

Auteurs

Ir. S. (Serhan) Yüksel, TU Delft/Arup, P. (Pedro) de la Barra Luegmayer MSc, prof. A.C. (Atze) Boerstra, dr. A. (Alessandra) Luna-Navarro (alle drie TU Eindhoven)

Effectiviteit van raamfeedbacksystemen in kantoortuinen

Gebruikers van een gebouw zijn zich vaak niet bewust hoe een te openen raam ingezet kan worden om het binnenklimaat te bevorderen en het energieverbruik te verlagen. Feedbacksystemen die aangeven wanneer een raam het beste handmatig bediend kan worden, behoren tot een strategie om de energie-efficiëntie en het welzijn van gebruikers te verbeteren. Deze raamfeedbacksystemen staan bekend om het bieden van meer comfort dan volledig automatisch gestuurde ramen en meer efficiëntie dan handmatig bediende ramen. Echter is het bewijs in de literatuur beperkt tot in welke mate raamfeedbacksystemen in staat zijn om gebruikers te begeleiden naar effectieve raambediening.

In dit artikel (naar aanleiding van het afstudeeronderzoek van de auteur) wordt een nieuw raamfeedbacksysteem voorgesteld dat op basis van de luchtkwaliteit, thermisch comfort en energie-efficiëntie informatie verstrekt via een lichtstrip. Ook worden de resultaten van een experiment getoond waarbij de effectiviteit van het nieuwe raamfeedbacksysteem is onderzocht.

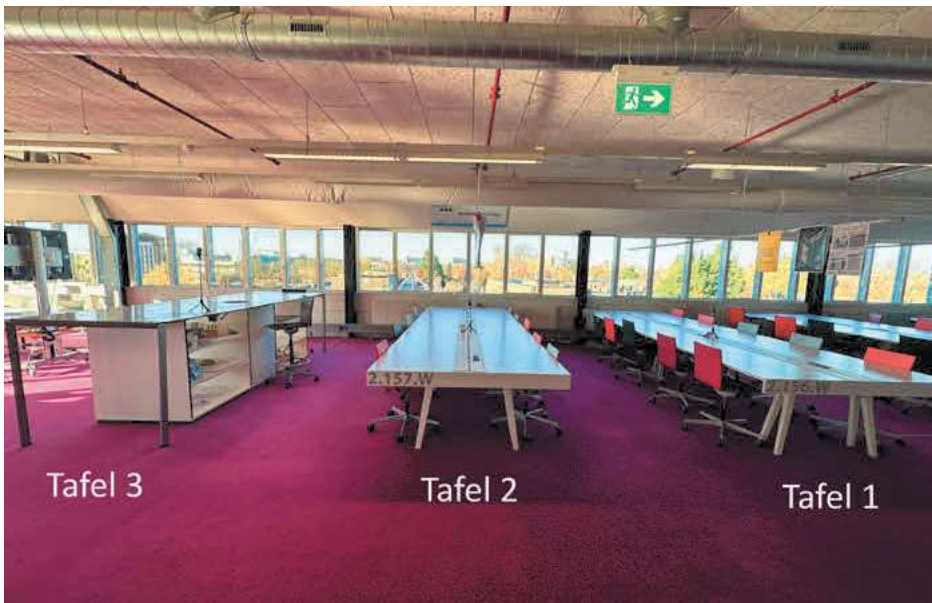
Als onderdeel van het experiment is gedurende 6 weken een bestaande en nieuwe situatie van een kantoortuin geanalyseerd. De bestaande situatie fungeerde als referentie voor de nieuwe situatie waarin het raamfeedbacksysteem werd toegepast. Het resultaat van het experiment toont aan dat raamfeedbacksystemen kunnen bijdragen aan het verbeteren van het binnenklimaat en de tevredenheid van gebruikers in kantoortuinen. Objectieve metingen laten een verbetering van de nieuwe situatie zien ten behoeve van de binnentemperatuur, relatieve vochtigheid en CO₂ concentratie. Ook tonen deze metingen aan dat de niet-effectieve raambediening in de nieuwe situatie is gereduceerd met 55%. Subjectieve metingen

valideren de objectieve metingen en laten een hogere tevredenheid zien in de nieuwe situatie met betrekking tot het thermisch comfort en de binnenluchtkwaliteit. Ook tonen subjectieve metingen aan dat een meerderheid van de respondenten het systeem begrijpt, op de feedback reageert, en tevreden is met de implementatie van het systeem. Op basis van de resultaten kan de verbetering van het binnenklimaat en de corresponderende tevredenheid van gebruikers gerelateerd worden aan het raamfeedbacksysteem.

Onderzoekprobleem

Het creëren van energie-efficiënte gebouwen wordt erkend als een belangrijke strategie om klimaatverandering tegen te gaan. Hierbij blijkt het een uitdaging om de werkelijke energieprestaties van gebouwen te bepalen. Meerdere studies tonen significante discrepanties tussen het voorspelde en werkelijke energieverbruik in gebouwen en stellen verschillende factoren als oorzaak, zoals bouwafwijkingen en weersomstandigheden. Ook zijn er studies die de onnauwkeurigheden tussen de voorspelde en werkelijke situatie verklaren door het gedrag van de gebruikers [1] [2]. Gebruikers zouden het energieverbruik van een gebouw beïnvloeden door het bedienen van verschillende interfaces zoals ramen, zonweringen en thermostaten [3].

Het raamopeningsgedrag kan met name een significante impact hebben op het energieverbruik aangezien het direct in relatie staat tot het thermisch comfort, de binnenluchtkwaliteit, energie-efficiëntie en de tevredenheid van gebruikers [4]. Ondanks het belang van goede raambediening, zijn gebruikers vaak niet bewust van raamopeningsstrategieën die hun welzijn en de energieprestaties van gebouwen kunnen bevorderen. Zowel handbediende ramen als volledig automatisch gestuurde ramen hebben nadelen. Automatisch gestuurde ramen bieden meer energie-efficiëntie, maar gaan vaak ten koste van het comfort, de tevredenheid en productiviteit van



Figuur 1: Foto van het middelste gedeelte van het bouwtechniek-studio. Dit gedeelte was onderdeel van het experiment. De tafelnummers komen overeen met Figuur 2.

aanwezig in een gebouw. Handbediende ramen zorgen voor een hogere verdraagzaamheid van het binnenklimaat en bieden daarmee meer comfort. Het risico op energieverpilling is wel groter bij deze type ramen. Een feedbacksysteem voor handmatige raambediening zou een compromis kunnen zijn waarbij gebruikers de mogelijkheid krijgen om hun comfortbehoeftes te voorzien, en tegelijkertijd geïnformeerd worden over de invloed van raambediening op het binnenklimaat en de energie-efficiëntie met als doel het gedrag van gebruikers te verbeteren. [3] [5]. Echter is het bewijs in de literatuur beperkt tot in welke mate raamfeedbacksystemen in staat zijn om gebruikers te begeleiden naar effectieve raambediening die het binnenklimaat, comfort van gebruikers en de energie-efficiëntie kan bevorderen.

Onderzoeksdoel

Dit onderzoek heeft hoofdzakelijk als doel om bewijs te verzamelen over de effectiviteit van raamfeedbacksystemen ten behoeve van het binnenklimaat, comfort van gebruikers en de energie-efficiëntie. Deze doelstelling is behaald door het uitvoeren van een 6-weeken durende experiment in een kantoortuin, waarbij zowel objectieve en subjectieve data werden verzameld gedurende een bestaande en nieuwe situatie. De bestaande situatie fungeerde als referentie voor de nieuwe situatie waarin het raamfeedbacksysteem werd geïmplementeerd.

Methodologie

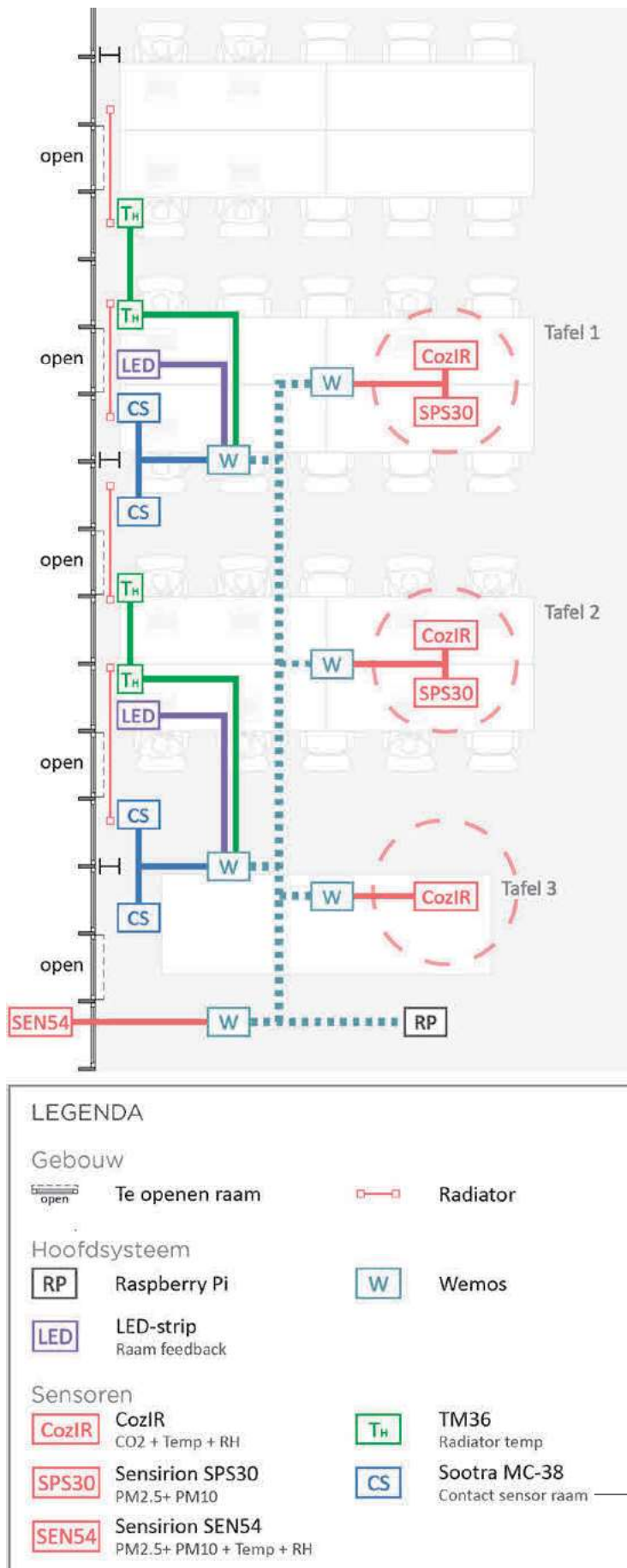
Casusomschrijving

Het experimentele onderzoek werd uitgevoerd in de bouwtechniek-studio van het TU Delft faculteitsgebouw bouwkunde. Deze studio bevindt zich aan de westvleugel op de tweede verdieping en dient als een open werkruimte voor zowel studenten als docenten. De studio karakteriseert zich met een smalle plattegrond, meerdere gevels, een groot aantal kiepramen, internationaal georiënteerde gebruikers en piekniveaus aan bezettingsgraden. De verwarming wordt geregeld door radiatoren en de ventilatie door mechanische toe- en afvoer. De studio heeft geen koelingsysteem. De metingen werden uitgevoerd in het middelste deel van de studio, zoals weergegeven in figuur 1, en vertegenwoordigt een typische open werkruimte.

Experimenteel ontwerp

Objectieve en subjectieve metingen zijn uitgevoerd van 3 tot 21 april 2023 voor de bestaande situatie en van 24 april tot 12 mei 2023 voor de nieuwe situatie. Deze periode werd gekenmerkt door wisselend warm en koud weer met zonnige en regenachtige dagen. Elke dag zijn gegevens verzameld van 9:00 tot 19:00 uur. In het weekend, op feestdagen en incidenteel op andere dagen zijn geen gegevens verzameld. Voorafgaand aan de start van de nieuwe situatie zijn gebruikers geïnformeerd over de implementatie van het raamfeedbacksysteem.

De objectieve metingen dienden om het binnenmilieu in beide situaties te analyseren en te vergelijken. Tot deze metingen behoorde het monitoren van de temperatuur, relatieve vochtigheid (RH) en fijnstof ($PM_{2,5}$ en PM_{10}) voor zowel binnen



als buiten. Aanvullend zijn ook de CO₂-concentratie binnen, de raambediening en het radiatorgebruik gemonitord. De gegevens van de sensoren zijn verzameld door een Raspberry Pi 4 model B en verzonden via een connector, genaamd WeMos D1 mini pro. Deze connector is op elk sensor aangesloten en creëerde samen met de Raspberry Pi een eigen netwerk. Figuur 2 geeft een overzicht van de plaatsing van de sensoren met de bijbehorende parameters. De figuur toont dat de binnentemperatuur, relatieve vochtigheid en CO₂-concentratie zowel op kamerniveau (tafel 3) als tafelniveau (tafel 1 en 2) werden gemeten om een vergelijking tussen beiden mogelijk te maken. De CO₂-sensoren werden op ademhoogte en uit de buurt van ramen geplaatst om onnauwkeurigheden te vermijden.

De subjectieve metingen diende om de perceptie van de gebruikers in beide situaties te analyseren en te vergelijken ten behoeve van de binnenluchtkwaliteit, het thermisch comfort, het raamgebruik en het raamfeedbacksysteem. Ook diende deze metingen om de objectieve metingen te valideren. De subjectieve metingen zijn uitgevoerd in de vorm van enquêtes, waarbij de bestaande situatie 37 respondenten ontving en de nieuwe situatie 22 respondenten.

Ontwerp van het raamfeedbacksysteem

Het ontwerp van het geïmplementeerde raamfeedbacksysteem bestaat uit een algoritme en licht-interface waarvan beiden zijn gebaseerd op literatuuronderzoek. Het licht-interface ontwerp, zoals weergegeven in figuur 3, bestaat uit drie kleuren die worden weergegeven door een verticale LED-strip. De betekenis van de kleuren worden verklaard door een legenda en QR-code.

Het algoritme ontwerp, zoals weergegeven in figuur 4, bestaat uit hiërarchisch gerangschikte domeinen die één of meer parameters bevatten. Deze domeinen omvatten energie, weersomstandigheden,

Figuur 2: Plattegrond met de plaatsing van sensoren, raamfeedbacksystemen en andere hardware met de corresponderende aansluitingen.

binnenluchtkwaliteit, buitenluchtkwaliteit en thermisch comfort. De hiërarchische structuur is gebaseerd op twee ontwerpprincipes:

Principe 1:

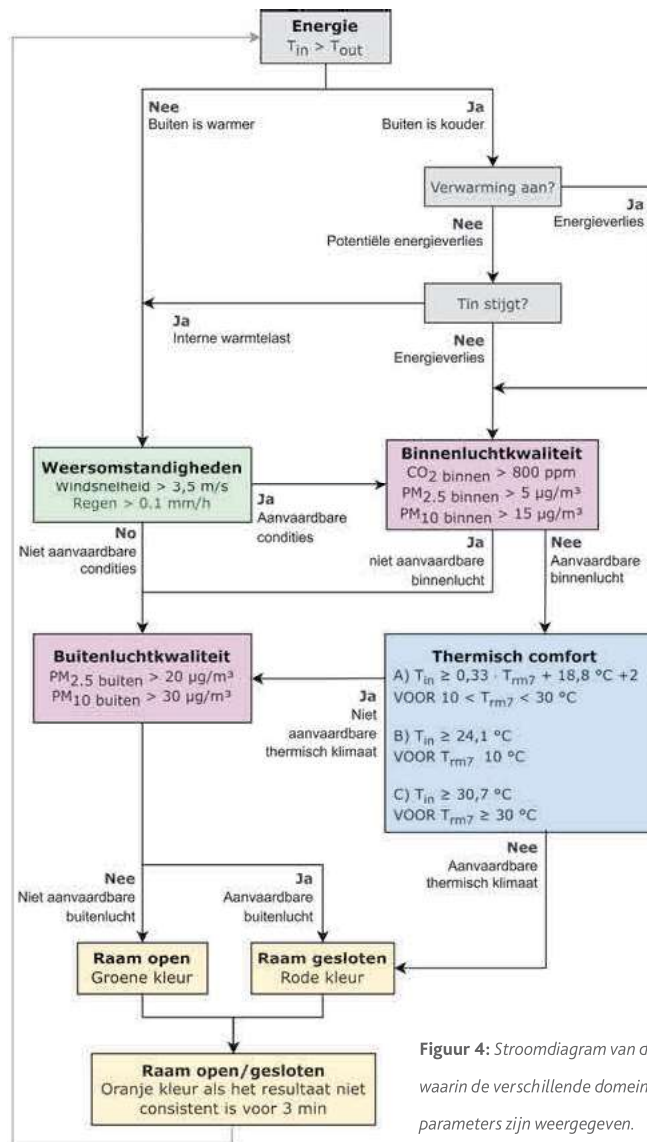
Om de energie-efficiëntie te bevorderen dient het raam gesloten te zijn als het buiten kouder is dan binnen en dient het open te zijn als het buiten warmer is dan binnen. Dit principe geldt niet wanneer de gezondheid of comfort van gebruikers in het geding komt.

Principe 2:

De gezondheid van bewoners is belangrijker dan energie-efficiëntie en het comfort van de bewoners

Hierbij wordt opgemerkt dat principe 1 specifiek is geïntroduceerd voor de context van het experiment en niet representatief is voor gebouwen met airconditioning of perioden van het jaar met hoge buitentemperaturen.

De geselecteerde parameters in de domeinen van het algoritme zijn gebaseerd op de belangrijkste parameters die het bedienen van ramen in kantoren beïnvloeden. Deze parameters omvatten de temperatuur, CO₂-concentratie, fijnstof concentratie, windsnelheid, hoeveelheid regenval en de werking van de verwarming [3] [4] [6] [7]. De binnen- en buitentemperatuur fungeren om de energie-efficiëntie te bepalen en het thermisch comfort te voorspellen volgens het adaptieve model, klasse I dat is geformuleerd in de EN 15251. De CO₂-concentratie fungeert als indicator van ventilatie niveaus en de mogelijke accumulatie



Figuur 4: Stroomdiagram van de algoritme waarin de verschillende domeinen en parameters zijn weergegeven.

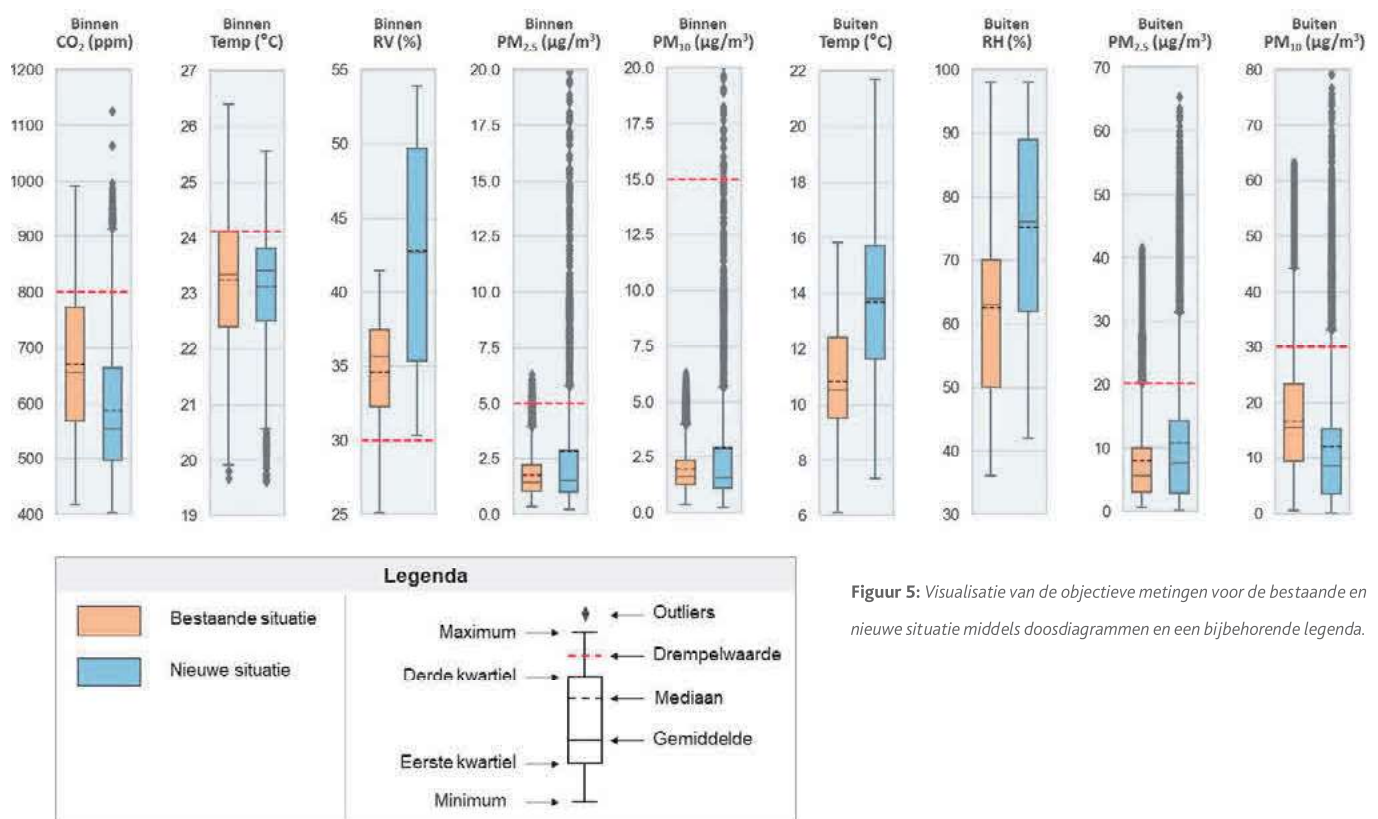
van verontreinigde stoffen. De drempelwaarde van de CO₂-concentratie is in overeenstemming met de ISHREA 10001 en EN 15251 categorie III. De fijnstof concentratie wordt gebruikt als een indicator voor buitenluchtkwaliteit waarbij de drempelwaarde in overeenstemming is met de Wereldgezondheidsorganisatie [8] [9]. De drempelwaarde voor de windsnelheid is gebaseerd op referentie [6].

Beperkingen

Het onderzoek erkent verschillende beperkingen van de methodologie en omvat de aanname dat het



Figuur 3: Ontwerp van het geïmplementeerde raamfeedbacksysteem met bijbehorende legenda en QR-code.



Figuur 5: Visualisatie van de objectieve metingen voor de bestaande en nieuwe situatie middels doosdiagrammen en een bijbehorende legenda.

experimentgebied een microklimaat is dat niet wordt beïnvloed door aangrenzende gebieden. Daarbij is de beperkte duur van het experiment niet voldoende om rekening te houden met seizoensgebonden variaties. Verder ontbreken relevante parameters in de algoritme zoals de zonradiatie, buitenlawaai en stralingstemperatuur. Door het ontbreken van het laatstgenoemde werd de operationele temperatuur benaderd middels de binnentemperatuur. Een andere beperking van de algoritme is dat de buitenluchtkwaliteit hiërarchisch gezien belangrijker is dan de binnenluchtkwaliteit wat niet altijd aan de orde is.

Resultaten en discussie

Bestaande situatie

De objectieve metingen voor de bestaande situatie worden geïllustreerd als oranje doosdiagrammen in figuur 5. Deze oranje doosdiagrammen tonen dat alle parameters van het binnenmilieu de corresponderende drempelwaarde voor een langere tijd overschrijdt met als uitzondering van de PM_{10} -concentratie. De gemiddelde overschrijding per werkdag is in de bestaande situatie 1 h 53 min voor de CO_2 -concentratie, 2 h 19 min voor de binnentemperatuur, 1 h 19 min voor de relatieve vochtigheid binnen en

10 min voor de $PM_{2,5}$ -concentratie binnen. Deze onbevredigende binnenklimaat komt overeen met de subjectieve metingen waarin een meerderheid van de respondenten niet tevreden was met de binnenluchtkwaliteit en het thermische binnenklimaat zoals weergegeven in figuur 6 en 7. Een meerderheid van de respondenten gaf 'zoninstraling' als de belangrijkste reden voor thermisch ongemak, gevolgd door 'verwarmings-/koelingsstelsel reageert niet snel genoeg' en 'te droge lucht'. Overschrijdingen van de binnentemperatuur kunnen worden verklaard door de zoninstraling, buitentemperatuur en een interne warmtelast ten gevolge van een hoge bezettingsgraad. De aangevoelde droge lucht kan worden verklaard door de lage relatieve vochtigheid. Dit zou ook de symptomen 'oogirritatie/ droge ogen', 'neusirritatie' en 'keelpijn' kunnen verklaren die een groot aantal respondenten hebben gerapporteerd.

Verder tonen de objectieve metingen van de bestaande situatie een gemiddelde raamopeningstijd per werkdag van 48 minuten. De subjectieve metingen geven de belangrijkste redenen voor het bedienen van ramen. De belangrijkste redenen voor

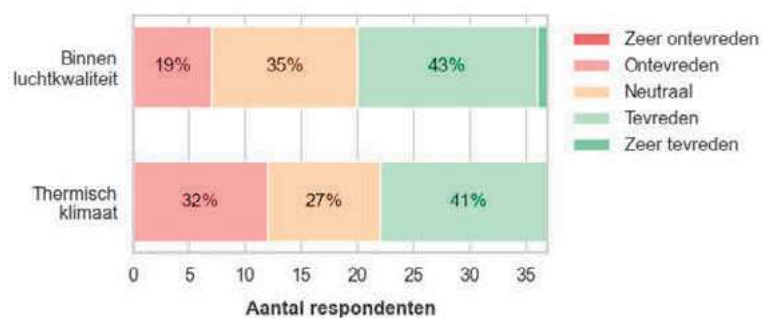
het openen van ramen zijn 'voor frisse lucht', 'om het koeler te hebben', 'voor meer luchtbeweging' en 'om een band met buiten te voelen'. De belangrijkste redenen voor het sluiten van ramen zijn 'om het warmer te hebben', 'de tocht was onaangenaam', 'om het naar binnen regenen te voorkomen' en 'om buitenlawaai te verminderen'. Deze redenen voor het bedienen van ramen komen overeen met de resultaten van referentie [10].

Nieuwe situatie

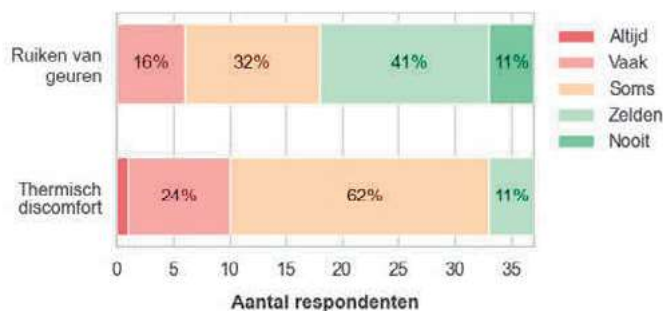
De objectieve metingen voor de nieuwe situatie worden geïllustreerd als blauwe doosdiagrammen in figuur 5. Deze blauwe doosdiagrammen tonen dat alle parameters van het binnenmilieu de corresponderende drempelwaarde voor een langere tijd overschrijdt met als uitzondering van de relatieve vochtigheid. De gemiddelde overschrijding per werkdag is in de nieuwe situatie 38 min voor de CO₂-concentratie, 52 min voor de binnentemperatuur, 1 h 19 min voor de PM_{2,5}-concentratie binnen en 19 min voor de PM₁₀-concentratie binnen. De overschrijdingen van de binnen PM_{2,5}-concentratie en PM₁₀-concentratie kunnen worden gerelateerd aan de hoge fijnstof concentraties buiten en de gemiddelde raamopeningstijd per werkdag van 4 h en 39 min.

Vergelijking van bestaande en nieuwe situatie

Tabel 1 maakt een vergelijking mogelijk tussen de bestaande en nieuwe situatie door de



Figuur 6: Tevredenheidsniveaus van de binnenluchtkwaliteit en het thermisch binnenklimaat in de bestaande situatie.



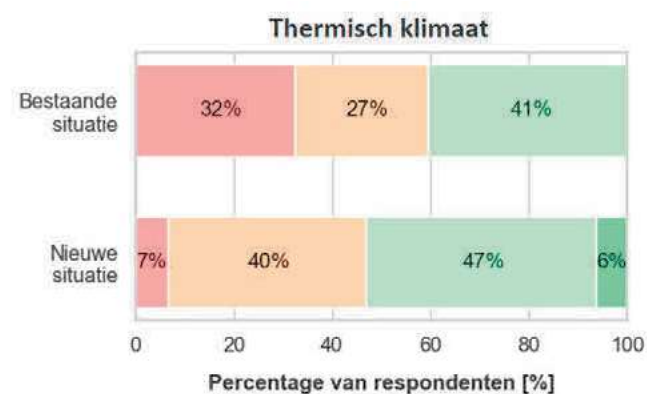
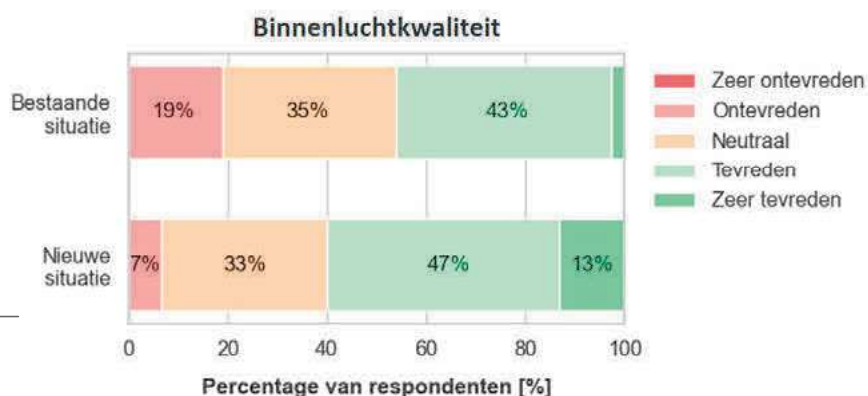
Figuur 7: Frequentie van het ervaren ongemak dat gerelateerd is aan de binnenluchtkwaliteit en het thermische binnenmilieu.

gemiddelde overschrijding per werkdag te tonen voor de gemeten parameters in beide situaties. De tabel toont ook de raamopeningstijd en de niet-effectieve raamopeningstijd als gemiddelde per werkdag. De niet-effectieve raamopeningstijd is gedefinieerd als de tijd waarin de werkelijke raamstand niet overeenkomt met de aanbevolen raamstand van het raamfeedbacksysteem.

| Parameter | overschrijding bestaande situatie [gemiddelde per werkdag] | overschrijding nieuwe situatie [gemiddelde per werkdag] | Ratio [nieuw in relatie tot bestaand] |
|----------------------------------|--|---|---------------------------------------|
| binnen CO ₂ | 1 h 53 min | 38 min | - 66% |
| binnen Temp. | 2 h 19 min | 52 min | - 63% |
| binnen RH | 1 h 43 min | - | - 100% |
| binnen PM _{2,5} | 10 min | 1 h 19 min | + 690% |
| buiten PM _{2,5} | 50 min | 1 h 47 min | + 114 % |
| binnen PM ₁₀ | - | 19 min | - |
| buiten PM ₁₀ | 49 min | 1 h 12 min | + 47% |
| raamopeningstijd | 48 min | 4 h 39 min | + 481% |
| niet-effectieve raamopeningstijd | 2 h 51 min | 1 h 17 min | - 55% |

Tabel 1: Vergelijking tussen de bestaande en nieuwe situatie door de gemiddelde overschrijding per werkdag te tonen voor elke parameter. Ook worden de raamopeningstijd en niet-effectieve raamopeningstijd getoond als gemiddelden per werkdag.

Figuur 8: Vergelijking van de bestaande en nieuwe situatie met betrekking tot het tevredenheidsniveau van de binnenluchtkwaliteit.



Figuur 9: Vergelijking tussen de bestaande en nieuwe situatie met betrekking tot het tevredenheidsniveau van het thermische klimaat.

Tabel 1 toont een verbeterde CO₂-concentratie, binnentemperatuur en relatieve vochtigheid in de nieuwe situatie ten opzichte van de bestaande situatie. Deze verbeteringen komen overeen met de hogere tevredenheidsniveaus ten behoeve van de binnenluchtkwaliteit en het thermisch binnenklimaat zoals weergegeven in figuur 8 en 9. Wel moet worden opgemerkt dat de subjectieve metingen in de nieuwe situatie 15 respondenten minder had ten opzichte van de bestaande situatie. Verder toont tabel 1 ook een verslechtering van de fijnstof concentratie binnen wat gerelateerd kan worden aan de hogere fijnstof concentratie buiten. Alle veranderingen in de nieuwe situatie kunnen worden gerelateerd aan de toegenomen raamopeningstijd dat met factor 4,81 langer is dan in de bestaande situatie.

Verder toont tabel 1 ook dat de niet-effectieve raamopeningstijd in de nieuwe situatie is gereduceerd met 55%, ondanks de hogere fijnstof concentratie binnen. Dit suggereert een verbetering van het raamopeningsgedrag, dat kan worden verklaard door het raamfeedbacksysteem. Volgens de subjectieve metingen van de nieuwe situatie had

het raamfeedbacksysteem een significante invloed op het verbeterde raamopeningsgedrag. Een meerderheid van de respondenten gaven aan dat zij het systeem begrijpen, actie ondernemen aan de hand van raamfeedback en tevreden zijn met de implementatie van het systeem. Bovendien gaf een meerderheid van de respondenten aan vertrouwen te hebben in het systeem en het vermogen om de binnenluchtkwaliteit, het thermisch klimaat, de energie-efficiëntie en de sociale interactie tussen gebruikers te verbeteren. Wel dient rekening gehouden te worden met de hogere buitentemperaturen in de nieuwe situatie. Dit kan een andere belangrijke reden zijn geweest voor de langere openingstijden van de ramen.

Conclusie

Door het uitvoeren van een experiment is onderzocht tot in welke mate raamfeedbacksystemen in staat zijn om het binnenklimaat en de tevredenheid van gebruikers te verbeteren. Het experiment werd uitgevoerd in de bouwtechniek-studio van het TU Delft faculteitsgebouw bouwkunde en duurde 6 weken. In de eerste drie weken van deze periode werd de bestaande situatie geanalyseerd. In de resterende 3 weken werd een raamfeedbacksysteem met een licht-interface geïmplementeerd om de invloed ten opzichte

van de bestaande situatie te bepalen. Er werden zowel objectieve en subjectieve metingen uitgevoerd tijdens de bestaande en nieuwe situatie.

Voor de bestaande situatie tonen de objectieve metingen aan dat het binnenklimaat op verschillende aspecten kan worden verbeterd, waaronder de temperatuur, de relatieve vochtigheid, de CO₂-concentratie en de fijnstof concentratie. Dit komt overeen met de subjectieve metingen waarin een meerderheid van de respondenten ontevreden was over de binnenluchtkwaliteit en het thermisch klimaat.

Voor de nieuwe situatie tonen de objectieve metingen aan dat het binnenklimaat is verbeterd ten opzichte van de bestaande situatie. De raamopeningstijd nam met 481% toe, terwijl de niet-effectieve raamopeningstijd met 55% afnam. De binnentemperatuur, relatieve vochtigheid en CO₂-concentratie verbeterden in de nieuwe situatie en de fijnstof concentratie verslechterde. Alle veranderingen kunnen worden gerelateerd aan de toegenomen raamopeningstijd.



→ Serhan Yuksel vertegenwoordigde Nederland tijdens de REHVA Student Competition. Deze wedstrijd voor onderzoek op het gebied van verwarming, ventilatie en airconditioning moedigt studenten aan bij te dragen aan een duurzame toekomst voor de aarde. De REHVA Student Competition 2024 vond plaats tijdens de REHVA Annual Meeting van 15 t/m 17 mei in Istanbul.

Referenties

1. Buso, T., Fabi, V., Andersen, R. K., & Corgnati, S. P. (2015). Occupant behaviour and robustness of building design. *Building and Environment*, 94, 694–703. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.003>
2. Mahdavi, A., et al. (2021). The Role of Occupants in Buildings' Energy Performance Gap: Myth or Reality? *Sustainability*, 13(6), 3146. <https://doi.org/10.3390/su13063146>
3. Day, J. K., et al. (2020). A review of select human-building interfaces and their relationship to human behavior, energy use and occupant comfort. *Building and Environment*, 178, 106920. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106920>
4. Liu, Y., et al. (2022). Rethinking the limitations of research on occupants' window-opening behavior: A review. *Energy and Buildings*, 277, 112552. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112552>
5. Bordass, B., Leaman, A., & Bunn, R. (2007). *Controls for End Users: A guide for good design and implementation*.
6. Fabi, V., Andersen, R. V., Corgnati, S., & Olesen, B. W. (2012). Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models. *Building and Environment*, 58, 188–198. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.07.009>
7. Fabi, V. (2013). Influence of Occupant's Behaviour on Indoor Environmental Quality and Energy Consumptions. In *A Roadmap to predict the unpredictable energy-related occupant behaviour*.
8. Abdul-Wahab, S. A., Chin Fah En, S., Elkamel, A., Ahmadi, L., & Yetilmezsoy, K. (2015). A review of standards and guidelines set by international bodies for the parameters of indoor air quality. *Atmospheric Pollution Research*, 6(5), 751–767. <https://doi.org/10.5094/apr.2015.084>
9. World Health Organization [WHO]. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. WHO
10. Ackerly, K., & Brager, G. (2013). Window signalling systems: control strategies and occupant behaviour. *Building Research & Information*, 41(3), 342–360. <https://doi.org/10.1080/09613218.2013.772044>