invullen van de koelvraag te voorspellen en in hoeverre de combinatie van elektriciteitsvraag voor koeling en de elektriciteitsproductie door duurzame bronnen in de betreffende buurt (extra) netcongestieproblemen oplevert.

programma Integrale Energietransitie Bestaande Bouw

Openbare eindrapportage deelproject 4.1 Digitalisering bouwproces, PPS activiteit 7
Koppeling gebruikersgedrag aan gebouwmodel

2 Project gegevens

Projectnummer: TEUE919003

Titel deelproject: Koppeling gebruikersgedrag aan gebruikersmodule en gebouwmodel

Penvoerder en medeaanvragers: TNO

Uitvoeringsperiode: 01-01-2021 - 31-12-2024

programma Integrale Energietransitie Bestaande Bouw

Openbare eindrapportage deelproject 4.1 Digitalisering bouwproces, PPS activiteit 7
Koppeling gebruikersgedrag aan gebouwmodel

3 Inhoudelijk eindrapport

3.1 Inleiding

Gebruikersgedrag bepaalt voor een groot deel de energievraag van woningen. Zo kan het energiegebruik van min of meer identieke woningen met verschillende bewoners een factor vier [2] van elkaar verschillen. Dat speelt bij de warmtevraag van een woning (voor ruimteverwarming in het stookseizoen en warm tapwaterbereiding), maar in nog sterkere mate voor de koelvraag van woningen.

Koeling van de woningen speelt een steeds grotere rol in de energievraag, wat blijkt uit het feit dat de laatste jaren 3,4% van de huishoudens een de jaarlijkse verkoop van vaste airconditioning aanschaf en de verwachte hogere buitentemperaturen ten gevolge van de klimaatverandering. De verwachting is dat het elektriciteitsgebruik van airconditioners toeneemt van een geschatte 1,6PJ in 2022 naar 4PJ in 2030 [1].

Dat zorgt niet alleen voor een grotere energievraag maar kan ook tot netcongestie leiden. Het zou aan de andere kant ook een oplossing zijn voor het oplossen van netcongestie door de grote hoeveelheid door PV-panelen opgewekte elektriciteit die op zonnige dagen aan het net wordt geleverd. Zaak is dan de opgewekte elektriciteit zoveel mogelijk zelf te gebruiken voor bijvoorbeeld koeling in plaats van aan het net te leveren.

Er is daarom steeds meer behoefte aan een inschatting van de koelvraag van een woning of van meerdere woningen, bijvoorbeeld in een buurt. Is die overal in Nederland hetzelfde? En hoe ontwikkelt die koelvraag zich in de toekomst?

Nog meer dan de warmtevraag wordt de koelvraag van een woning bepaald door het energie-gerelateerd gebruikersgedrag, zoals het openen van ramen (vooral in de tussenseizoenen), het gebruik van de zonwering en het gebruik van een eventuele airco, zoals de temperatuurinstelling en deel van de woning dat wordt gekoeld (bijvoorbeeld de woonkamer en of slaapkamers).

3.2 Doelstelling

Het doel is driedelig:

1. Inzicht in gebruikersgedrag bij koeling (raamgebruik, gebruik van zonwering, gebruik van airconditioning units, zoals temperatuursetpoint)
2. Modelleren van dit gebruikersgedrag in een dynamisch gebouwmodel
3. Validatie van de met de modellen berekende koelvraag aan de hand van metingen bij 8 goed geïsoleerde woningen in Dijk en Waard.

3.3 Werkwijze

Inzicht in gebruikersgedrag bij koeling is gedaan door literatuuronderzoek, van een beperkt aantal bronnen, o.m. het enquête onderzoek onder 1170 respondenten naar het gebruik van airco's [3] en het Raak Hitte-in-de-woning onderzoek waar monitoring van binnentemperaturen en gebruikersgedrag zijn verricht in 65 woningen tijdens warme zomerse weken [4]. Voor het modelleren van het gebruikersgedrag is voortgebouwd op een één-zone dynamisch gebouwmodel dat is ontwikkeld in Activiteit 4.1 *Renovatiertools* van het MMIP-IEBB Thema 4 *Digitalisering* [5]. Het gebruikersgedrag is gemodelleerd in een aantal eenvoudige regels. Gezien de spreiding in gebruikersgedrag wordt voor een groep woningen specifiek gedrag voor elke woning zoals een eventueel aanwezige airco en temperatuurinstelling daarvan, willekeurig uit een verdeling getrokken.

In het EU-project SPHERE zijn gedurende ruim een jaar acht goed geïsoleerde NeroZero woningen in Dijk en Waard gemonitord. Deze woningen hebben vloerverwarming waarmee ook wordt gekoeld. Speciaal voor het modelleren van deze woningen is het één-zone gebouw uitgebreid met een model van de vloerverwarming. Data van deze woningen is gebruikt voor het valideren van de warmte- en koelvraag die met het oorspronkelijke en het uitgebreide één-zone model zijn berekend.

programma Integrale Energietransitie Bestaande Bouw

Openbare eindrapportage deelproject 4.1 Digitalisering bouwproces, PPS activiteit 7
Koppeling gebruikersgedrag aan gebouwmodel

In een parallel activiteit onderzochten we op kwalitatieve wijze de factoren die van invloed zijn op het gedrag van het openen van ramen in woningen.

3.4 Resultaten

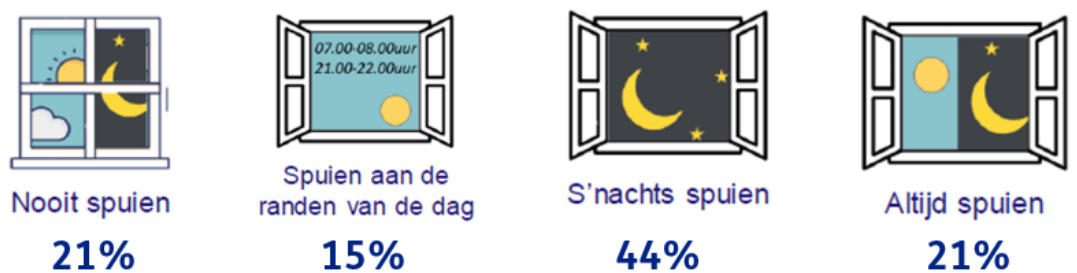
3.4.1 Gebruikersgedrag bij koeling (raamgebruik, gebruik van zonwering, gebruik airco)

Nog meer dan de warmtevraag wordt de koelvraag van een woning bepaald door het energie-gerelateerd gebruikersgedrag, zoals het openen van ramen (vooral in de tussenseizoenen), het gebruik van de zonwering en het gebruik van een eventuele airco, zoals temperatuurstelling en deel van de woning dat wordt gekoeld (bijvoorbeeld de woonkamer en of slaapkamers).

Openen ramen

Uit simulaties blijkt dat het openen van ramen in de tussenseizoenen, dus het koelen van de woning met relatief koele buitenlucht, de koelvraag met een factor twee kan beïnvloeden.

In het RAAK project [4] is het spuigedrag door het openen van ramen bij 38 van de 65 huishoudens onderzocht (het spuigedrag is niet bij alle woningen gemonitord). Uit het gedrag van deze 38 woningen zijn 4 typische spuigedragingen gedestilleerd, weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1: Vier typische spuigedragingen en het aandeel van alle onderzochte woningen waarin dit gedrag werd waargenomen [4].

In Activiteit 3 van IEBB2, zijn kwantitatieve analyses gedaan naar de drijfveren van bewoners om ramen te openen. Over het algemeen kunnen we concluderen dat de drijfveren voor het openen van ramen afhankelijk zijn van de kenmerken van het huishouden. Aangezien het tijdstip van de dag één van de meest relevante en consistente factoren is in alle monitoringswoningen, lijkt het gebruik van bovenstaande profielen geschikt voor het modelleren van het raamgedrag. Meer informatie over de studie is opgenomen in Bijlage A.

De ventilatiehoeveelheid ten gevolge van het openen van ramen is afhankelijk van een groot aantal (vaak slechts deels bekende) parameters waaronder hoeveel ramen er open staan, hoe ver ze open staan, de locatie van de ramen (begane grond, 1^e of 2^e verdieping), positie van ramen ten opzichte van de windrichting, in hoeverre de ramen worden gesloten als het harder gaat waaien, of binnendeuren open of dicht staan etc.

Uit een vergelijking tussen gemeten en gesimuleerde binnentemperaturen van 3 woningen in het RAAK project, kon een ventilatievoud van 1-1,2 per uur worden bepaald. Als we uitgaan van een gemiddeld ventilatievoud van 1 per uur, kunnen we het raamgedrag van bewoners modelleren, afhankelijk van het type gebruiker in Figuur 1. Als we er van uitgaan dat de verdeling in Figuur 1 representatief is voor grote groepen gebruikers, kunnen we dat modelleren door het trekken van een willekeurig getal, bijvoorbeeld tussen 0,00 en 1,00. Als het willekeurig getal kleiner is dan 0,21 nemen we aan dat de gebruiker nooit spuit, etc. Het model is weergegeven door de pseudocode in Figuur 2.

```

If: user_type_vent = never:
    Windows_open = False

If: user_type_vent = morning/evening:
    if hour_of_day is 7-8 or 20-23 and  $T_{\text{indoor}} > 22^{\circ}\text{C}$  and  $T_{\text{indoor}} > T_{\text{outdoor}}$  and month is May-Sep:
        Windows_open = True
    Else: Windows_open = False

If: user_type_vent = effective purging:
    if  $T_{\text{indoor}} > 21^{\circ}\text{C}$  and  $T_{\text{indoor}} > T_{\text{outdoor}}$  and month is May-Sep:
        Windows_open = True
    Else: Windows_open = False

If: user_type_vent = purge during day:
    if  $T_{\text{outdoor}} > 21^{\circ}\text{C}$  and month is May-Sep:
        Windows_open = True
    Else: Windows_open = False

For all users
if AC=on: Windows_open = False

Compute ventilation rate:

If Windows_open = True:  $Q_{\text{vent}} = Q_{\text{vent}} + 1 * V_{\text{dwelling}} / \text{hr}$ 

```

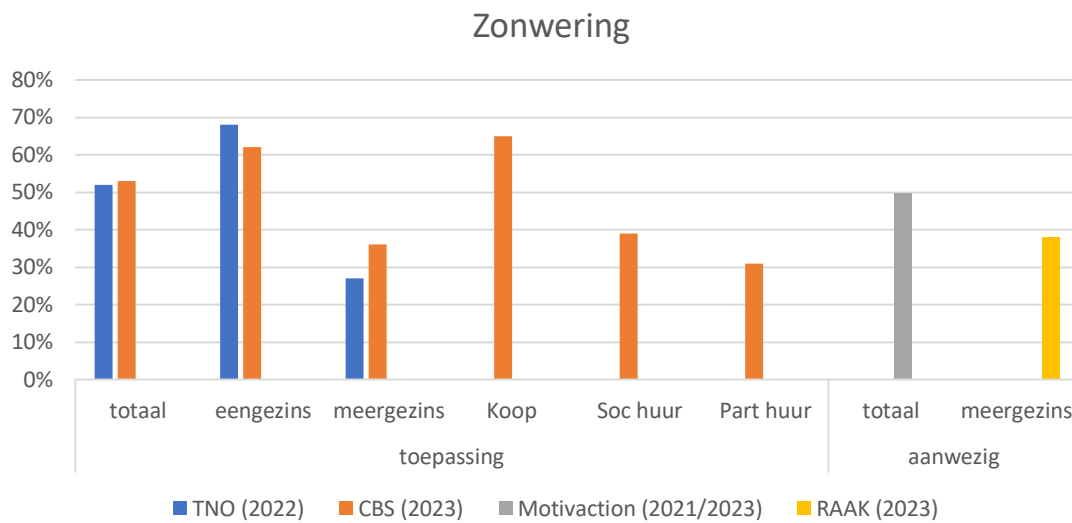
Figuur 2: model van het raamgedrag van bewoners, weergegeven in pseudocode.

Dit model blijft bij gebrek aan gedetailleerde informatie over ramen en de gebruiker, een grove benadering van de werkelijkheid. De verwachting is dat bij het doorrekenen van grotere aantallen woningen (enkele honderden tot enkele duizenden woningen in een buurt), de onzekerheden uitmiddelen tot een betrouwbaarder gemiddelde.

Zonwering

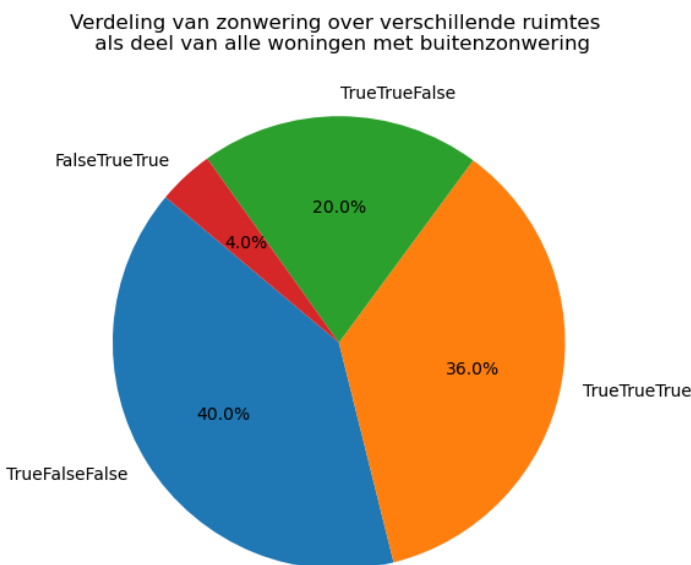
Er zijn verschillende bronnen geraadpleegd voor de penetratie van zonwering bij woningen. Navraag bij Vereniging Romazo Rollluiken levert een getal van 30% van woningen met zonwering.

In [3] is een aantal bronnen vergeleken die uitspraken doen over de penetratie van zonwering te hebben (eengezins 65%, meergezins 30%), zie Figuur 3. Gemiddeld lijkt een waarde van 50% realistisch.



Figuur 3: Penetratie van zonwering bij woningen volgens verschillende bronnen.

In het RAAK onderzoek [4] was bij 25 van de 65 woningen (38%) buitenzonwering aanwezig in één of meerdere ruimten. Bij die 25 woningen is ook gekeken naar de verdeling van zonwering, indien aanwezig, over verschillende vertrekken, weergegeven in Figuur 4. In deze steekproef heeft 36% van alle woningen met buitenzonwering zonwering in alle ruimten, 40% alleen in de woonkamer en 20% alleen in de woonkamer en de hoofdslaapkamer.



Figuur 4: Verdeling van zonwering over verschillende vertrekken: True/False waarden voor resp. woonkamer, hoofdslaapkamer en een extra kamer. TrueFalseFalse betekent bijvoorbeeld alleen zonwering in de woonkamer.

Het gebruikte één-zone model (zie par 3.4.2) maakt geen onderscheid tussen verschillende vertrekken en gaat er van uit dat de gehele woning op dezelfde temperatuur is, wat ook inhoudt dat de zoninstraling door de verschillende ramen de woning als geheel opwarmt. In dit model is de enige relevante parameter t.a.v. zonwering de fractie van het raamoppervlak (van de gehele woning) dat van een zonwering is voorzien. Om de

penetratiegraad van zonweringen en de verdeling over de verschillende vertrekken te kunnen vertalen naar een fractie ‘van zonwering voorzien raamoppervlak’, moeten we nog iets weten over de raamoppervlakken van de verschillende vertrekken. Dit is onderzocht in het RAAK project voor deze steekproef van 25 woningen bij 17 appartementen en 8 rijwoningen, zie Tabel 1.

Tabel 1: Raamoppervlak van ruimten als fractie van het totaal raamoppervlak van de woning.

raamoppervlak van ruimten als fractie van het totaal raamoppervlak van de woning	Appartement	Rijwoning
	(portiek etage)	(tussen)
Woonkamer	21%	29%
Hoofd slaapkamer	21%	23%
2e slaapkamer	14%	12%
Totaal raamoppervlak [m2]	35	26

Indien er van woningen niets bekend is over aanwezigheid of gebruik van zonwering, kan dit voor grotere groepen woningen, zoals een buurt worden ingeschat aan de hand van gemiddelden met behulp van twee willekeurige getallen, zoals weergegeven in de pseudocode in Figuur 5.

```

IF random1 < 0.5 THEN
  X_zonwering = 0% {50% van woningen heeft geen zonwering}
ELSE
  IF random2 < 0.36
    X_zonwering = (29%+23%+12%) {zonwering in alle ruimten}
  IF 0.36<random2 < 0.76
    X_zonwering = 29% {zonwering in alleen woonkamer}
  IF 0.76<random2 < 0.80
    X_zonwering = 21% +14% {zonwering in slaapkamer en 2e slaapkamer}
  IF 0.80<random2
    X_zonwering = 29% +23% {zonwering in woonkamer en hoofdslaapkamer}

```

Figuur 5: Pseudocode voor het bepalen van de fractie van het raamoppervlak dat van zonwering is voorzien (X_zonwering). Toelichting staat tussen accolades {}.

Oriëntatie van de ramen met zonwering

Als er over de oriëntatie van de ramen met zonwering van een woning niets bekend is, gaan we ervan uit dat de waarde van X_zonwering geldt voor alle raam, behalve oriëntaties tussen NNO en NNW, aangezien zonwering op deze oriëntaties weinig zin heeft. Indien bijvoorbeeld een tussenwoning Noord-Zuid is georiënteerd, is X_zonwering de fractie van het Zuidgeoriënteerde ramen, en hebben de ramen op het Noorden geen zonwering.

Zonwering bedieningsgedrag

Het gebruik van zonwering is niet altijd efficiënt, zoals blijkt uit een kwalitatieve analyse van de 25 woningen met buitenzonwering uit de RAAK monitoringsdata (temperatuurmetingen en gedragsboeken van zonwering en ramen) gedurende een week met een hittegolf (zie Tabel 2).

programma Integrale Energietransitie Bestaande Bouw

Openbare eindrapportage deelproject 4.1 Digitalisering bouwproces, PPS activiteit 7
Koppeling gebruikersgedrag aan gebouwmodel

Tabel 2: Actieve en minder actieve gebruikers van zonwering gedurende een hittegolf van een week.

Share	Numer of homes	Behaviour
40%	8	Always keep the shading system closed during warm days
20%	4	Active open and closing (prevent solar radiation from entering)
35%	7	Active open and closing but sometimes inconsistent
5%	1	Always open even throughout warm days

Blijkbaar zijn er ca. 60% actieve gebruikers van zonwering en 40% passieve gebruikers. Het model voor het gebruik van zonwering is weergegeven in pseudo-code in Figuur 6.

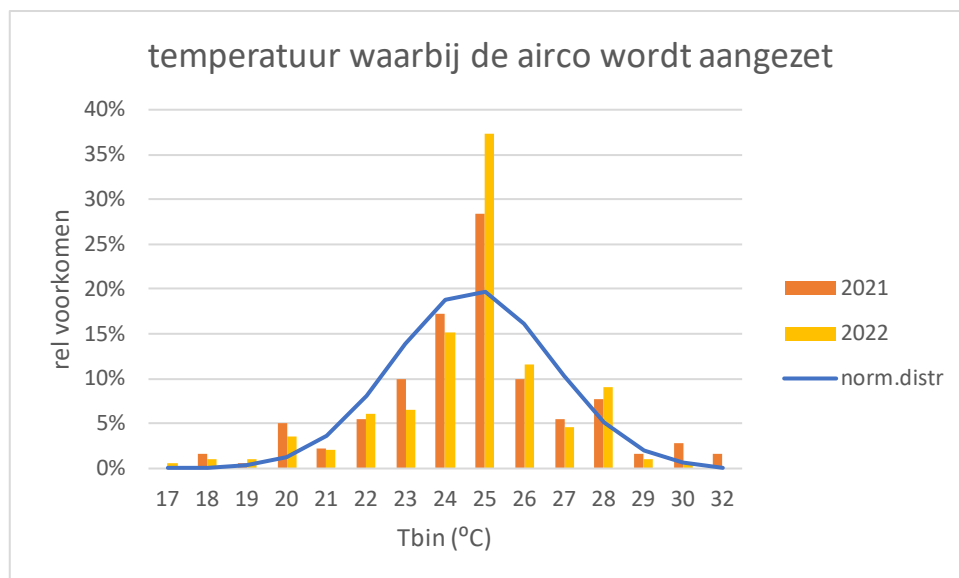
{Actieve gebruiker (60% van de gebruikers)} IF zonwering aanwezig THEN IF ($T_{IN} > 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ AND $I_{vert} > 200\text{ W/m}^2$) and : Month is in April-Sept: THEN $g_{zonw} = 0.3$ ELSE $g_{zonw} = 1$	{Passieve gebruiker (40% van de gebruikers)} IF zonwering aanwezig THEN IF ($T_{IN} > 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ AND $I_{vert} > 300\text{ W/m}^2$) AND Month is in April-Sept: THEN $g_{zonw} = 0.3$ ELSE $g_{zonw} = 1$
---	--

Figuur 6: Model van het gebruik van zonwering door bewoners, weergegeven in pseudocode.

Gebruik airco

Bij het gebruik van een airco spelen drie belangrijke parameters een rol: de binnentemperatuur in de woning waarbij de airco wordt aangezet, de temperatuurinstelling van de airco als die aanstaat, en de duur dat de airco aan staat, voor zover die niet afslaat als de gewenste binnentemperatuur wordt bereikt.

In [3] is een enquête uitgezet onder 1170 deelnemers waarbij bovenstaande drie parameters zijn uitgevraagd. De temperatuur waarbij de airco wordt aangezet blijkt bij benadering normaal verdeeld met een gemiddelde van $24,7^{\circ}\text{C}$ en een standaarddeviatie van $1,8^{\circ}\text{C}$, zie Figuur 7.


Figuur 7: Temperatuur waarbij de airco wordt aangezet blijkt bij benadering een normale verdeling met een gemiddelde van $24,7^{\circ}\text{C}$ en een standaarddeviatie van $1,8^{\circ}\text{C}$.

programma Integrale Energietransitie Bestaande Bouw

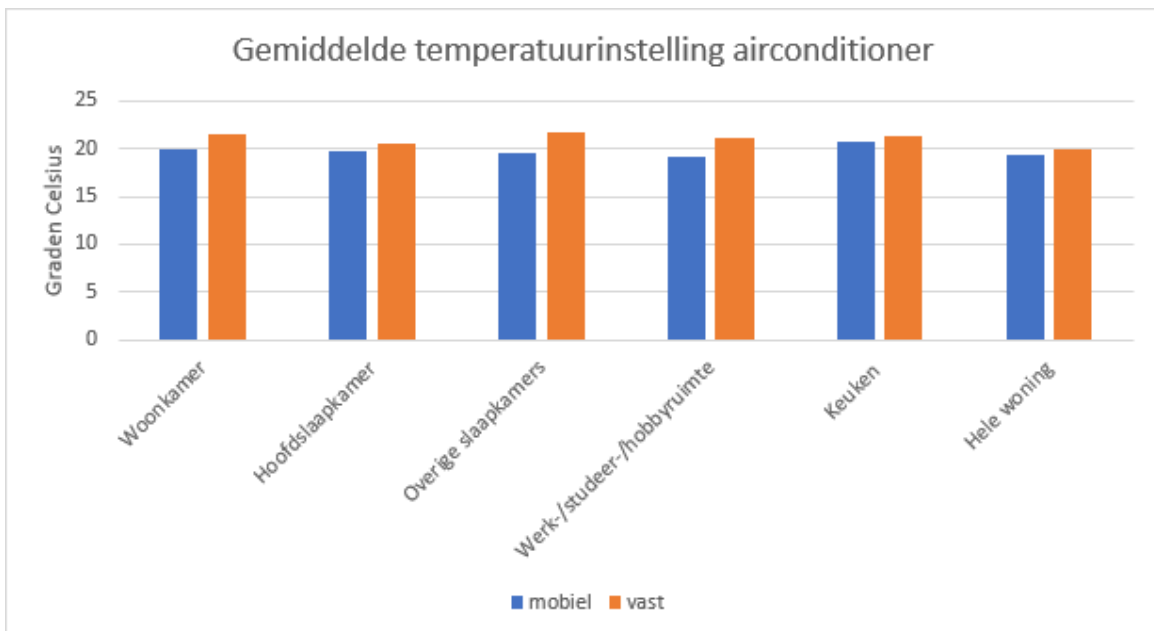
Openbare eindrapportage deelproject 4.1 Digitalisering bouwproces, PPS activiteit 7
Koppeling gebruikersgedrag aan gebouwmodel

Wanneer we het gedrag van een grotere groep woningen willen modelleren (bijvoorbeeld van een buurt) kan dat met het trekken van een willekeurig getal tussen 0 en 1 voor elke woning. In de cumulatieve normale verdeling vinden we voor elk willekeurig getal tussen 0 en 1 (en dus voor elke woning) een binnentemperatuur waarbij de airco wordt aangezet (Figuur 8).



Figuur 8: Cumulatieve verdeling van de temperatuur waarbij de airco wordt aangezet en het bepalen daarvan door trekking van een willekeurig getal tussen 0 en 1.

Uit Figuur 9 blijkt dat de gemiddelde temperatuurinstelling van de airco voor alle vertrekken bij benadering hetzelfde is. We gaan voor de eenvoud uit van een waarde van 20.5°C voor alle vertrekken in alle woningen

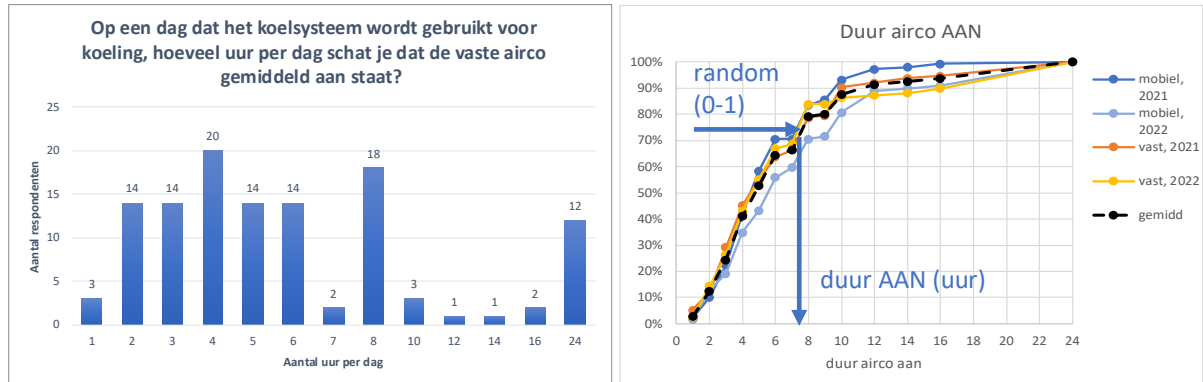


Figuur 9: Gemiddelde temperatuur instelling van de airco.

De duur dat de airco aan staat is in dezelfde enquête uitgevraagd en is in Figuur 10 weergegeven.

programma Integrale Energietransitie Bestaande Bouw

Openbare eindrapportage deelproject 4.1 Digitalisering bouwproces, PPS activiteit 7
Koppeling gebruikersgedrag aan gebouwmodel



Figuur 10: De gemiddelde duur dat de airco aan staat. Links: verdeling en rechts: cumulatieve verdeling. In die laatste is onderscheid gemaakt tussen vaste en mobiele airco's, apart voor de enquêtes uit 2021 en 2022.

Voor een groep woningen wordt voor elke woning de duur bepaald aan de hand van een willekeurig getal, zoals we dat ook deden voor de binnentemperatuur waarbij de airco wordt aangezet, zoals weergegeven in Figuur 10.

3.4.2 Gebouwmodel

Voor het berekenen van de warmtevraag van een woning vóór en na renovatie is in Activiteit 4.1 *Renovatiertools* van het MMIP-IEBB Thema 4 *Digitalisering* een dynamisch rekenmodel ontwikkeld. Dit is een één-zone model waarmee elk uur gedurende een jaar de warmtebalans van warmtewinsten en warmteverliezen wordt berekend op basis van uurlijks veranderende weercondities (buitentemperatuur en zoninstraling). Als in een uur de warmtewinsten groter zijn dan de warmteverliezen, warmt de woning op en als de verliezen groter zijn dan de winsten, koelt de woning af, tenzij de verwarming aan staat. In dat geval wordt het verschil tussen warmteverliezen en winsten aangevuld door de verwarming waardoor de binnentemperatuur op het gewenste niveau blijft (mits het vermogen van het warmteafgiftesysteem voldoende hoog is).

Dit model berekent ook de temperatuur in de woning in de zomer en kan daarmee een inschatting maken van de koelvraag. Zoals eerder opgemerkt is de koelvraag, nog meer dan de warmtevraag in het stookseizoen, afhankelijk van gebruikersgedrag, met name het raamgebruik, vooral in de tussenseizoenen, het gebruik van eventuele zonwering en een eventuele airco.

Koelvraag van woonkamer en slaapkamer in het één-zone model

Het gebruikte model is een één-zone model, wat betekent dat het gehele gebouw op één uniforme temperatuur wordt verondersteld. Om toch onderscheid te kunnen maken tussen de koelvraag van de woonkamer op de begane grond en die van de slaapkamers op de eerste verdieping, rekening houdend met het gebruikersgedrag van de airco (zie vorige paragrafen) wordt de volgende procedure gevolgd.

Allereerst wordt de benadering gemaakt dat van de woonkamer op de begane grond overdag wordt gekoeld (tussen 8:00 en 20:00 uur) en de slaapkamers 's avonds en 's nachts (tussen 20:00 en 8:00) uur.

Het gekoelde oppervlak is verschillend voor koeling van enkel de woonkamer, enkel de slaapkamer of beide. Gaan we uit van een eengezinswoning met 3 verdiepingen dan is bij benadering het oppervlak van de woonkamer $\frac{1}{3}$ van het gebruiksoppervlak en elke slaapkamer 25% van $\frac{1}{3} = \frac{1}{12}$ van het gebruiksoppervlak.

Deze waarden bepalen het setpoint van de gehele woning dat de airco tracht te bereiken. Hoe groter het gekoelde oppervlak, des te lager de setpoint temperatuur van de airco. Voor het gekoelde oppervlak gaan we uit van een gewenste temperatuur van 20.5 °C (Figuur 9) en voor het niet-gekoelde oppervlak een trekking uit de normale verdeling Norm(24,7; 1,8), zie Figuur 8. Dit is de temperatuur die bewoners maximaal in de (niet-

gekoelde) ruimten wensen, dus als dit bijvoorbeeld 25°C is, wordt de setpointtemperatuur voor de airco (voor de woning als geheel):

$$T_{AC_set} = x_{gekoeld} \cdot 20.5^{\circ}\text{C} + (1 - x_{gekoeld}) \cdot 25^{\circ}\text{C}.$$

Nemen we bijvoorbeeld koeling in enkel de woonkamer, dan is $x_{gekoeld} = \frac{1}{3}$ en $T_{AC_set} = 23,5^{\circ}\text{C}$.

De airco (AC) gaat aan als de binnentemperatuur hoger wordt dan de setpointtemperatuur EN de draaitijd korter is dan de maximale tijd voor die woning (uit Figuur 10).

De vereenvoudigde pseudocode is weergegeven in Figuur 11

```

IF  $T_{IN} > T_{AC\_set}$  AND  $\Delta t_{AC\_ON} < \text{max\_length}_{AC\_ON}$ 
THEN AC=ON
ELSE AC=OFF

```

Figuur 11: Pseudocode om te bepalen of de airco (AC) aan of uit staat.

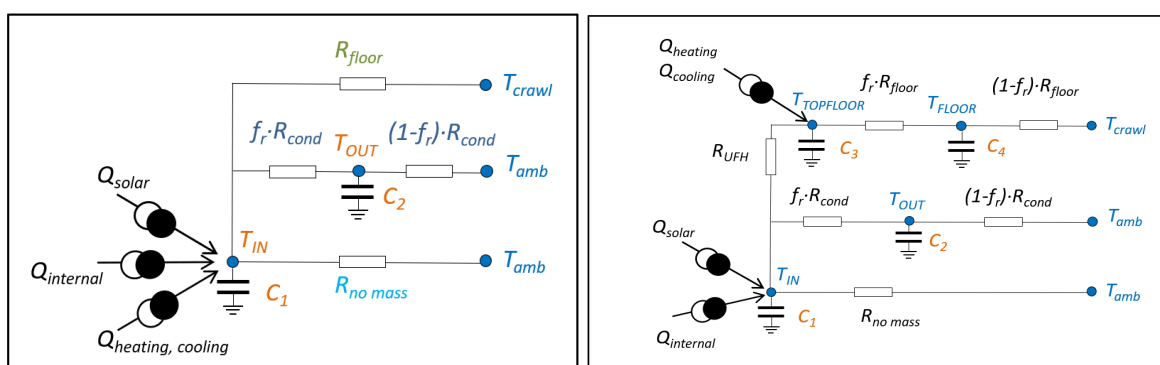
Als de airco aan staat onttrekt die in het volgende uur een thermisch vermogen van $P_{\max_AC}$ aan de thermische massa van de woning (C_1 in Figuur 12 links), zodat de koelvraag toeneemt met $1 \cdot P_{\max_AC}$ (in kWh) en het energiegebruik met $P_{\max_AC} / \text{COP}$ met COP de gemiddelde Coefficient Of Performance van de airco in dat uur.

Model vloerverwarming

Het elektrisch equivalent van het meest eenvoudige één-zone model is weergegeven in Figuur 12 (links). Het model heeft 2 massa's (C_1 en C_2) die de thermische massa van de woning vertegenwoordigen. De massa C_1 is de kleinste van de twee en reageert daardoor relatief snel op warmteverliezen en warmtewinsten. De massa C_2 is groter en dempt de variaties in C_1 .

Dit model heeft 4 thermische weerstanden (R) die de geleidingsverliezen door muren + dak, geleidingsverliezen door de vloer naar de kruipruimte en de thermische verliezen door ramen en van ventilatie + infiltratie representeren. Vandaar de naam 4R2C-model.

Indien er een vloerverwarmingssysteem in de woning aanwezig is, is dat een traag reagerend warmte-afgiftesysteem. Dat is gemodelleerd met twee aanvullende thermische massa's (voor de toplaag met daarin de verwarmingsstrengen C_3 en de rest van de vloer C_4). Ook zijn er twee aanvullende thermische weerstanden gebruikt, zodat het model een 6R4C model wordt genoemd. Het elektrische equivalent van het model met de vloerverwarming is weergegeven in het rechter deel van Figuur 12.



Figuur 12: Elektrisch equivalent van één-zone model van een woning. Links: 4R2C-basismodel, rechts 6R4C-model met twee extra thermische massa's voor de vloer met vloerverwarming.

Met beide modellen is de warmtevraag en koelvraag van acht woningen in Dijk en Waard berekend en vergeleken met de gemeten warmte- en koelvraag.

programma Integrale Energietransitie Bestaande Bouw

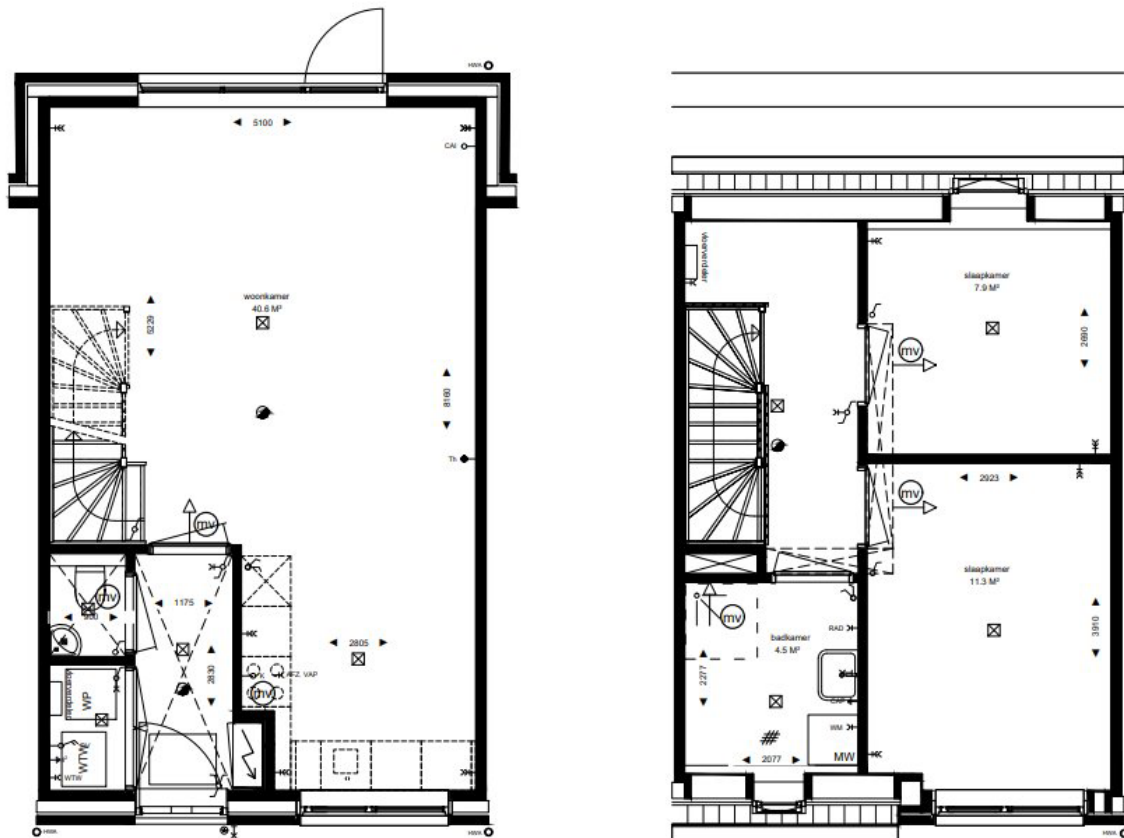
Openbare eindrapportage deelproject 4.1 Digitalisering bouwproces, PPS activiteit 7
Koppeling gebruikersgedrag aan gebouwmodel

3.4.3 Validatie koelvraag bij acht goed-geïsoleerde NeroZero woningen in Dijk en Waard

In het EU-project SPHERE zijn gedurende ruim een jaar acht goed geïsoleerde NeroZero woningen in Dijk en Waard gemonitord. De woningen hebben twee verdiepingen en zijn geïsoleerd op passiefhuis niveau. Figuur 13 toont het aanzicht en een deel van het warmteafgiftesysteem, Figuur 14 toont de plattegrond.



Figuur 13: Aanzicht van de NeroZero woningen in Dijk en Waard en een deel van het warmteafgiftesysteem.



Figuur 14: Plattegrond van de NeroZero woningen in Dijk en Waard.

programma Integrale Energietransitie Bestaande Bouw

Openbare eindrapportage deelproject 4.1 Digitalisering bouwproces, PPS activiteit 7
Koppeling gebruikersgedrag aan gebouwmodel

De installatie bestaat uit een warmtepomp met een thermisch vermogen van 3,5 kW voor verwarming en bereiding van warm tapwater (met een boilervat van 150 ltr). Warmtebron voor de warmtepomp is een bodemlus van 120m diep. Ook is er een warmteterugwin unit in het ventilatiesysteem aanwezig.

Verwarming van de woning geschiedt middels vloerverwarming in beide verdiepingen. In de zomer wordt koud water uit de bodem zonder inzet van de warmtepomp door de vloerverwarming gecirculeerd, wat de woning op energiezuinige wijze koelt.

Gebruiksgedrag in de acht woningen

Het raamgedrag is ingeschat op basis van een aantal bezoeken waarbij het aantal open ramen is genoteerd. De woningen beschikken niet over zonwering. Het setpoint van de koelinstallatie is gemeten en was gemiddeld 21,3°C.

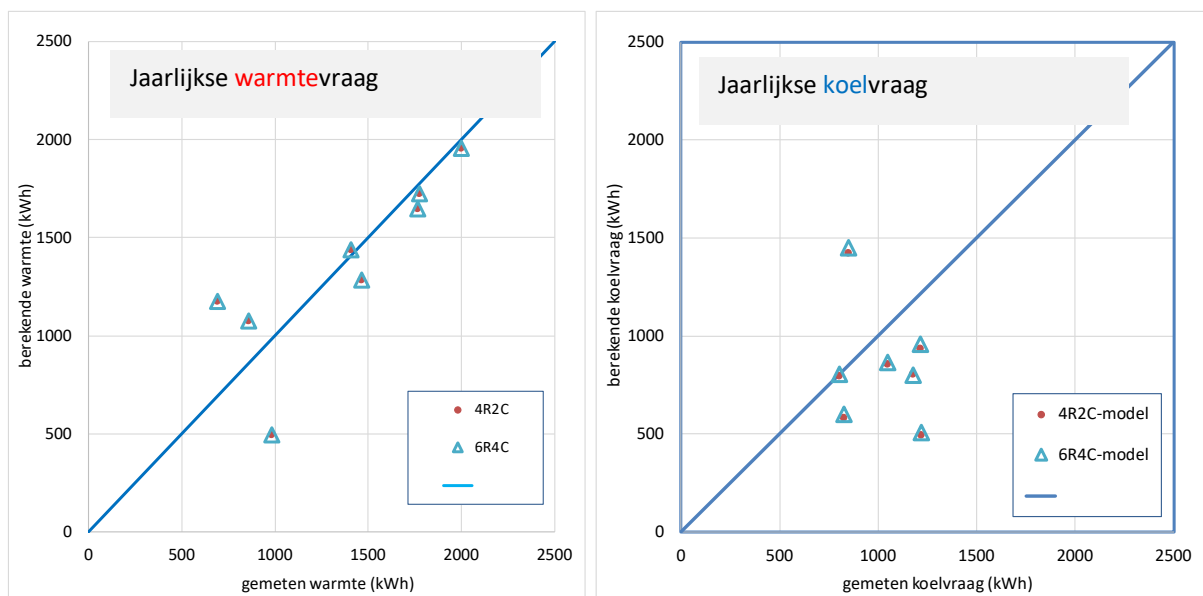
Vergelijking tussen berekening met één-zone modellen en meting

De gemeten warmtevraag is bepaald op basis van de gemeten warmteproductie van de warmtepomp van november 2021 tot april 2022. De COP (Coefficient Of Performance) van de warmtepomp, dat wil zeggen het verhouding van geproduceerde warmte en de opgenomen elektriciteit kwam uit op 5.8 gemiddeld voor de acht woningen.

De gemeten koelvraag tussen april 2022 en september 2022 is bepaald op basis van het elektriciteitsgebruik van de bronpomp en een geschatte waarde van de COP van het koelsysteem, dat wil zeggen de verhouding van de uit de woning afgevoerde warmte (koelvermogen) en de opgenomen elektriciteit. De gebruikte waarde voor de COP_{koel} is 60.

De met de modellen berekende jaarlijkse warmte- en koelvraag van de acht woningen is in Figuur 15 uitgezet tegen de gemeten waarden. Idealiter is de berekende waarde voor elke woning gelijk aan de gemeten waarde en ligt het datapunt dus op de blauwe 45°-lijn.

Beide modellen berekenen vrijwel dezelfde warmtevraag en koelvraag (rode bollen voor het 4R2C-model en blauwe driehoeken voor het 6R4C-model). Verder blijkt de spreiding in koelvraag groter dan die in de warmtevraag, waarschijnlijk door de onzekerheid in een groter aantal gebruikersgedragingen. Met name de berekende koelvraag kan een factor 2,5 verschillen van de gemeten waarde. Echter, voor alle woningen tezamen is de afwijking ca. 20%.

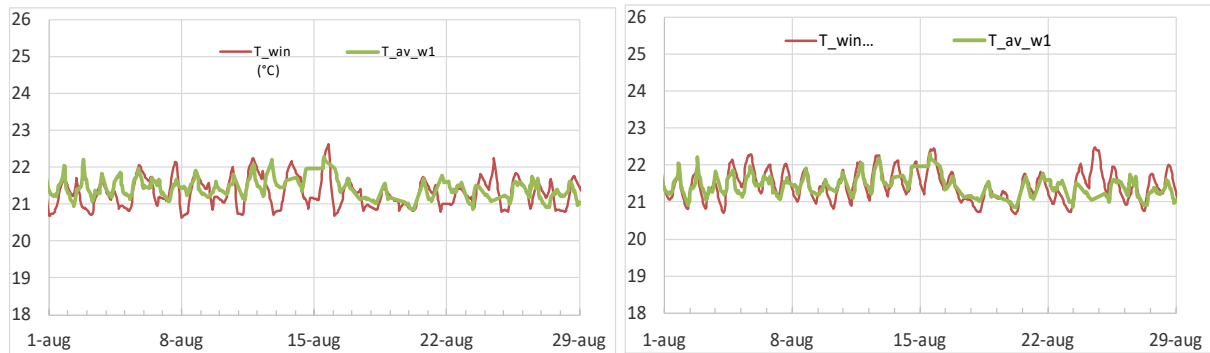


programma Integrale Energietransitie Bestaande Bouw

Openbare eindrapportage deelproject 4.1 Digitalisering bouwproces, PPS activiteit 7
Koppeling gebruikersgedrag aan gebouwmodel

Figuur 15: Jaarlijkse warmtevraag (links) en koelvraag (rechts) van de acht woningen berekend met 2 modellen: 4R2C model (●) en 6R4C-model (▲).

De binnentemperaturen zijn gemeten in de woonkamer en één van de slaapkamers. In Figuur 16 is het gemiddelde van die twee (groene lijn) vergeleken met de berekende binnentemperatuur (rode lijn) van woning 1 voor de maand augustus 2022. Hier blijkt dat het 6R4C model (Figuur 16, rechts) de dagelijkse variaties in de (gemiddelde) binnentemperatuur beter beschrijft dan het 4R2C model (Figuur 16, links).



Figuur 16: Gemeten binnentemperatuur van woning 1 (groene lijn) vergeleken met de berekende binnentemperatuur (rode lijnen) met het 4R2C model (links) en 6R4C-model (rechts).

De conclusie is dat het eenvoudige 4R2C-model voldoet als het enkel om de jaarlijkse warmte- of koelvraag gaat. Voor het goed beschrijven van het dynamisch thermisch gedrag van de woning, van belang bijvoorbeeld voor het optimaliseren van het energiegebruik en comfort presteert het 6R4C-model met de vloerverwarming beter.

4 Conclusies leerpunten en aanbevelingen

4.1 Conclusies

De onderzoeksvraag luidde:

Hoe modelleren we het relevante gebruikersgedrag bij koeling, zoals raamgebruik, gebruik van zonwering, gebruik van airconditioning units, zoals temperatuursetpoint?

Op basis van literatuuronderzoek is inzicht verkregen in het gebruikersgedrag bij koeling, in het bijzonder ten aanzien van het openen van ramen en zonwering, en het gebruik van een eventueel aanwezige airconditioning unit, zoals temperatuursetpoint en duur van gebruik.

De gedragingen zijn gekwantificeerd en in een aantal simpele regels gecodeerd voor gebruik in een eenvoudig dynamisch gebouwmodel.

De berekende koelvraag is gevalideerd aan de hand van metingen bij acht goed geïsoleerde woningen in Dijk en Waard. Hierbij zijn twee varianten van het gebouwmodel gebruikt, een basismodel en een variant waarbij de vloer met vloerverwarming als een aparte set van twee thermische massa's is gemodelleerd.

Beide modellen berekenen vrijwel dezelfde warmtevraag en koelvraag. Verder blijkt de spreiding in koelvraag groter dan die in de warmtevraag, waarschijnlijk door de onzekerheid in een groter aantal gebruikersgedragingen. Met name de berekende koelvraag kan een factor 2.5 verschillen van de gemeten waarde. Echter, voor alle woningen tezamen is de afwijking ca. 20%.

Het basis model voldoet als het enkel om de jaarlijkse warmte- of koelvraag gaat. Voor het goed beschrijven van het dynamisch thermisch gedrag van de woning, van belang bijvoorbeeld voor het optimaliseren van het energiegebruik en comfort presteert het model dat is uitgebreid met vloerverwarming beter.

4.2 Leerpunten

Het blijkt bijzonder lastig om de koelvraag voor een enkele woning goed te voorspellen met gebouwmodellen. Dat komt niet door vereenvoudigingen of onvolkomenheden in het gebouwmodel, maar door een groot aantal onzekerheden in gebruikersgedragingen m.b.t. koeling. Het lijkt er wel op deze onzekerheden uitmiddelen voor grotere aantallen woningen, zodat de koelvraag van bijvoorbeeld een buurt beter te voorspellen is dan die van een individuele woning.

4.3 Aanbevelingen

Het ontwikkelde model van de gebruikersgedragingen in combinatie met de gebruikte gebouwmodellen zou voor één of meerdere buurten gevalideerd moeten worden aan de hand van meetdata. Het vinden van betrouwbare energiegebruiksdata van koeling van groepen woningen wordt daarom sterk aanbevolen.

5 Literatuur

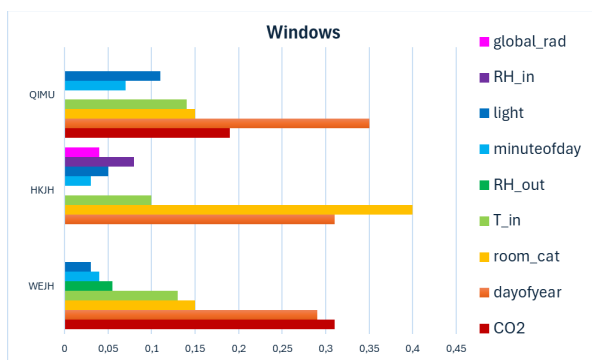
1	Rovers V, Schatting van de elektriciteitsvraag van airconditioners in Nederlandse woningen, TNO rapport TNO 2024 R11165, okt 2024
2	D. Majcenet al., Theoretical vs. actual energy consumption of labelled dwellings in the Netherlands: Discrepancies and policy implications, Energy Policy Volume 54, March 2013, Pages 125-136, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421512009731
3	Rovers V, Koelbehoefte en gebruik van airco's en bodemwarmtepompen in woningen in 2022, TNO rapport TNO 2023 P11124, juli 2023
4	RAAK Hitte in de woning 2022' (58 homes) en 'Hitteproef 2019' (11 homes) by de Vries et al. (2020, 2023)
5	F.G.H. Koene e.a., Eindrapport IEBB deelproject 4.1 Renovatietools, Referentie: TEUE919003, november 2022

programma Integrale Energietransitie Bestaande Bouw

Openbare eindrapportage deelproject 4.1 Digitalisering bouwproces, PPS activiteit 7
Koppeling gebruikersgedrag aan gebouwmodel

6 Bijlage A: gedetailleerde studie naar drijfveren voor het openen van ramen

In Activiteit 3 van IEBB2, zijn kwantitatieve analyses gedaan om te bepalen hoe nauwkeurig de gedragsschema's van de bewoners zijn voor het openen van ramen en is een onderzoek uitgevoerd in een kleine steekproef van sociale huurwoningen. De gegevens werden geanalyseerd met machine learning om voorspellingsmodellen te bouwen voor hun opname in een 'digital twin'. In drie sociale woningen in Nederland is een monitoringscampagne uitgevoerd. De monitoringscampagne duurde 12 maanden vóór dat de woningen werden gerenoveerd. Er werden binnenmilieusensoren, licht- en bewegingssensoren en schakelsensoren op ramen geïnstalleerd. In deze PPS activiteit voerden wij een kwalitatieve analyse uit en koppelden wij de kwantitatieve data met de kwalitatieve analysis. De resultaten laten zien dat de drijfveren (i.e. 'features') voor het gedrag van het openen van ramen verschillend zijn in de drie verschillende huishoudens (HKJH, QIMU en WEJH). De belangrijkste parameters zijn weergegeven in Figuur 17.



Figuur 17: Feature importance' voor het openen van ramen

De voorspellingsmodellen voor de drie verschillende woningen laten verschillende betrouwbaarheidsniveaus zien (Tabel 3). Hoewel alle modellen een goede nauwkeurigheid en precisie vertonen, was de herinnering van de modellen lager in één huishouden, wat aantoon dat in sommige huishoudens het gedrag van het openen van ramen ook kan worden beïnvloed door factoren die geen verband houden met binnenparameters, buitenparameters of seizoens- en dagpatronen.

Tabel 3: Modellen van ramen

Ramen		HKJH	QIMU	WEJH
Baseline	Accuracy	79,66	83,71	92,48
Decision tree classifier	Accuracy	91,5	90,79	92,98
	Recall	66,9	48,75	19,66
	Precision	78,98	83,09	84,84
Random forest	Accuracy	94,97	92,23	94,31
	Recall	79,66	64,1	37,33
	Precision	89,07	80,5	87,53

Om te bepalen welke andere niet-quantificeerbare factoren van invloed kunnen zijn op de voorspelling voor het openen van ramen, werd een vervolgonderzoek uitgevoerd om de drijfveren van het gedrag van het openen van ramen te bepalen. Er werd een analyse van gemengde methoden uitgevoerd. De monitoringsgegevens die werden verzameld met omgevingssensoren en sensoren voor het openen van ramen, werden getrianguleerd met zelfgerapporteerde gegevens verzameld uit vragenlijsten en semi-gestructureerde interviews. De resultaten laten zien dat huishoudens heel verschillende redenen hebben om ramen te openen. De belangrijkste conclusies van dit onderzoek zijn de volgende:

- Natuurlijke ventilatiepatronen lijken veel te verschillen tussen huishoudens, afhankelijk van a) weersomstandigheden, b) binnenomstandigheden, c) gewoonten en achtergrond van het huishouden, d) voorkeuren en e) gebruik van ruimtes. De mate waarin elk van deze (type) variabelen van invloed is op het gedrag bij het openen van ramen, hangt af van het specifieke huishouden.
- Het gebruik van verschillende ventilatiemethoden lijkt in de onderzoeken naar huishoudens vergelijkbaar te zijn: mechanische ventilatie wordt slechts sporadisch gebruikt om vocht en ongewenste geuren te verwijderen, ventilatieopeningen worden het hele jaar door voortdurend geopend en ramen worden geopend volgens de seizoenen en specifieke voorkeuren en behoeften.

Over het algemeen kunnen we concluderen dat de voorspellingsmodellen voor het openen van ramen sterk afhankelijk zijn van individuele typen huishoudens, aangezien de drijfveren voor het openen van ramen afhankelijk zijn van het huishouden. Hoewel de resultaten aantonen dat deze acties sterk afhankelijk zijn van de specifieke levensstijl en voorkeuren van mensen, evenals van de omstandigheden binnenshuis, is de individuele invloed van deze variabelen sterk afhankelijk van het specifieke huishouden. Een model voor het openen van ramen kon daarom niet worden gegeneraliseerd naar alle huishoudens, hoewel profielen kunnen worden gedefinieerd op basis van de belangrijkste drijfveren. Aangezien het tijdstip van de dag een van de meest relevante en consistente factoren is in alle monitoringswoningen, lijkt het gebruik van de profielen die in paragraaf 3.4.1 zijn opgesteld geschikt voor dit onderzoek.