

Document Version

Final published version

Licence

Dutch Copyright Act (Article 25fa)

Citation (APA)

Tenpierik, M. J. (2025). Klimaat-responsieve en -adaptieve bouwsystemen. *Bouwfysica Blad*, 2025(3), 24-26.

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

In case the licence states "Dutch Copyright Act (Article 25fa)", this publication was made available Green Open Access via the TU Delft Institutional Repository pursuant to Dutch Copyright Act (Article 25fa, the Taverne amendment). This provision does not affect copyright ownership.
Unless copyright is transferred by contract or statute, it remains with the copyright holder.

Sharing and reuse

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

KLIMAAT-RESPONSIEVE EN -ADAPTIEVE BOUWSYSTEMEN

Op 18 februari 2025 is Martin Tenpierik benoemd tot hoogleraar Bouwfysica aan de faculteit Bouwkunde van de TU Delft. Dit stuk is geschreven naar aanleiding hiervan en geeft enkele van de belangrijke uitdagingen binnen het vakgebied voor de komende jaren weer. Op 6 maart 2026 om 15 uur zal zijn intreedende plaatsvinden in de Aula van de TU Delft.



prof.dr.ir. M.J. (Martin) Tenpierik, Faculteit Bouwkunde, TU Delft

KLIMAAT-INSENSITIEVE EN -COMBATTIEVE GEBOUWEN

Naar verluidt presenteerde Willis Carrier op 17 juli 1902 het eerste moderne airconditioningsysteem. In de loop der tijd zijn deze systemen steeds verder doorontwikkeld, zodanig dat zij voor vrijwel alle gebouwen een comfortabel binnenklimaat kunnen realiseren. Het gevolg hiervan was dat er gebouwen ontworpen konden worden die geen rekening hielden met de lokale klimaatomstandigheden, en dat er in die gebouwen veel energie nodig was om een comfortabel binnenklimaat te creëren binnen strak gedefinieerde comfortgrenzen. Hierdoor ontstonden gebouwen die klimaat-insensitief waren.

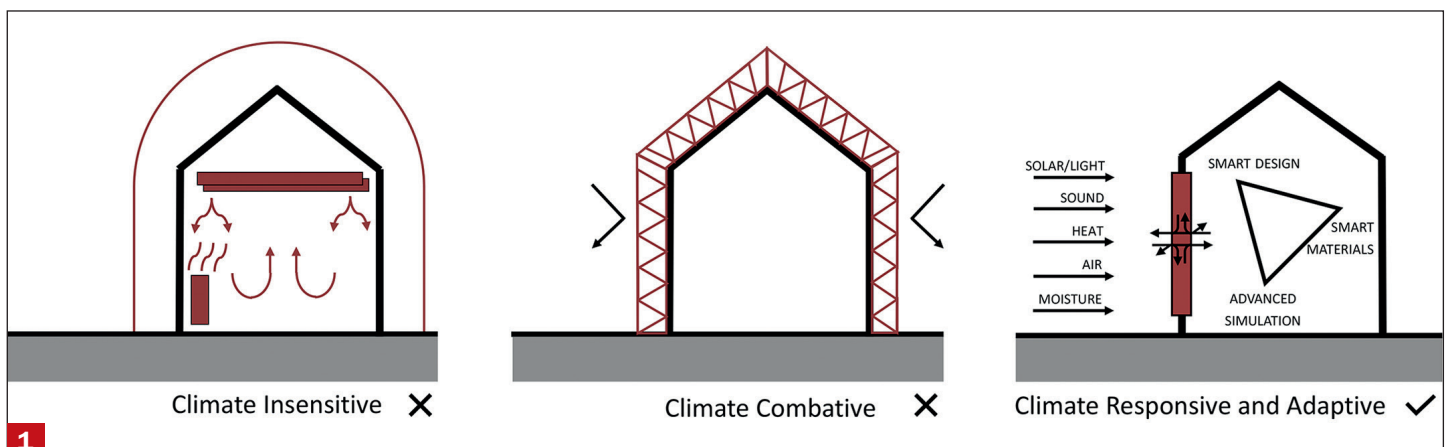
Sinds de jaren '70 en '80 van de 20^{ste} eeuw werd mede als gevolg van diverse oliecrises wetgeving op het gebied van energiezuinigheid van gebouwen ingevoerd, hetgeen in eerste instantie leidde tot regels voor de hoeveelheid thermische isolatie. Deze regels werden in de loop der jaren steeds uitgebreider en vormden de huidige BENG-eisen. Gebouwen in Nederland werden daardoor voorzien van een dikke isolatielaag, werden steeds luchtdichter en werden voorzien van geavanceerde installatiesystemen. De klimaat-combattieve gebouwen die hierdoor ontstonden waren een stuk energiezuiniger, maar velen hebben een aanzienlijke koellast of een hoog risico op oververhitting.

Dit risico op oververhitting wordt de komende decennia als gevolg van klimaatverandering alleen maar groter, met een steeds groter wordende koellast tot gevolg. Het meest recente *emissions gap report* van de UNEP uit oktober

2024 gaat uit van een gemiddelde mondiale temperatuurstijging aan het einde van deze eeuw van tussen de 2,6 en 3,1 °C, uitgaande van de huidige beloften van overheden om de uitstoot van broeikasgassen te reduceren [1]. De meest recente klimaatscenario's van het KNMI uit 2023 gaan voor Nederland uit van een jaargemiddelde temperatuurstijging in het jaar 2100 van 0,9 °C in het lage scenario tot 4,4 °C in het hoge scenario [2].

KLIMAAT-RESPONSIEVE EN -ADAPTIEVE GEBOUWEN

De landen binnen de Europese Unie hebben afgesproken in de Europese Klimaatwet om in 2050 klimaatneutraal te zijn [3]. De meest recente versie van de EPBD (Directive on the Energy Performance of Buildings EU/2024/1275) [4] stuurt aan op zogenaamde Nul-Emissie Gebouwen in 2050. Om daadwerkelijk te komen tot Nul-Emissie Gebouwen die ook gezond en comfortabel zijn, is meer nodig dan de huidige stand der techniek kan bieden; met name de laatste stappen in de verduurzaming van gebouwen zullen steeds moeilijker worden. Dit vereist een (nog) sterkere nadruk op bouwfysica en bouwfysische principes tijdens het ontwerpproces, al vanaf de eerste fases, om gebouwen te ontwerpen die klimaat-responsief en -adaptief zijn (figuur 1). Met klimaat-responsief wordt bedoeld: snel (op een passieve manier) reagerend op korte-termijn fluctuaties in omgevingscondities. En met klimaat-adaptief wordt bedoeld: langzaam reagerend op lange-termijn veranderingen in de omgevingscondities zoals klimaatverandering, ofwel voorbereid zijn op klimaatverandering. In 2017 heeft Looman in zijn proefschrift al een belangrijke basis gelegd met principes voor klimaat-responsief ont-



Klimaat-insensitieve en klimaat-combattieve gebouwen versus klimaat-responsieve en -adaptieve gebouwen.

werpen voor gematigde klimaten [5]. Daarnaast zijn er in die periode ook andere activiteiten geweest die een belangrijke rol hebben gespeeld zoals de IEA ECBCS Annex 44 [6] en de COST Action 1403 Adaptive Facade Network [7].

KLIMAAT-RESPONSIEVE EN -ADAPTIEVE BOUWSYSTEMEN

Dergelijke gebouwen zullen ook gebruikmaken van klimaat-responsieve en -adaptieve bouwsystemen (CRABS). CRABS zijn delen van een gebouw (gevel, dak, vloer, binnenwanden, etc) die ontworpen interacties aangaan met de energie- en massastromen (warmte, geluid, licht, vocht, lucht) binnen en buiten het gebouw. Denk daarbij bijvoorbeeld aan Trombe wanden (figuur 2), warmte-bufferende gevels, schakelbare isolatie, *smart glass* (figuur 3), slimme natuurlijke ventilatie door gevels, en slimme coatings. Als passieve klimatisering vormen zij een belangrijke intermediair tussen het binnen- en buitenklimaat. Geavanceerde simulatie-, optimalisatie- en AI-technieken en ontwikkelingen op het gebied van materiaaltechnologie maken het mogelijk om nieuwe CRABS te ontwikkelen en te optimaliseren. Hierin zullen slimme materialen, geavanceerde simulatiemethoden en slimme ontwerpconcepten een rol spelen.

RESPONSIEVE MATERIALEN EN BOUWCOMPONENTEN

Nieuwe, slimme materialen en componenten zijn essentieel voor CRABS. Slimme materialen, ofwel *smart* of *responsive materials*, zijn ontworpen materialen met een eigenschap of eigenschappen die op een gecontroleerde manier kan of kunnen veranderen op basis van veranderingen in externe stimuli. Veel huidige materialen en componenten hebben onveranderlijke eigenschappen en reageren niet op dagelijkse en seizoensgebonden klimatologische fluctuaties. Zo heeft thermische isolatie een constante thermische weerstand gedurende het hele jaar, terwijl idealiter in een gematigd klimaat een hoge weerstand in de winter vereist zou zijn, maar onder bepaalde omstandigheden in de zomer een lagere. Slimme materialen bieden de mogelijkheid om gevels te herontwerpen als passieve thermische regelementen, die reageren op korte-termijn en lange-termijn (micro)klimaatvariaties. Voorbeelden hiervan zijn faseveranderingsmaterialen, coatings met een hoge reflectie in het zonnenspectrum en een hoge emissie in het midden-infraroodbereik, schakelbare thermische isolatie en speciale glastypen. Voor dergelijke bouwcomponenten is het verband tussen de responstijd, de stimulus, de geometrie en de uiteindelijke prestaties belangrijk. Ook op het vlak van de akoestische materialen zijn er belangrijke ontwikkelingen in onderzoek, waaronder zogenaamde akoestische meta-materialen waarvan het absorptiespectrum precies afgestemd kan worden op de specifieke situatie (figuur 4).

GEAVANCEERDE SIMULATIEMETHODEN

Gedetailleerde prestatie-evaluaties van nieuwe CRABS ontbreken echter veelal, vooral wanneer ze gecombineerd worden en er synergetische of conflicterende effecten worden verwacht. Bovendien moeten voor veel slimme materialen nog simulatiemodellen worden doorontwikkeld en geïntegreerd in gebouwsimulatiemodellen om gedetailleerde prestatieanalyses mogelijk te maken. Belang-

rijke ontwikkelingen binnen het vakgebied zijn het modelleren en koppelen van meerdere schaalniveaus (multi-scale) en meerdere domeinen (multi-domain) om tot gedetailleerde geïntegreerde ontwerp oplossingen te komen. Hierin kunnen ook nieuwe ontwikkelingen op het gebied van kunstmatige intelligentie (AI), surrogaatmodellen en optimalisatie-algoritmes een rol spelen. Deze kunnen ook een rol spelen in het versnellen van simulatieprocessen, hetgeen ook voor de bouwfysische praktijk interessant kan zijn. En daarnaast zullen we ook meer rekening moeten houden met onzekerheden als gevolg van onbekende inputvariabelen, klimaatverandering en ontwerp- en bouwkeuzes. Daar kunnen onder andere probabilistische simulatiemethoden een belangrijk rol in spelen. Dit is bijvoorbeeld heel waardevol bij het analyseren van welke isolatiematerialen toegepast kunnen worden bij na-isolatie van historische gebouwen, waarbij minimalisatie van het risico op vochtschade een belangrijke rol speelt.

SLIMME ONTWERPMETHODEN

Klimaatverandering en de steeds strenger wordende eisen op het gebied van energiezuinigheid, comfort en gezondheid vragen dat wij steeds slimmer gaan ontwerpen, zowel bij nieuwbouw als bij renovatieprojecten en monumenten, en daarbij rekening houden met de energie- en massastromen in en rondom onze gebouwen. Ook bij historische gebouwen zijn er nog diverse vragen over hoe



2 Een moderne Trombe wand op basis van faseveranderingsmateriaal, ontwikkeld binnen het Double Face 2 project aan de TU Delft.



3

Electrochrom glas zoals onderzocht in het Windows to the Future project aan de TU Delft.



4

Geluidabsorberende wand op basis van kwart-golfenlengte-buizen, ontwikkeld binnen het ADAM project aan de TU Delft.

deze het beste verduurzaamd kunnen worden, waarbij ontwikkelingen omtrent zogenaamde capillair actieve isolatiematerialen een rol kunnen spelen. Bouwfysica krijgt daarom een steeds belangrijker rol in de vormgeving van nieuwe gebouwen en bij de renovatie van bestaande gebouwen. Welke nieuwe ontwerpmethodes zijn nodig om niet alleen integraal te ontwerpen, wat nu al vaak gebeurt, maar bouwfysica leidend te laten worden in de vormgeving van het gebouw? Gelukkig gebeurt er in de Nederlandse praktijk al heel veel goeds.

BESLUIT

De komende jaren zal er steeds meer aandacht nodig zijn voor het vakgebied om onze nieuwe en bestaande gebouwen voor te bereiden op de zogenaamde Nul-Emissie Gebouwen doelstelling en klimaatneutraliteit in 2050. Gebouwen zullen sterk ontworpen moeten worden vanuit de energie- en massastromen binnen en buiten. Daarin zullen nieuwe slimme materialen en bouwdeelen, geavanceerde simulatiemethoden en slimme ontwerpmethodes een rol spelen, op alle deelgebieden van de bouwfysica. Wat dat betreft gaan we een interessante tijd tegemoet. ■

BRONNEN

- ▶ [1] United Nations Environment Programme (2024), Emissions Gap Report 2024: No more hot air ... please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments, Nairobi, <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/46404>.
- ▶ [2] KNMI (2023), Kerncijfers KNMI'23, data, <https://klimaatscenario-data.knmi.nl/kerncijfers>
- ▶ [3] EU (2021), Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('European Climate Law'), Official Journal of the European Union, <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2021/1119/oj>
- ▶ [4] EU (2024), Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast), Official Journal of the European Union, <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj>
- ▶ [5] Looman, R.H.J. (2017), Climate-responsive design: A framework for an energy concept design-decision support tool for architects using principles of climate-responsive design, PhD dissertation, TU Delft, Delft.
- ▶ [6] Heiselberg (ed.) (2009), IEA ECBCS Annex 44 Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings - Expert Guide - Part 1 Responsive Building Concepts, https://iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annex_44_Expert_Guide_RBC.pdf.
- ▶ [7] Luible, A., Overend, M., Aelenei, L., Knaack, U., Perino, M. & Wellershoff, F. (2015), Adaptive Façade Network - Europe, Delft: TU Delft Open, https://tu1403.eu/wp-content/uploads/2015_Posterbook-WEB.pdf