

OPENBARE RAPPORTAGE

IEBB- INTEGRALE ENERGIETRANSITIE BESTAANDE BOUW

Eindrapport deelproject 3.1.6

Renovatieoplossingen door regulerende gebouwschil

Referentie: TEUE919003

Subsidieregeling: Meerjarig Missiegedreven Innovatie Programma

Datum: 12-01-2021

Aantal pagina's: 25

Auteurs: Jonathan van den Ham (TNO)

Roel Loonen (TU Eindhoven)

Rapportnummer: R10268



Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van het consortium Integrale Energietransitie Bestaande Bouw.

Samenvatting

Introductie

Om energierenovatie te versnellen zijn eenvoudige en goedkopere oplossingen nodig dan reguliere (gevel) isolatiestrategieën. Een dynamische gebouwschil kan hierin voorzien, zonder zware isolatiemaatregelen. Door zonlicht direct te benutten voor verwarming, en warmte actief kwijt te raken in de warme periode van het jaar, kan deze gevel ingezet worden om direct de vraag naar energie terug te dringen. Echter moet een adaptieve façade wel aanpasbaar zijn aan een dynamisch klimaat. Zo is er in de zomer een sterkere koelvraag dan in de winter, en het tegenovergestelde is waar voor de warmtevraag. Middels adaptieve façades kan vraag naar zowel warmte (zonlicht absorptie) als koelvraag (reflectie) geadresseerd worden. Aangezien er naar schatting 40% van het totale energieverbruik in de westerse wereld verbruikt wordt in en door gebouwen, is het besparingspotentieel van een slimme absorptie of reflectie van zonlicht middels adaptieve façades enorm. Er is echter weinig bekend in hoeverre er technologieën, materialen en methoden beschikbaar zijn om een dergelijk concept te bereiken.

Doelstelling

De doelstelling van dit project is daarom om i) in kaart te brengen wat de potentie van adaptieve façades voor woning verduurzaming in het Nederlandse klimaat (door middel van simulaties) en ii) technologie en materialen te beoordelen, selecteren en door te ontwikkelen om dit in praktijk te kunnen brengen.

Resultaten

Simulaties op gebouw niveau zijn uitgevoerd om aan te geven wat de maximale besparing is, en in hoeverre deze door state-of-the-art technologieën bereikt zouden kunnen worden. Hieruit blijkt dat de technologie van adaptieve façades vooral geschikt is voor renovatie van woningen met lagere energie labels, waarbij besparing voor gevels kan variëren van 3% (R6) tot 23% (R0). Vervolgens is onderzocht hoe dergelijke besparingen in praktijk gebracht zouden kunnen worden door een technologie review, gekoppeld met een technologie screening van enkele veelbelovende technologieën voor schakelende coatings. Hieruit blijkt dat thermo en elektro-geïnduceerde materialen de meeste potentie hebben voor de applicatie. Simulaties geven echter aan dat omgevingsonafhankelijk schakelen, wat alleen mogelijk is met elektro-geïnduceerde technologieën, de meeste potentie hebben om energiebesparing te bereiken in het Nederlandse klimaat. Vandaar dat verdere ontwikkeling van het concept in het laatste deel van het project hierop gestoeld is.

Bijdrage MMIP doelstellingen

MMIP 3, deelthema 1 (Ontwikkeling van integrale renovatieconcepten) middels:

- Directe bijdrage aan aardgasvrije verwarming *en* koeling door zoninstraling slim in te zetten;
- Toepasbaar op veel geveldelen (muren, daken) en diverse woningtypen alsmede utiliteitsbouw;
- Integraal energiegevel concept te combineren met nieuwe / bestaande isolatie, warmtewingeverlating of intelligente warmte productie.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
1 Programma IEBB	4
1.1 Inbedding in programma IEBB	4
1.2 Impact	4
1.3 Leeswijzer.....	4
2 Project gegevens	6
3 Inhoudelijk eindrapport	7
3.1 Inleiding.....	7
3.2 Doelstelling	8
3.3 Werkwijze	8
3.4 Resultaten	11
3.4.1 Resultaat 1: simulaties besparingspotentieel statische en schakelende gevels (TU/e).....	11
3.4.2 Resultaat 2 – Review screening en conceptontwikkeling	14
4 Uitvoering van het project	16
4.1 De problemen (technisch en organisatorisch) die zich tijdens de uitvoering van uw plan hebben voorgedaan en de wijze waarop deze problemen zijn opgelost	16
4.2 Toelichting op wijzigingen ten opzichte van het plan.....	16
4.3 Toelichting op de verschillen tussen de begroting en de werkelijk gemaakte kosten.	16
4.4 Toelichting wijze van kennisverspreiding	16
5 Conclusies leerpunten en aanbevelingen	18
5.1 Conclusies	18
5.2 Leerpunten.....	18
5.3 Aanbevelingen	18
6 Literatuur	19

1 Programma IEBB

1.1 Inbedding in programma IEBB

Het consortium Integrale Energietransitie Bestaande Bouw heeft als ambitie het haalbaar, betaalbaar en schaalbaar 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).

Dit deelproject maakt onderdeel uit van thema 1. Samenhang met andere project kan gemaakt worden middels warmtenetwerken, waarbij adaptieve gevels met relatief lage kosten een gebouw op gewenste energieverbruik / label kan brengen.

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 Impact

- Aantal technieken dat ontwikkeld/getest is binnen deelproject
Dit staat in de vertrouwelijke versie van dit rapport.
- Mogelijke behaalde kostenreductie met resultaten deelproject
Tot 23% op energierekening (gas en elektra) voor eindgebruiker.
- Benoem hoger wooncomfort
Thermisch comfort stijgt bij implementatie van dit concept, vooral tijdens de zomerperiode bij afwezigheid van actieve koeling in gebouw (bv. Airconditioning)
- Aantal terugkoppelingen/inzichten tot aanpassingen
Dit staat in de vertrouwelijke versie van dit rapport.
- Aantal overleggen die hebben plaatsgevonden
11 overleggen (maandelijks, eenmaal niet vanwege zomervakantie)
- Aantal bedrijfsbezoeken
2 in combinatie met overleg (TNO en TU Eindhoven). Bezoek AkzoNobel was niet mogelijk i.v.m. Corona.
- Aantal onderzoeksrapporten/ publicaties
4 onderzoeksrapporten (4 deliverables), 1 ingestuurde publicatie (29-1-2021 nog onder review) en 1 publicatie in voorbereiding.

1.3 Leeswijzer

De structuur van de eindrapportage van dit deelproject is sterk gestoeld op de deliverables van het project, namelijk:

- D1.1: simulaties betreffende besparingspotentieel adaptieve gevels (Rapport TU Eindhoven)
- D2.1: technologie review betreffende schakelbare coating technologieën (TNO 2020 R11077)
- D2.2: technologie screening commerciële schakelbare coating technologieën (TNO 2021 R10069)
- D3.1: conceptontwikkeling en doorontwikkeling schakelbare coatings voor adaptieve façades. (TNO 2021 R10070)

Bespreking van de resultaten volgt deze structuur. Aangezien alle activiteiten en deliverables een sterke samenhang vertonen zijn er veel onderlinge verbanden (interne referenties worden benoemd) en is een algehele conclusie en bijdrage aan de Nederlandse markt besproken voor het gehele concept, c.q. alle deelresultaten.

2 Project gegevens

- Projectnummer: TEUE919003
- Titel deelproject: Dunnere en goedkopere renovatieoplossingen door regulerende huidafwerking van de gebouwschil
- Penvoerder en medeaanvragers: TNO, AkzoNobel, Technische Universiteit Eindhoven
- Uitvoeringsperiode: 01-01-2020 t/m 31-12-2020

3 Inhoudelijk eindrapport

3.1 Inleiding

Nederland heeft zich, middels de klimaatconferentie van 2015 (COP21) in Parijs, tot doel gesteld om CO₂ emissies sterk terug te dringen om klimaatverandering en daarbij behorende zeespiegelstijging te beperken. In de gebouwde omgeving heeft dat veel invloed, omdat de gebouwde omgeving naar schatting verantwoordelijk is voor 40% van het totale energie gebruik (in EU en V.S.) [1]. Een groot deel hiervan gaat op aan het verwarmen en koelen van gebouwen. Energie-efficiëntere gebouwen zijn daarom essentieel om beoogde doelen te halen. Renovatie, en dan vooral het verhogen van energieprestaties van bestaande bouw, is hierbij een speerpunt. De klassieke methode van isoleren laat echter te wensen over als het gaat om snelheid van implementatie en kosten-efficiëntie om de warmtevraag terug te dringen. Daarnaast is er als gevolg van een veranderd klimaat een toenemende koelvraag met bijbehorend (hoog) energieverbruik in de zomer (airconditioners).

Renovatie strategieën

Om renovatie snelheid te verhogen is het van belang het juiste pakket van maatregelen te kiezen. Dit betekent keuzes t.a.v. renovaties van dak (vervangen of isoleren), kozijnen, glas, gevel (spouwmuurisolatie / ETICS / prefab elementen), isolatie van kruipruimte. Naast deze bouwkundige maatregelen is keuze van het energetisch systeem (verwarmen en koelen) van groot belang, denk hierbij aan warmtewisseling en warmtepompoplossing. Een van de dure maatregelen is het toepassen van buitenisolatie, in het geval van isolatie met afwerking ETICS en prefab houtskeletbouw gaan prijzen snel richting 100 – 200 €/m². Om tot effectievere oplossingen te komen, is het van belang anders tegen de gebouwschil aan te kijken. Klassiek wordt de gebouwschil als statisch gezien, waarbij meer isolatie betere energieprestaties leveren.

Schakelende gevels

Statische, reflectieve coatings worden regelmatig ingezet in warme klimaten om koelvraag te reduceren, zoals 'KeepCool' en 'Sunreflect' coatings van van AkzoNobel. Een dergelijke coating kan tot 10% energiebesparing leiden [2]. Nader onderzoek naar schakelende gevelsystemen aan de TU Eindhoven geeft aan dat 'ideaal schakelbare gevelsystemen' een enorme energie besparingen tot wel 40% kunnen realiseren voor slecht geïsoleerde kantoorgebouwen in Nederland in de wintermaanden [3]. Bij TNO werden berekeningen gedaan aan een 'niet-ideaal' systeem, waarbij schakelbare thermisch-schakelbare een reductie van 8% warmtevraag en 90% aan koelvraag konden realiseren ten opzichte van een bakstenen gevel.

Om de totale impact van schakelbare gevels nader te onderzoeken is binnen dit project een uitgebreid simulatie raamwerk opgezet om mogelijke energiebesparing van schakelende gevels (voor rijtjeshuizen) zo goed mogelijk in kaart te brengen. In werkpakket 1 is een uitgebreide analyse gedaan van om in te schatten hoeveel energie er bespaard kan worden en welke geselecteerde technologieën de meeste impact zouden kunnen hebben.

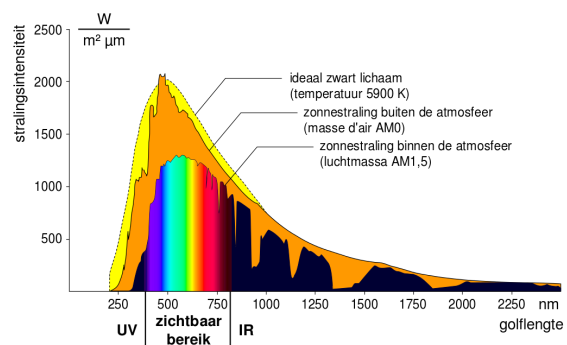
Belang van een schakelende gebouwschil

Onder invloed van omgevingsfactoren of elektronische impuls, wordt de gevel donker (hoge absorptie) waardoor de zoninstraling omgezet kan worden om de woning op warmen. Tevens kan

het omgekeerde worden bereikt; door te schakelen naar een licht gekleurde gevel (lage absorptie) kan warmteopbouw als gevolg van zoninstraling voorkomen worden. Er zijn diverse mogelijkheden om dit in praktijk te brengen, wat in WP2 uitvoerig aan bod zal komen. Binnen dit project is breed gekeken, maar de volgende hoofd technologieën zijn uitgebreid aan bod gekomen:

- Foto-geïnduceerd schakelen, waarbij mate van licht instraling een schakeling kan veroorzaken;
- Thermo- geïnduceerd schakelen, waarbij temperatuur van de (buiten)gevel een schakeling veroorzaakt;
- Humido-geïnduceerd; waarbij luchtvochtigheid verantwoordelijk is voor de schakeling;
- Elektro-geïnduceerd; hierbij kan een elektronisch signaal de gevel doen schakelen.

Figuur 1 laat het zonnenspectrum zien met drie potentieel te schakelende gebieden; UV (niet zichtbare hoogenergetische zonstraling), VIS (visueel / zichtbaar zonlicht), NIR (nabij infrarood, niet zichtbaar licht). Al deze regionen kunnen samen of afzonderlijk geschakeld worden, afhankelijk van gekozen technologie. De mate van schakeling is uitgedrukt in TSA (Total Solar Absorption) of TSR (Total Solar Reflection), afhankelijk van de configuratie van de materialen / coatings. Afzonderlijke technologieën schakelen op allerlei golflengten, waarbij grote verschillen bestaan tussen de totale schakelwaarden. Gekoppeld aan het mechanisme van schakelen (licht, temperatuur, luchtvochtigheid, elektronisch signaal) zal de totale impact op het energie verbruik sterk variëren.



Figuur 1: Zonnenspectrum op aardoppervlakte.

3.2 Doelstelling

Doel van het IEBB 3.1.6 project is i) om in kaart te brengen hoeveel gekleurde, statische gevels en schakelbare gevels zouden kunnen besparen, ii) welke technologieën het meest geschikt is voor het creëren van een schakelbare gevel en iii) een mogelijkheid tot doorontwikkeling van dit concept uiteen te zetten.

3.3 Werkwijze

Algemene strategie

Binnen dit project is gekozen voor een strategie die simulaties combineert met experimentele gegevens om totale impact van technologieën in te schatten. Dit komt naar voren in de structuur van de werkpakketten, namelijk:

1. Inschatten van mogelijk potentieel middels simulaties. Dit omvat totaal potentieel, maar ook technologie specifieke berekening over het te verwachten resultaat (WP1).
2. Onderzoeken welke technologieën mogelijk zijn middels literatuur en patent studies, om vervolgens een selectie te onderwerpen aan een experimentele screening (WP2)
3. Ontwikkelingen van een concept op basis van (aangepaste) commerciële technologieën, hierbij zal worden uitgegaan van de uitkomsten van simulaties en experimentele data uit eerdere werkpakketten (WP3).

Parallel aan de ontwikkeling van de simulaties is een technologie overzicht gemaakt, waarbij belangrijke aspecten van de technologie (schakelwaarde, drempelwaarden, kosten, levensduur) in kaart zijn gebracht. Hieruit is een top 5 van technologieën naar voor gekomen die verder uitgewerkt is in de technologie screening, waarbij commerciële materialen gevalideerd zijn op lab niveau. Tot slot is er technologie ontwikkeling gedaan om bepaalde technologieën te verbeteren voor deze specifieke toepassing.

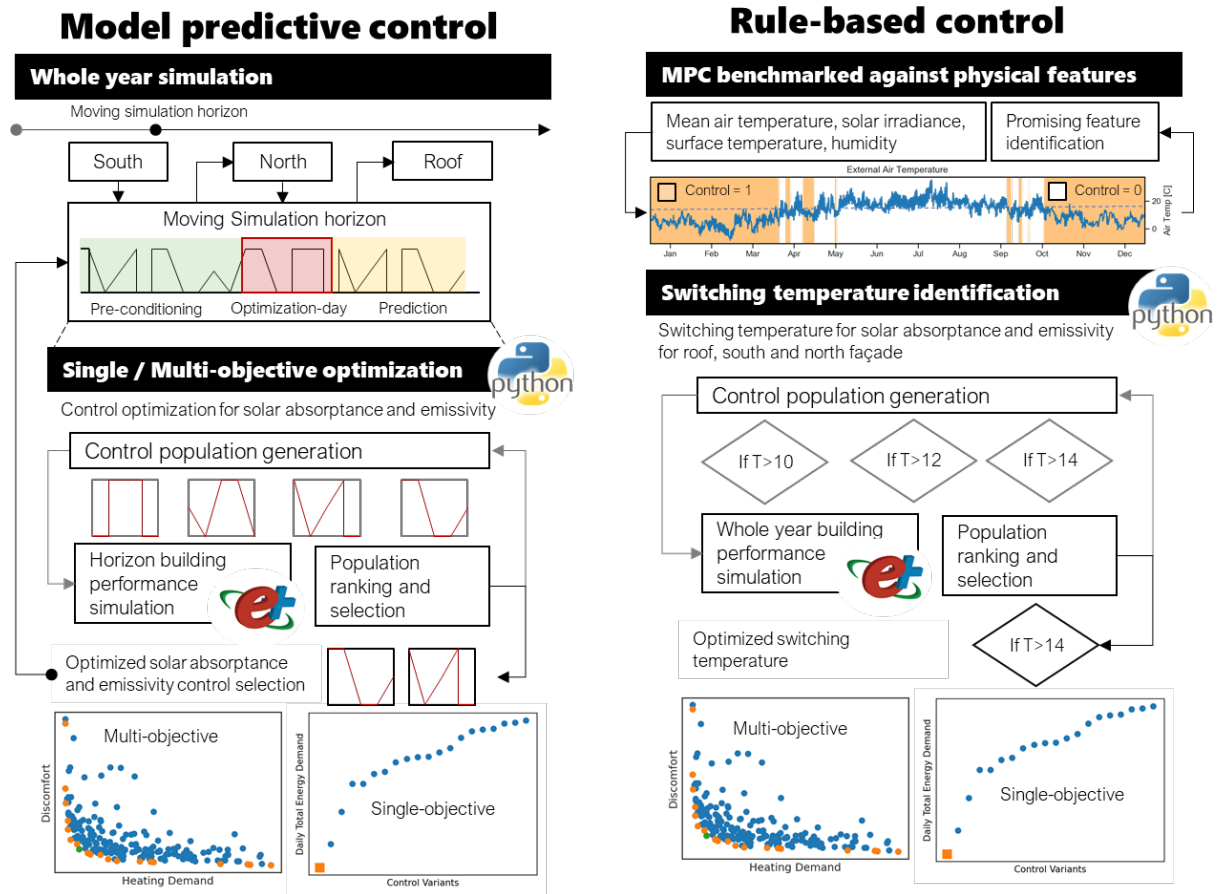
Onderwerp specifieke werkwijze

Besparingspotentieel van statische en schakelbare gevelafwerking (WP1 – TU Eindhoven)

Om het energiebesparingspotentieel van de schakelende coatings in te schatten is gebruik gemaakt van dynamische gebouwprestatiesimulaties in EnergyPlus. Hierbij is uitgegaan van een typische rijtjeswoning met verschillende isolatiewaarden volgens de kenmerken die beschreven zijn in de voorbeeldwoningen van RVO. Voor een gedetailleerde beschrijving van aannames en uitgangspunten wordt verwezen naar D1.1.

Een grote inspanning in het project ging uit naar het opzetten en implementeren van een multi-objective optimalisatie-framework om de effecten van schakelbare gebouwschileigenschappen door te kunnen rekenen op basis van eenvoudige en complexe regelstrategieën (Figuur 2).

Met behulp van dit framework is vervolgens het theoretisch maximale besparingspotentieel van de coatings bepaald door te kijken naar een hypothetisch systeem met maximaal schakelbereik in materiaaleigenschappen en een perfecte regeling. Naast een indicatie van de te behalen prestaties geeft deze werkwijze ook goede inzichten in de veelbelovende praktische regelstrategieën en een beeld van welke combinaties van dynamische materiaaleigenschappen verantwoordelijk zijn voor het grootste deel van de winst. Op basis van deze kennis zijn vervolgens meerdere parametrische studies gedaan met realistische coatings en praktisch uitvoerbare regelingen, waarbij naast energiebesparing ook thermisch comfort onder de loep genomen is. Tot slot is een techno-economische analyse uitgevoerd die laat zien bij welke kosten het schakelbaar maken van de optische eigenschappen van de gebouwschil ook financieel gezien haalbaar wordt.



Figuur 2. Overzicht van het simulatie-framework

Review van mogelijk geschikte technologieën voor schakelende coatings (WP2)

Voor een overzicht van schakelbare technologieën is een uitgebreide zoektocht gedaan in bestaande wetenschappelijke literatuur en patenten. Vindingen zijn allereerst ingedeeld naar ontwikkelniveau (technology readiness level, TRL), waarna een indeling in schakelmechanisme is gemaakt. Voor technologieën met voldoende ontwikkelniveau zijn de volgende aspecten beschreven:

- Mechanisme;
- Materialen;
- Uiterlijk en kleur;
- Schakelen;
- Levensduur;
- Toepasbaarheid;
- Gebruikerservaring;
- Kosten;
- Intellectueel eigendom;
- Demonstraties.

Hieruit zijn uiteindelijk vijf kansrijke technologieën geselecteerd, die vervolgens nader onderzocht zullen zijn in de technologie screening.

Screening van geselecteerde, commerciële verkrijgbare schakelende coatings (WP2 – TNO)

Dit staat in de vertrouwelijke versie van dit rapport.

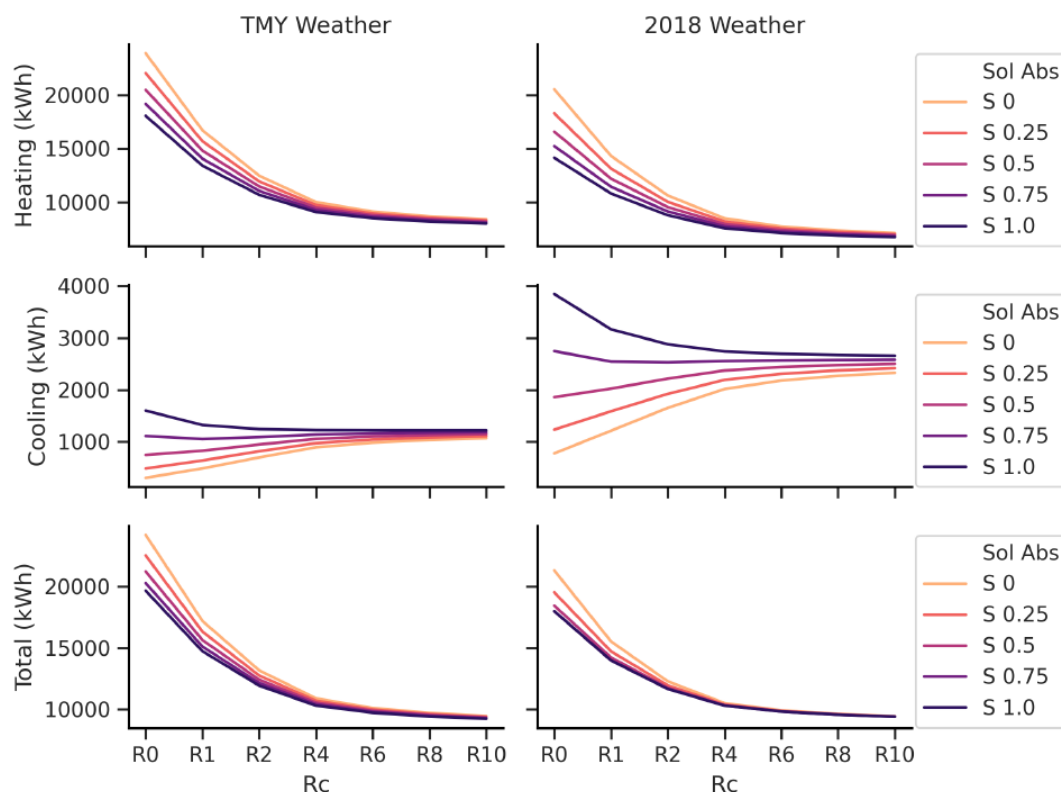
Vervolgontwikkeling (WP3 – TNO)

Dit staat in de vertrouwelijke versie van dit rapport.

3.4 Resultaten

3.4.1 Resultaat 1: simulaties besparingspotentieel statische en schakelende gevels (TU/e)

Voordat schakelbare gevels onderzocht werden is eerst gekeken naar de invloed van statische coatings middels simulaties op gebouwniveau. Dit is berekend voor verschillende gevels (R0-R10), waarvan de resultaten van R1 in Figuur 3 weergegeven zijn. In een Nederlands klimaat is over een geheel jaar gerekend, een donkere kleur (Absorptie 1) het meest gunstig voor het algeheel energieverbruik, aangezien er over het algemeen een hogere warmtevraag is dan een koeltevraag. Gebouwen met een donkere kleur zijn dus netto beter af met een donkere kleur, al geeft dat in de zomers wel meer energieverbruik / minder comfort omdat de koeltevraag sterk toeneemt. Vergeleken met bakstenen (circa 0,7 absorptie) is er dus winst te behalen tijdens koude periodes (met hogere absorptie) en koeltevraag (met lagere absorptie, dat wil zeggen: hogere reflectie). Daarnaast geven de simulaties duidelijk aan dat het effect afneemt met een hogere isolatie niveau.



Figuur 3: warmte en koeltevraag voor een rijtjeshuis (op basis van ISSO-publicatie 32, 2010) als functie van isolatieniveau, voor gemiddelde (TMY) of 2018 seizoen gegevens.

Voor schakelende gevels, blijkt uit een analyse van de energiebalans van de rijtjeswoning met verschillende isolatiediktes blijkt dat de optimale aansturing van de schakelbare gebouwschil ontstaat door het verhogen van de absorptiefactor (α) en het verlagen van de emissiviteit (ϵ) in de

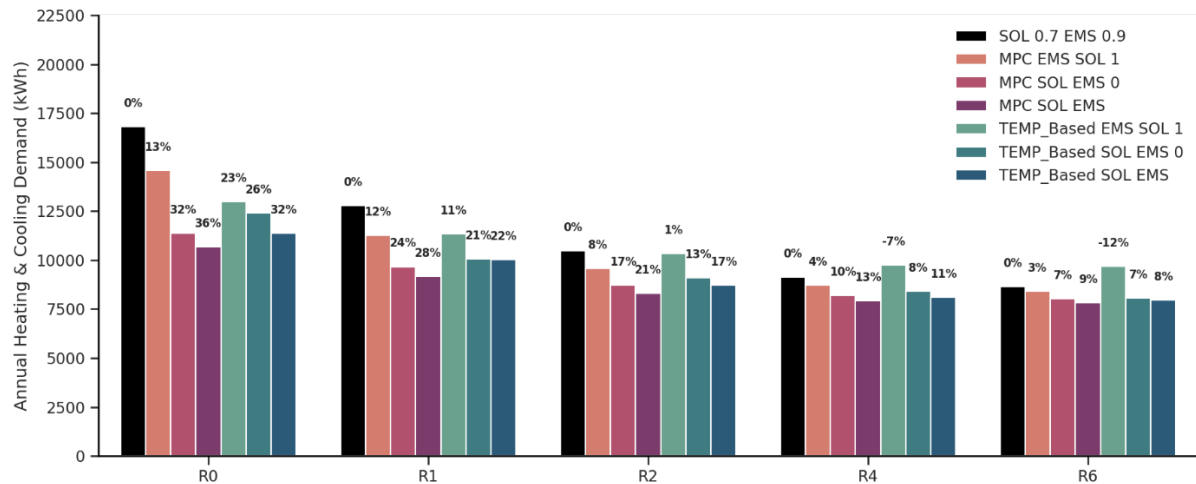
winter en het verlagen van de absorptiefactor en het verhogen van de emissiviteit in de zomer, om zodoende de thermische interacties tussen het gebouw en de omgeving optimaal te beïnvloeden met als doel de totale energievraag te verminderen (Figuur 4).



Figuur 4. Het optimale gedrag van de gebouwschil verschilt per seizoen

De optimalisatiestudie is vervolgens uitgevoerd voor twee varianten van de thermo-optische coating, een hypothetisch optimale coating met de mogelijkheid om zowel de absorptiefactor als de emissiviteit te schakelen tussen de maximale limieten ($\alpha_{\text{low}}=0$, $\alpha_{\text{high}}=1$ & $\epsilon_{\text{low}}=0$, $\epsilon_{\text{high}}=1$) en een state-of-the-art (SOTA) elektro-chrome coating die momenteel in ontwikkeling is met een schakelbereik van 80% ($\alpha_{\text{low}}=0.2$, $\alpha_{\text{high}}=1$) en constante emissiviteit. Uit de technologie review (WP2) blijkt namelijk dat elektro-geïnduceerde technologieën een voordeel hebben voor de toepassing, zoals staat beschreven in D2.1.

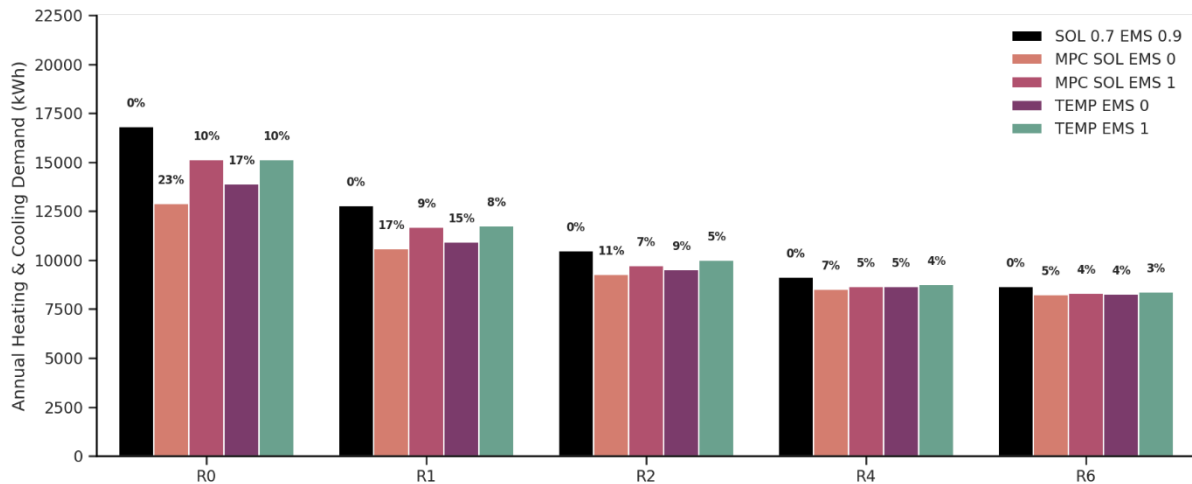
De resultaten zijn besproken in twee delen. In deel A is allereerst een simulatieframework ontwikkeld om twee aansturingstrategieën te kunnen testen, namelijk een modelgebaseerde regeling (MP-regeling, ook wel bekend als 'model predictive control') en conditionele regeling (gebaseerd op als-dan logica). De MP-regeling van de theoretische coating slaagt erin de zonnearmwinsten en thermische stralingsverliezen van de woning te reguleren door dynamisch te schakelen tussen hoge en lage waarden van de absorptiefactor en emissiviteit. Dit resulteert in een jaarlijkse besparing op verwarming en koeling die varieert tussen 803 en 6133 kWh (9-36%) voor respectievelijk R6- en R0-geïsoleerde rijtjeshuizen. De toepassing van MP-aangestuurde theoretische coatings elimineert de noodzaak van hoge isolatie in de gebouwschil, aangezien een dergelijke coating in combinatie met R2-isolatie-niveaus een hogere energiebesparing oplevert dan een hoogwaardig geïsoleerde R6 woning (Figuur 5). Bij de ontwikkeling van dynamische coatings die alleen de absorptiefactor of emissiviteit kunnen schakelen, is het van groot belang dat de statische coatingeigenschappen weloverwogen worden gekozen om het dominante type energievraag te verminderen. Vanwege de hoge warmtevraag in Nederland is het verstandig om dynamische zon-reflecterende coatings te koppelen aan een lage constante emissiviteit, terwijl coatings met aanpasbare emissiviteit gepaard zouden moeten gaan met een hoge constante absorptiefactor.



Figuur 5. Simulatieresultaten voor de geïdealiseerde coating

Door het meest gunstige schakelprofiel te destilleren uit de MP-regeling is een conditionele regeling geïmplementeerd die optische eigenschappen aanstuurt op basis van de buitentemperatuur. Zodra de buitentemperatuur boven een drempelwaarde komt, schakelt de coating tussen lage en hoge waarden. Met deze vereenvoudigde aansturing van de theoretische coatings slagen we erin om in veel situaties een vergelijkbare energiebesparing te bewerkstelligen als voor de vele malen complexere MP-regeling met een jaarlijkse besparing op verwarming en koeling tussen 693-5438 kWh (8-32%) voor respectievelijk R6- en R0-geïsoleerde rijtjeshuizen (Figuur 5).

Een dergelijke regeling kan ook worden toegepast in combinatie met de state-of-the-art (SOTA) elektro-chrome coatings, zoals in D3.1 beschreven is (WP3). Door het schakelbereik van 80% en het ontbreken van een emissiviteitsregeling levert een SOTA-elektro-chrome coating met MP-regeling een besparing op voor verwarming en koeling van 411 en 3905 kWh (5-23%), en een temperatuurgeregelde SOTA-elektro-chrome coating een jaarlijkse besparing voor verwarming en koeling van 377 en 2918 kWh (4-17%) voor respectievelijk R6- en R0-geïsoleerde rijtjeshuizen (Figuur 6). Het energiebesparingspotentieel van de onderzochte elektrisch aangestuurde dynamische thermo-coatings neemt af bij hogere isolatieniveaus; het adaptieve karakter van deze coatings zorgt echter voor flexibiliteit en robuustheid in het kader van klimaatverandering. Deze coatings verminderen zowel de vraag naar verwarming als naar koeling in de loop van het jaar, terwijl hogere isolatieniveaus enkel de verwarmingsvraag verminderen, waardoor het risico op oververhitting in de zomer toeneemt.



Figuur 6. Simulatieresultaten van de state-of-the-art (SOTA) coating

In deel B van het simulatieonderzoek is het simulatie-framework uitgebreid naar een bi-level nested optimalisatie-aanpak om verschillende combinaties van gebouwparameters en SOTA elektrochrome coatings te vergelijken in een techno-economische analyse voor woningverduurzaming in de Nederlandse residentiële sector. Deze simulaties laten zien dat het aanbrengen van coatings op de zuidgevel het kosten efficiëntst is en hebben bovendien een kansrijke propositie geïdentificeerd.

De resultaten zien dat door de combinatie van SOTA elektro-chrome coatings en beperkte verbetering van de gebouwschilisolatie, bijvoorbeeld in de vorm van spouwmuurisolatie, voor niet-geïsoleerde woningen, scenario's uitgewerkt kunnen worden met een energiebesparing die vergelijkbaar is aan sterk geïsoleerde renovatiestrategieën op basis van voorzetgevels. Door het aanbrengen van SOTA elektro-chrome coatings op de zuid- en noordgevel en het upgraden van de muren van R0 naar R1 en het dak van R0 naar R4, kan 90% van de energiebesparing voor verwarming van een compleet tot R4-geïsoleerd rijtjeshuis worden verkregen. Het dynamische karakter van de elektro-chrome SOTA-coatings zorgt voor een verdere vermindering van de koelvraag, waardoor de kans op oververhitting in de zomer aanzienlijk wordt verkleind. De dunne opbouw en snelle toepasbaarheid van deze coatings kunnen het tempo van de renovatieopgave in Nederland versnellen, waardoor flexibele en robuuste woningen ontstaan die in staat zijn zich aan te passen aan de veranderende eisen van de toekomst.

3.4.2 Resultaat 2 – Review screening en conceptontwikkeling

Deelresultaat 1: technologie review – TNO

De potentiële energiebesparing is duidelijk gebleken uit simulaties, zoals beschreven onder resultaat 1. De vraag hoe dit in praktijk te brengen zal deels beantwoord kunnen worden door na te gaan welk type technologie geschikt is om een hoge mate van schakeling te realiseren. Dit is beschreven in de technologie review, gedetailleerd in een rapport in de vorm van D2.1.

Door breed te kijken in wetenschappelijke literatuur en patenten, is een onderverdeling gemaakt van verschillende typen technologieën, te weten:

- Foto-geïnduceerd schakelen; middels intensiteit van zonlicht;
- Thermo-geïnduceerd schakelen; onder invloed van de omgevings/coating temperatuur;

- Electro-geïnduceerd schakelen; middels elektronische signalen, omgevingsonafhankelijk;
- Humido-geïnduceerd schakelen, middels luchtvochtigheid.

De uitgebreide studie is terug te vinden in de vorm van D2.1. Hieronder volgt een samenvatting van de resultaten.

Implementatie van foto-geïnduceerde technologie lijkt in eerste instantie interessant, uit het review bleek dit echter ingewikkelder dan aanvankelijk gedacht. Het schakelgedrag lijkt met 40% (ΔT_{SA}) redelijk gunstig te zijn. Helaas worden veel materialen donkerder bij hoge zonintensiteit, wat implementatie meer ingewikkeld maakt, aangezien dit juist omgekeerd zou moeten zijn om de koelvraag te reduceren. Dit valt met een thermisch geïsoleerd element echter wel te omzeilen, als geeft het wel verlies van rendement. Problematischer zijn echter de levensduur (1 tot 2 jaar) en vooral het fenomeen 'vals schakelen'. Uit simulaties op gevelniveau (door TNO, met simulatiepakket COMSOL – zie D2.1) en op gebouwniveau (door TU/e, met simulatiepakket EnergyPlus – zie resultaat 1) blijkt dat vals schakelen zal leiden tot verlaging van zonlicht absorptie in de winter (als er een sterke warmtevraag is); dit kan de winst in de zomer (reductie koelvraag) niet compenseren, en doet de gehele energiebesparing teniet. Daarmee is foto-geïnduceerd schakelen wegens foutief schakelen en beperkte levensduur ongeschikt voor het implementeren op niet-transparante gevelelementen.

Thermo-geïnduceerde technologieën geven netto wel een positief resultaat op basis van schakelen middels gevel / coating temperatuur. Echter is het schakelen relatief beperkt, en afhankelijk van de gekozen technologie is implementatie wederom lastig vanwege kleuring / donker worden bij hogere temperatuur. Op basis van simulaties blijkt echter dat er wel een positief resultaat opleveren, ondanks een zekere mate van 'vals schakelen'. Daarnaast zou productie relatief voordelig kunnen zijn en is een eenvoudig coating procedé (minimaal 1 laag) mogelijk.

Electro-geïnduceerde technologieën bezitten een aantal sterke voordelen, namelijk i) hoge mate van schakeling (geschat tot 70-80%) en ii) omgevingsonafhankelijk schakelen. Dit laatste aspect maakt predictie-gebaseerd schakelen mogelijk, wat betekent dat een gebouw vooraf energie kan 'inslaan' voordat er een sterke koelvraag optreedt. Door dit af te stemmen met aanwezige gevelisolatie, kan men een ideaal scenario benaderen en vals schakelen volledig uitbannen. De zorg bij dit type technologie zit echter in kostenbeheersing, aangezien er doorgaans 4 tot 5 lagen nodig zijn om een functionele coating te verkrijgen. Daarnaast blijkt levensduur (8 tot 30) sterk uiteen te lopen binnen specifieke technologieën in deze categorie.

Tot slot is er onderzocht of humido-gebaseerd schakelen, middels luchtvochtigheid, een optie zou kunnen zijn. Hoewel dit technisch mogelijk zou kunnen zijn als technologie ontwikkeling verder doorgezet zou worden, zal de mate van schakeling relatief beperkt zijn (10%). Het grootste probleem, net zoals bij foto-geïnduceerd schakelen, is dat de stimulus response relatie onvoordelig uitpakt, waardoor het netto geen energiebesparing op zal leveren in het Nederlands klimaat.

Uiteindelijk is er een top vijf van technologieën gedefinieerd (op basis van een aantal criteria, zie hoofdstuk werkwijze of D2.1), hieronder in willekeurige volgorde:

- Thermo-geïnduceerd schakelende coatings
 - o Gelamineerde folies op basis van organische chemie
 - o Anorganische coatings

- Thermotropische folies
- Elektro-geïnduceerde schakelende coatings
 - Elektroforetisch
 - Elektrochrom

Details en de werking van deze technologieën staat uitgebreid beschreven in D2.1. Deze selectie van technologieën is overgenomen in de technologie screening, beschreven in deelresultaat 2.

Deelresultaat 2: technologie screening – TNO

Alle eerdergenoemde top vijf van technologieën is experimenteel onderzocht, behalve anorganische coatings (tabel 1 en figuur 7). De details zijn te vinden in het vertrouwelijke rapport van dit project.

Deelresultaat 3: concept ontwikkeling – TNO

Op basis van deelresultaten 1 en 2 is in een concept ontwikkeling in gang gezet, vooral gericht op het verbeteren van de technisch de meest geschikte oplossing. Hoe dit precies is gedaan staat in het vertrouwelijk rapport van dit project.

4 Uitvoering van het project

4.1 De problemen (technisch en organisatorisch) die zich tijdens de uitvoering van uw plan hebben voorgedaan en de wijze waarop deze problemen zijn opgelost

Alle activiteiten en deliverables zijn volgens plan verlopen opgeleverd. Er zijn wel enkele opmerkingen bij activiteit in WP2 (D2.2) – Technologie screening te plaatsen, deze staan in de vertrouwelijke rapportage van dit project.

4.2 Toelichting op wijzigingen ten opzichte van het plan

Niet van toepassing.

4.3 Toelichting op de verschillen tussen de begroting en de werkelijk gemaakte kosten.

Niet van toepassing

4.4 Toelichting wijze van kennisverspreiding

Binnen het brede IEBB consortium (circa 100 bedrijven) is een presentatie (Juni 2020) over het besparingspotentieel van schakelende gevels gehouden, waarbij partners die aan heel andere aspecten werkten (consortium breed) kennis konden maken met het concept.

Tijdens het IEBB project is een publicatie ingediend (Juli 2020) over het besparing potentieel van thermo-chrome materialen in de gebouwde omgeving. Januari 2020 zit het manuscript echter nog steeds in het review proces.

Naar genoemde publicatie over thermochrome materialen is een publicatie met simulatie bevindingen rondom elektro-chrome materialen in voorbereiding.

5 Conclusies leerpunten en aanbevelingen

5.1 Conclusies

Schakelbare coatings, met als doel een adaptief gevelconcept, kunnen grote energie besparingen opleveren. Indien zowel absorptie als emissie gereguleerd kunnen worden, tonen simulaties op gebouwniveau aan dat besparingen tot 32% mogelijk zijn (R0). Naarmate isolatie in de gevel stijgt, daalt het rendement van de adaptieve gevel (tot 8%, R6). Dat toont aan dat het concept in principe zeer geschikt is voor gebouwen met een lage isolatiewaarde, wat het uitermate geschikt maakt voor een renovatie concept. Het besparingspotentieel valt in praktijk echter lager uit. Door simulaties te koppelen aan specificaties van state-of-the-art technieken zoals beschreven in het technologie review dat binnen dit project is gedaan lopen de besparingen uiteen van 23 tot 5% (van R0 tot R6), gecombineerde reductie van warmte en koeltevraag.

Een belangrijke conclusie die uit de uitgebreide simulatie activiteiten tijdens dit project getrokken kan worden is dat verdere ontwikkeling van schakelbare coatings georiënteerd moet zijn op i) hoge schakelwaardes en ii) omgevingsonafhankelijke schakelmethodeken (zoals elektro-schakelende coatings) om maximaal rendement te halen.

Conclusies van deelresultaat 2 en 3 staan in de vertrouwelijke rapportage van dit project.

5.2 Leerpunten

- Reflectie schakelende gevels zijn vooral geschikt voor gebouwen met een lage isolatiewaarde;

Leerpunten van deelresultaat 2 en 3 staan in de vertrouwelijke rapportage van dit project.

5.3 Aanbevelingen

Vervolgontwikkeling en aanbevelingen staan in de vertrouwelijke rapportage van dit project.

6 Literatuur

- [1] Cao et al., *Energy Build.* 128 (2012) p. 198–213
- [2] <https://www.akzonobel.com/en/about-us/what-we-do/keepcool-sunreflect>
- [3] Loonen (2018) Proefschrift: 'approaches for computational performance optimization of innovative adaptive façade concepts'
- [4] <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>.

In deze rapportage is vaak verwezen naar de deliverables, inclusief bijbehorende referenties:

- D1.1 A.A. Butt, R.C.G.M. Loonen - Effect of static and dynamic surface properties in reducing the energy demand of residential dwellings
- D2.1 E.J. van den Ham, I. Veljkovic, T. Bijsterbosch, S.J.F. Erich - Review of suitable material technologies for opaque, switchable building façades. (TNO 2020 R11077)
- D2.2 E.J. van den Ham, J. Sweelsen Technology screening – commercial thermo- and electro-switchable coating systems for adaptive facades (TNO 2021 R10069)
- D3.1 E.J. van den Ham, T. Bijsterbosch, J. Sweelsen - Electro-switchable technology development for switchable, opaque façade elements (TNO 2021 R10070)