

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
bouwkunde

Masterthesis

**Geoptimaliseerd Ontwerp van BIPV-Systemen voor Toepassingen in Particuliere
Woonbouwgevels: Een Conceptuele Benadering**

Victor Vandervoort

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

PROMOTOR :

Prof. dr. ing. Bram VANDOREN

PROMOTOR :

ing. Nelis BOONS

BEGELEIDER :

ing. Tine ENGELEN

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen | Agoralaan Gebouw H - Gebouw B | BE 3590 Diepenbeek

Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Agoralaan Gebouw D | BE 3590 Diepenbeek
Universiteit Hasselt | Campus Hasselt | Martelarenlaan 42 | BE 3500 Hasselt



2023
2024

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
bouwkunde

Masterthesis

Geoptimaliseerd Ontwerp van BIPV-Systemen voor Toepassingen in Particuliere Woonbouwgevels: Een Conceptuele Benadering

Victor Vandervoort

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

PROMOTOR :

Prof. dr. ing. Bram VANDOREN

PROMOTOR :

ing. Nelis BOONS

BEGELEIDER :

ing. Tine ENGELEN



KU LEUVEN

Woord vooraf

Het schrijven van deze masterproef was een uitdagend en leerzaam proces, waarin ik niet alleen mijn academische vaardigheden heb kunnen ontwikkelen, maar ook mijn persoonlijke grenzen heb verlegd. Dit werk zou niet mogelijk zijn geweest zonder de hulp en steun van een aantal mensen en organisaties, die ik hierbij graag wil bedanken.

Allereerst wil ik Prof. dr. ing. Bram Vandoren als interne promotor danken voor zijn algemene coördinatie en feedback gedurende het proces van mijn masterproef. Mijn dank gaat ook uit naar Ing. Tine Engelen, als interne co-promotor, voor haar continue ondersteuning en begeleiding. Haar inzichten en adviezen hebben de kwaliteit van mijn onderzoek aanzienlijk verbeterd.

Daarnaast ben ik zeer dankbaar voor de begeleiding van Ing. Nelis Boons als externe promotor. Zijn deskundigheid, betrokkenheid en waardevolle suggesties hebben een essentiële rol gespeeld in het succesvol afronden van deze studie. Hierbij wil ik ook iLumen bedanken voor de mogelijkheid om mijn masterproef bij hun organisatie uit te voeren, waarbij hun faciliteiten een belangrijke bijdrage geleverd hebben aan dit werk.

Mijn dank gaat verder uit naar Ing. Luke van Ratingen voor zijn hulp bij de modellering en deskundigheid op het gebied van brandveiligheid.

Bovendien wil ik Gunter Vandervoort bedanken voor zijn ondersteuning en overleg, waarbij zijn praktische adviezen een essentieel aspect bleek bij de totstandkoming van het eindontwerp.

Tenslotte wil ik de KU Leuven en UHasselt bedanken, enerzijds voor de verrijking van mijn bouwkundige kennis gedurende mijn studie, en anderzijds voor de mogelijkheid en faciliteiten om mijn masterproef uit te voeren. Speciale dank gaat ook uit naar Physibel voor het beschikbaar stellen van de licenties van hun software.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	1
Lijst van tabellen	5
Lijst van figuren	7
Abstract	9
Abstract in English	11
1 Introductie	13
1.1 Onderzoekscontextualisering en -begrenzing	13
2 Vooronderzoeksmethodologie	15
2.1 Onderzoeksvragen	15
2.2 Betrouwbaarheidscriteria en literatuurbronnen	15
2.2.1 Peer review-, publicatiedatum en -vorm criteria	15
2.2.2 Bewustwording van niet voldane literatuur	15
2.2.3 Onderzoek begrenzing	15
2.2.4 Literatuurbronnen:	16
2.3 Onderzoeksproces en strategie	16
2.3.1 Terminologie voor de zoekopdracht:	16
2.3.2 Selectie van literatuurbronnen: titel en abstract screening	16
3 Literatuurstudie	18
3.1 Synthese van resultaten	18
3.2 Discussie van resultaten uit de literatuurstudie	20
3.2.1 Integratie- en montage mogelijkheden	20
3.2.2 Kostenreductie bij BIPV-implementatie	21
3.2.3 Materiaal vergelijking	22
3.3 Conclusie literatuurstudie en marktonderzoek	23
4 Modelleringsmethodologie	25
4.1 Materiaaleigenschappen en geometrische bepaling	25
4.2 Thermische capaciteit	26
4.3 Brandveiligheid	26
4.4 Structurele integriteit	27
5 Theoretisch optimaal voorontwerp	28
5.1 Economische eigenschappen	28
5.2 Bouwtechnische eisen	29
5.2.1 Thermische capaciteit	29
5.2.2 Brandveiligheid	30
5.2.3 Structurele integriteit	30
5.3 Aspecten betreffende implementatie	30
5.4 Beslissingstabel ter vergelijking conceptuele uitwerkingen	31
6 Concept I: In situ montage	32
6.1 Economische eigenschappen	33
6.2 Bouwtechnische eisen	33

6.2.1	Thermische capaciteit.....	33
6.2.2	Brandveiligheid.....	34
6.2.3	Structurele integriteit.....	35
6.3	Aspecten betreffende implementatie.....	35
7	Concept II: Een Modulaire Benadering.....	37
7.1	Economische eigenschappen.....	38
7.2	Bouwtechnische eisen.....	38
7.2.1	Thermische capaciteit.....	38
7.2.2	Brandveiligheid.....	39
7.2.3	Structurele integriteit.....	40
7.3	Aspecten betreffende implementatie.....	41
8	Discussie van onderzoeksresultaten.....	42
9	Concept III: een geïntegreerd eindontwerp.....	44
9.1	Economische eigenschappen.....	45
9.2	Bouwtechnische eisen.....	45
9.2.1	Thermische capaciteit.....	45
9.2.2	Brandveiligheid.....	47
9.2.3	Structurele integriteit.....	50
9.3	Aspecten betreffende implementatie.....	52
9.4	Toepassingsmogelijkheden in andere situaties: hoogbouw.....	53
10	Conclusie.....	54
11	Referenties.....	55
12	Appendices.....	59

Lijst van tabellen

Tabel 1: Algemene studiekenmerken actieve literatuurbronnen	18
Tabel 2: Algemene studiekenmerken passieve literatuurbronnen	19
Tabel 3: Materiaaleigenschappen	25
Tabel 4: Niet-materiaalspecifieke randvoorwaarden	26
Tabel 5: Constante parameters in modellering	26
Tabel 6: Modelspecifieke parameters in modellering	26
Tabel 7: Beslissingstabel o.b.v het voorontwerp, literatuurstudie en marktonderzoek	31
Tabel 8: Vergelijking bouwtechnische eisen Concept I en II.....	42
Tabel 9: Vergelijking economische eigenschappen Concept I en II	43
Tabel 10: Vergelijking aspecten betreffende implementatie Concept I en II	43
Tabel 11: Bezwijktemperaturen per materiaal	48
Tabel 12: Aangrijpende krachten en momenten op keperverankering op L-profiel.....	52

Lijst van figuren

Fig. 1: Selectieproces voor bronnen literatuurstudie.....	17
Fig. 2: Voorbeeld geometrische bepaling a.d.h.v. een bitmap	25
Fig. 3: ISO 834 brandcurve	27
Fig. 4: Bovenaanzicht retrofit BIPV	28
Fig. 5: Bovenaanzicht voorontwerp BIPV	28
Fig. 6: Perspectief zicht retrofit BIPV	28
Fig. 7: Perspectief zicht theoretisch optimaal voorontwerp BIPV	28
Fig. 8: Perspectiefzicht modellering voorontwerp in TRISCO 3D	29
Fig. 9: Bovenaanzicht van 1 module uit bitmap voorontwerp	29
Fig. 10: Temperatuursverloop in perspectiefzicht (a) en op kritische doorsnede (b)	30
Fig. 11: Temperatuursverloop in bovenaanzicht	30
Fig. 12: Perspectief vooraanzicht Concept I	32
Fig. 13: Zijaanzicht Concept I	32
Fig. 14: Bovenaanzicht Concept I	32
Fig. 15: Vooraanzicht plaatsing en verankering fotovoltaïsche panelen op railsysteem Concept I	33
Fig. 16: Perspectiefzicht modellering Concept I in TRISCO 3D	33
Fig. 17: Bovenaanzicht van 1 module uit bitmap Concept I	33
Fig. 18: Temperatuursverloop Concept I in perspectiefzicht (a) en op kritische doorsnede (b).....	34
Fig. 19: Temperatuursverloop Concept I in bovenaanzicht	34
Fig. 20: Gemiddelde temperatuurstijging bij brand Concept I	35
Fig. 21: (a) Plaatsing verankeringsprofielen Concept I op fotovoltaïsch paneel, (b) Detail geplaatst verankeringsprofiel Concept I, (c) Verankering op horizontaal railsysteem Concept I	36
Fig. 22: (a) Plaatsing kepers en isolatie Concept I op snelbouwwand, (b) Plaatsing horizontaal railsysteem op kepers Concept I, (c) Plaatsing en verankering fotovoltaïsche panelen op horizontaal railsysteem Concept I.....	36
Fig. 23: Perspectiefzicht Concept II	37
Fig. 24: Perspectiefzicht Concept II	37
Fig. 25: Bovenaanzicht concept II	38
Fig. 26: Perspectiefzicht modellering Concept II in TRISCO 3D	38
Fig. 27: Bovenaanzicht van 1 module uit bitmap Concept II	38
Fig. 28: Bovenaanzicht aluminium koudebruggen Concept II	39
Fig. 29: Temperatuursverloop Concept II in perspectiefzicht (a) en op kritische doorsnede (b)	39
Fig. 30: Temperatuursverloop Concept II in bovenaanzicht	39
Fig. 31: Gemiddelde temperatuurstijging.....	40
Fig. 32: “Klik”-systeem Concept II.....	40
Fig. 33: Verankering modules Concept II in snelbouw.....	40
Fig. 34: Esthetische afwerking met zichtbare achterconstructie Concept II.....	41
Fig. 35: Vergelijking temperatuurstijgingen Concept I en II	42
Fig. 36: (a) Linkerzijaanzicht, (b) bovenaanzicht, (c) vooraanzicht, (d) rechterzijaanzicht, (e) achteraanzicht Concept III	44
Fig. 37: Componenten-structuur Concept III	45
Fig. 38: Bovenaanzicht assemblage verschillende componenten Concept III	45
Fig. 39: Aanpassing dimensies Concept III	45
Fig. 40: Perspectiefzicht modellering eindontwerp in TRISCO 3D	46
Fig. 41: Bovenaanzicht van 1 module uit bitmap eindontwerp	46
Fig. 42: Detail thermische onderbreking van koudebrug tussen aluminium L-profiel en de achterconstructie	46
Fig. 43: Temperatuursverloop eindontwerp (a) in perspectiefzicht (b) op kritische doorsnede	47
Fig. 44: Temperatuursverloop eindontwerp in bovenaanzicht	47
Fig. 45: Temperatuurstijgingen eindontwerp bij brand per materiaal	48
Fig. 46: Bevestigingspunten aluminium achterconstructie eindontwerp.....	48
Fig. 47: Bezwijkmechanismen eindontwerp bij brand per materiaal	49
Fig. 48: (a) Plaatsing L-verankeringsprofiel, (b) momentvrije klik-systeem te plaatsen module in reeds verankerde module, (c) verankering te plaatsen module.....	50
Fig. 49: Keperverankering op L-profiel	51

Fig. 50: Krachtswerking bovenaan keperverankering op L-profiel	51
Fig. 51: Krachtswerking onderaan keperverankering op L-profiel	51
Fig. 52: Implementatie eindontwerp	52
Fig. 53: Plaatsing brandwerende schermen voor gevels van middelhoge gebouwen met een doorlopende luchtpouw [54, p. 26].....	53
Fig. 54: Brandwerend scherm met opzwellende strook in geval van brand [54, p. 27]	53

Abstract

De integratie van Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) systemen in particuliere woninggevels is een groeiende trend in een wereld waar efficiënt bouwen steeds belangrijker wordt. De integratie van fotovoltaïsch actieve materialen in de gevels van gebouwen vereist echter niet alleen energie-efficiëntie, maar ook esthetische aantrekkelijkheid, een aspect dat in veel huidige systemen tekortschiet.

Het doel van deze studie is om een geoptimaliseerd concept te ontwerpen dat voldoet aan bouwtechnische eisen zoals thermische capaciteit, brandveiligheid en structurele integriteit. Simultaan moet het systeem economisch efficiënt zijn, alsook gebruiksvriendelijk toepasbaar zijn binnen verschillende projectomgevingen.

De gevolgde methodologie omvat een literatuurstudie en marktanalyse, die uitmondt in de ontwikkeling van een theoretisch optimaal voorontwerp. Dit model wordt vervolgens praktisch, volgens verschillende benaderingen, uitgewerkt tot twee concepten. Een kritische vergelijking tussen beide uitwerkingen resulteert in een uiteindelijk geïntegreerd eindontwerp dat de gulden middenweg vormt tussen beide concepten.

Het eindontwerp combineert standaard fotovoltaïsche panelen, luchtsponw en isolatiemateriaal voor een modulair systeem dat eenvoudig op de dragende gevel bevestigd kan worden. Hoewel de initiële kosten van het systeem momenteel hoog zijn in vergelijking met traditionele zonne-energieoplossingen, worden ze op termijn gedeeltelijk gecompenseerd door de verbeterde efficiëntie en duurzaamheid van het systeem.

Abstract in English

The integration of Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) systems into residential building facades is a growing trend in a world where efficient construction is increasingly paramount. The integration of photovoltaic active materials into a building façade requires not only energy efficiency but also aesthetic appeal and technical optimization, an aspect in which many current systems fall short.

The aim of this study is to design an optimized concept that meets building technical requirements such as thermal capacity, fire safety, and structural integrity. Simultaneously, the system must be economically efficient, as well as applicable in a user-friendly way within various project environments.

The methodology includes a thorough literature review and market analysis, culminating in the development of a theoretically optimal preliminary model. Subsequently this model is practically developed into two concepts using different approaches. A critical comparison between the two results in a final integrated design that strikes a balance between both concepts.

The final design combines standard photovoltaic panels, an air cavity, and insulation material into a modular system that can be easily attached to the load-bearing facade. Although the initial costs of the system are currently high compared to traditional solar energy solutions, they are partially offset over time by the system's improved efficiency and durability.

1 Introductie

In een wereld die streeft naar energie-efficiëntie en innovatieve benutting van tot nu toe onontdekte mogelijkheden, komt de implementatie van BIPV in woninggevels steeds meer in de schijnwerpers te staan. Terwijl traditionele zonnepanelen doorgaans op daken of in grondparken worden geplaatst, verschuift de focus nu naar het integreren van fotovoltaïsch actieve materialen direct in de gevels van gebouwen, met als resultaat een efficiëntere benutting van anders passieve bouwgedelen. Deze aanpak biedt niet alleen de mogelijkheid om duurzame energie op te wekken, maar draagt ook bij aan de esthetiek van het gebouw, resulterende in een multifunctioneel gevelafwerkingsmateriaal.

Het integreren van BIPV in gevels van woningen brengt diverse uitdagingen met zich mee. Naast de technische vereisten voor energieopwekking, moeten deze systemen voldoen aan strenge bouwvoorschriften op het gebied van thermische isolatie, brandveiligheid en structurele integriteit. Bovendien moeten ze economisch haalbaar en esthetisch aantrekkelijk zijn om wijdverspreide acceptatie te bevorderen.

In deze context richt dit onderzoek zich op het ontwikkelen van een geoptimaliseerd BIPV-concept dat niet alleen energie-efficiënt en esthetisch aantrekkelijk is, maar ook praktisch toepasbaar en kosteneffectief. De methodologie die gehanteerd wordt, ter bekomen van een geoptimaliseerd BIPV-concept, omvat een grondige literatuurstudie, alsook een marktonderzoek. Dit onderzoek beoogt een referentiemodel te creëren dat als theoretisch ideaal beschouwt kan worden, gebaseerd op bevindingen uit de literatuur en gebreken geïdentificeerd tijdens het marktonderzoek. Dit eerste model zal verder praktisch uitgewerkt worden vanuit twee verschillende benaderingen die beide vergeleken kunnen worden op basis van bouwtechnische, economische en implementatiecriteria.

Deze kritische vergelijking resulteert in een uiteindelijk geïntegreerd ontwerp dat een middenweg vormt tussen de twee concepten en voldoet aan de bouwtechnische eisen en tegelijkertijd mogelijkheden biedt voor kostenreductie en brede toepasbaarheid in verschillende projectomgevingen. Er wordt op deze manier gestreefd naar een bijdrage tot een bredere acceptatie en implementatie van BIPV-systemen in particuliere woningen, wat een significante stap zou zijn richting een duurzamere en efficiëntere bouwpraktijk.

1.1 Onderzoekscontextualisering en -begrenzing

De integratie van BIPV systemen in particuliere woninggevels is een veelbesproken onderwerp in de context van duurzaam bouwen en energie-efficiëntie. Deze trend is voortgekomen uit de groeiende vraag naar alternatieve energiebronnen en de noodzaak om de impact van gebouwen op het milieu te verminderen met als einddoel energieneutrale of (nearly) Zero Energy Building (nZEB) gebouwen.

Traditioneel worden zonnepanelen hoofdzakelijk geïmplementeerd op daken of in grondgebonden zonne-energieparken. Echter, vindt er een opmerkelijke verschuiving plaats in de focus van onderzoek en ontwikkeling, waarbij de nadruk steeds meer komt te liggen op het integreren van fotovoltaïsch actieve materialen rechtstreeks in de gevels van gebouwen. Deze strategische aanpak resulteert niet alleen in een volledige benutting van voorheen passieve bouwschiloppervlakken, maar draagt tevens bij aan een efficiënter gebruik van beschikbare ruimte.

Dit heeft geleid tot een hernieuwde belangstelling voor de mogelijkheden van BIPV-systemen, niet alleen vanuit een milieuperspectief, maar ook vanuit een architectonisch en economisch standpunt. Het integreren van BIPV in gevels van woningen biedt niet alleen de mogelijkheid om duurzame energie op te wekken, maar draagt ook bij aan de esthetiek van het gebouw, wat resulteert in een groeiende vraag naar multifunctionele gevelafwerkingsmaterialen.

Het onderzoek naar geoptimaliseerde BIPV-concepten is daarom bijzonder relevant in de huidige tijd, waarin efficiënt bouwen en duurzaamheid steeds meer prioriteit krijgen. Het streven naar energie neutrale gebouwen en de groeiende vraag naar esthetisch verantwoorde oplossingen in de bouwsector maken dit onderwerp actueler dan ooit tevoren.

Het doel van dit onderzoek is dan ook om een geoptimaliseerd BIPV-concept te ontwikkelen dat niet alleen voldoet aan bouwtechnische eisen zoals thermische capaciteit, brandveiligheid en structurele integriteit, maar

ook economisch efficiënt is en praktisch toepasbaar binnen verschillende projectomgevingen. Dit onderzoek richt zich echter niet op de concrete productontwikkeling, maar op een conceptuele benadering tot optimalisatie.

De begrenzing van het onderzoek ligt daarom in het feit dat het zich richt op het ontwerpen van geoptimaliseerde BIPV-concepten toepasbaar in particuliere woonbouw, zonder zich te verdiepen in een productieklaar eindontwerp. Modelleringsresultaten voor brandveiligheid, thermische capaciteit en structurele integriteit worden slechts als indicatief beschouwd voor een kwantitatieve vergelijking tussen concepten, aangezien het onderzoek zich niet richt op een eindontwerp. Daarentegen zal het geïntegreerde eindontwerp wel nader worden bekeken en besproken op het vlak van bouwtechnische eisen, om de haalbaarheid en toepasbaarheid te evalueren binnen de context van BIPV-systemen in particuliere woninggevels.

De keuze voor het onderzoek naar geoptimaliseerde BIPV-concepten binnen de particuliere woonbouw wordt verantwoord door verschillende overwegingen. Allereerst ligt in de particuliere woonbouw een sterkere nadruk op de esthetische afwerking van een fotovoltaïsche integratie. In vergelijking met industriële toepassingen, waar functionaliteit vaak primeert boven esthetiek, is de esthetische waarde van de gevel in de particuliere woonbouw een belangrijkere factor. Huidige BIPV-systemen zijn vaak geoptimaliseerd voor industriële toepassingen, met een verminderde aandacht voor esthetiek.

Daarnaast worden particuliere woningen doorgaans gekenmerkt door lagere bouwhoogtes in vergelijking met industriële gebouwen. Hierdoor kunnen bepaalde aspecten, zoals brandveiligheidseisen, verschillen tussen de twee toepassingsgebieden. Het onderzoek richt zich op de specifieke context van laagbouwoningen om eventuele verschillen in brandveiligheidseisen te kunnen adresseren.

Bovendien is het van belang om een gebruiksvriendelijk concept te ontwikkelen dat makkelijk toepasbaar is in verschillende projecten met specifieke randvoorwaarden. In de particuliere woonbouw variëren deze randvoorwaarden sterk tussen projecten, terwijl industriële projecten vaak standaardiseren rond eenheidswaarden. Het onderzoek richt zich daarom op het ontwerpen van een flexibel BIPV-concept dat kan worden aangepast aan diverse projectomstandigheden binnen de particuliere woonbouwsector.

2 Vooronderzoeksmethodologie

De methodologie voor het onderzoek naar BIPV in particuliere woonbouw begint met de identificatie van onderzoeksvragen. Deze doelstellingen zijn gericht op het conceptualiseren van een ideale BIPV-wand, het optimaliseren van ventilatie en thermische isolatie, het onderzoeken van implementatiemogelijkheden in de praktijk, en het analyseren van verschillen tussen panelen en montageopties.

Een uitgebreide literatuurstudie wordt uitgevoerd om relevante literatuur te identificeren die antwoorden biedt op de onderzoeksvragen of inzichten geeft die kunnen bijdragen aan het onderzoek. Er worden verschillende betrouwbaarheidscriteria toegepast, waarbij alleen peer-reviewed bronnen die zijn gepubliceerd in of na 2010 en afkomstig zijn uit landen die de Eurocodes volgen, worden geraadpleegd. Tevens wordt er aandacht besteed aan literatuur die niet aan deze criteria voldoet, maar als randinformatie kan dienen. Verder wordt er ook een marktonderzoek uitgevoerd om aanvullende informatie te verkrijgen m.b.t. de tekortkomingen van aspecten, zoals besproken in de literatuur, in de huidige systemen.

De resultaten van het onderzoek worden samengevat in overzichtelijke tabellen voor een gestructureerde bespreking, waarna de discussies zich richten op integratie- en montagemogelijkheden, kostenoptimalisatie en materiaalvergelijking. De conclusies benadrukken de diversiteit van integratiemethoden en het belang van een grondige evaluatie van verschillende factoren voor specifieke gebouwtypen.

2.1 Onderzoeksvragen

- 2.1.1 Hoe zou een ideale BIPV-wand voor particuliere woningen eruit moeten zien en welke functies van een traditionele wand moeten worden overgenomen?
- 2.1.2 Op welke manier kan een BIPV-gevel geoptimaliseerd worden m.b.t. de bouwtechnische eisen en energie-efficiëntie?
- 2.1.3 In welke maten is het mogelijk om een theoretisch optimaal model te implementeren in de praktijk, met nadruk op bouwtechnische eisen, kostenreductie alsook een zo hoogwaardige esthetische integratie?
- 2.1.4 Waar ligt de afweging in toepassingsgebieden voor standaard glas/backsheet panelen in vergelijking met op maat gemaakte glas/glas panelen of andere innovatieve panelen?
- 2.1.5 Op welke manieren kan het gebruik van standaardpanelen, in vergelijking met project specifieke panelen, geoptimaliseerd worden bij de integratie in een gevel?

2.2 Betrouwbaarheidscriteria en literatuurbronnen

2.2.1 Peer review-, publicatiedatum en -vorm criteria

Ter garantie van de betrouwbaarheid van een bron wordt het criterium gesteld dat elke bron peer-reviewed moet zijn. Verder zal de literatuurstudie afgebakend worden op basis van publicatiedatum. Zo worden enkel bronnen geselecteerd die gepubliceerd zijn in of na het jaar 2010. Op deze manier wordt er gegarandeerd enkel de meest up-to-date informatie in acht genomen te worden.

Verder worden conferentie papers en nieuwsartikelen uitgesloten in het literatuurstudie zodat de publicatievorm die als betrouwbaar geacht wordt gegarandeerd. Tot slot zullen enkel informatiebronnen gebruikt worden die gepubliceerd zijn in, of betrekking hebben tot landen waarin de Eurocodes van toepassing zijn.

2.2.2 Bewustwording van niet voldane literatuur

Belangrijk is toch een zeker bewustzijn van de literatuur die niet voldoet aan de betrouwbaarheidscriteria. Deze literatuur wordt in acht genomen als randinformatie, maar niet direct naar gerefereerd. Verder wordt er ook een marktonderzoek gedaan ter bewustwording van huidige BIPV montagesystemen, maar ook deze informatie wordt niet direct naar gerefereerd.

2.2.3 Onderzoek begrenzing

Bij de uitvoering van een literatuurstudie, waar een breed scala aan beschikbare informatie wordt onderzocht, is het van cruciaal belang om het onderzoek alomvattend en accuraat is. Om deze criteria te garanderen, worden

onderzoeksgrenzen opgesteld opdat er geen mogelijkheid is tot vertekeningen in de conclusie als gevolg van een onvolledige of onnauwkeurige zoekopdracht.

Deze onderzoeksgrenzen zijn belangrijk vast te leggen in de onderzoeksopdracht aan de hand van uiterst relevante terminologie en sleutelwoorden. Bij het Onderzoeksproces en strategie wordt er dieper in gegaan in de terminologie en verder gecombineerd tot een alomvattende maar begrensde vraagstelling die gebruikt wordt in de zoekopdracht.

2.2.4 Literatuurbronnen:

De in aanmerking komende bronnen zijn diegene die voldoen aan de vooropgestelde criteria ter garantie van betrouwbaarheid en relevantie. Op basis van deze criteria is er uitsluitend gebruik gemaakt van de zoekdatabanken van UHasselt en KU Leuven. Deze databanken, namelijk Limo, Scopus en Web of Science bevatten peer-reviewed literatuur, academische boeken en andere professionele publicaties, die na toepassing van vooropgestelde criteria en onderzoeksgrenzen voldoen aan de eisen van dit onderzoek.

Na verdere stappen in het onderzoeksproces is besloten om uitsluitend te werken met de databank Scopus ter voorkomen van dubbelwerk, aangezien de vooraf besproken databanken grotendeels eenzelfde literatuur omvatten. De keuze voor Scopus is gebaseerd op bruikbaarheids- en betrouwbaarheidseisen alsook relevantie voor dit specifiek onderwerp.

2.3 Onderzoeksproces en strategie

2.3.1 Terminologie voor de zoekopdracht:

Voorafgaande aan de zoekopdracht in de databank is van cruciaal belang om de meest relevante en alomvattende terminologie vast te leggen. Deze terminologie wordt verder gecombineerd, rekening houdend met de onderzoeksgrenzen, in een zoekopdracht die een begrensde maar alomvattend beeld moet vormen met de geselecteerde literatuur. De gebruikte terminologie, ter identificatie van de literatuurbronnen, is vervat in een zoekopdracht en is opgenomen in Appendix A: Zoekopdracht ter literatuuridentificatie o.b.v. terminologie.

Deze zoekopdracht is algemeen voor het onderzoek en overkoepeld dus alle onderzoeksvragen. Verder wordt de literatuur gefilterd op basis van de relevantie m.b.t. de specifiek besproken onderzoeksvraag. Nadat de zoekopdracht is afgerond, wordt de literatuur gefilterd op basis van de betrouwbaarheidscriteria. Zoals eerder besproken zal elk gescreende bron van literatuur aan een peer-review moeten worden onderworpen, gepubliceerd zijn in of na het jaar 2010 alsook enkel in landen die onder de Eurocodes vallen én er moet een selectie worden gemaakt om conferentiepapers en tijdschriftartikelen verder uit te sluiten. De filters worden toegepast in de zoekopdracht en zijn opgenomen in Appendix B: Filters toegepast in zoekopdracht. Nadat deze beperkende filters zijn toegepast, wordt een definitief aantal artikelen individueel gescreend op relevantie.

2.3.2 Selectie van literatuurbronnen: titel en abstract screening

Na de identificatie van de literatuurbronnen o.b.v. de alomvattende zoekopdracht wordt een selectie gemaakt o.b.v. het onderwerp van de onderzoeksvragen m.b.t. het gebied van techniek, energie en materiaalwetenschappen.

De bekomen literatuur uit de zoekopdracht zal manueel gefilterd worden op basis van relevantie. Een eerste screening gebeurt door middel van een diagonale analyse van de titel en abstract van de bron. Verder worden de uiterst relevante bronnen geselecteerd door middel van een diepgaande analyse van de volledige bron. Na de selectie van literatuurbronnen worden in totaal 44 artikelen geselecteerd voor verder gebruik voor de literatuurstudie.

Het volledig onderzoeksproces wordt in de ondernomen stappen getoond in figuur 1, waarbij de hoeveelheid geïdentificeerde bronnen en uitgesloten bronnen aangeduid worden als “n”.

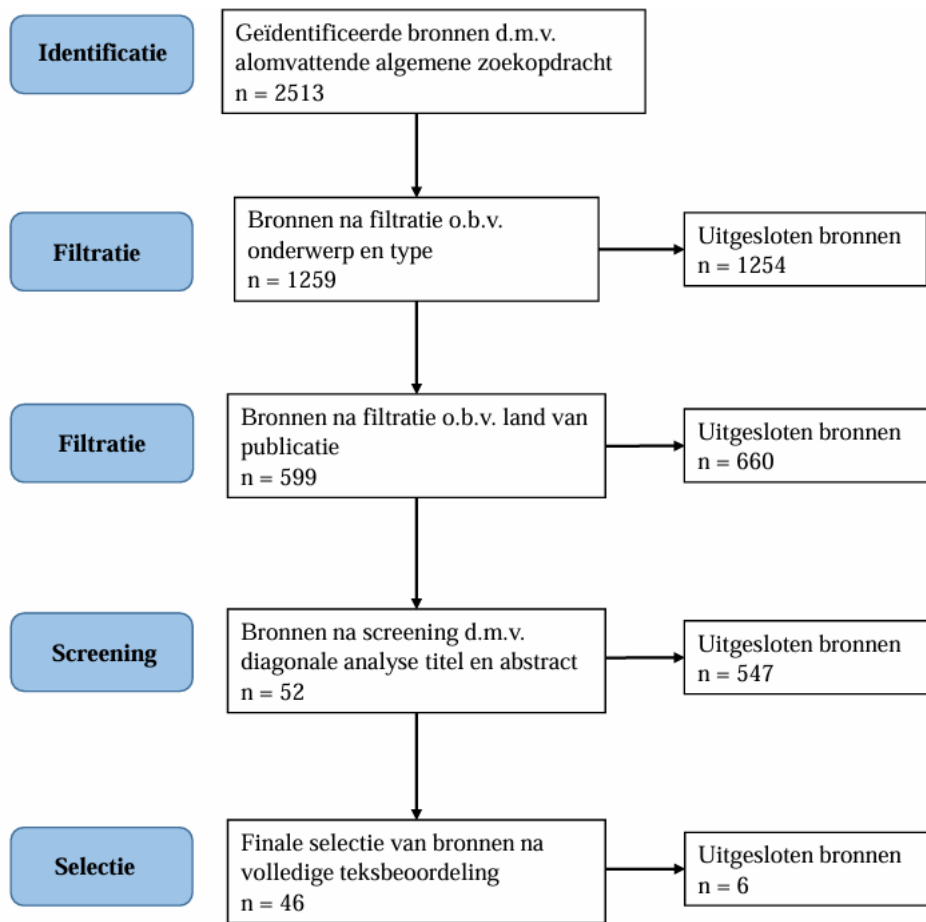


Fig. 1: Selectieproces voor bronnen literatuurstudie

Met de 46 definitief geselecteerde literatuurbronnen wordt de literatuurstudie gestart in sectie 3. Een deel van deze bronnen wordt actief gebruikt als informatiebron voor de discussie van de resultaten. Andere bronnen worden passief gebruikt om de onderzoeksbegrenzing te behouden, maar dienen wel als achtergrondinformatie en context.

3 Literatuurstudie

3.1 Synthese van resultaten

Ter synthese van de resultaten bekomen uit de finale selectie van bronnen worden de specifieke onderzoekskenmerken en de in kaart gebrachte resultaten overzichtelijk georganiseerd in tabellen. Elke bron wordt gecategoriseerd op basis van de specifieke focus m.b.t. BIPV. Hierdoor wordt de bespreking van de resultaten in sectie 3.2 overzichtelijker, wat de nauwkeurigheid bevordert. Tot slot is het belangrijk te vermelden dat verschillende bronnen uiteindelijk als randinformatie worden geraadpleegd om de specifieke scope van het onderzoek te waarborgen. Deze bronnen dienen ter contextualisering om een duidelijk beeld van de onderzoeksgrenzen te schetsen, maar worden niet actief als literatuurbron gebruikt.

Tabel 1 toont de algemene informatie over de als literatuurbron geselecteerde artikelen m.b.t. de categorisering en de belangrijkste bevindingen. Deze tabel vormt de ruggengraad voor de discussie van resultaten in sectie 2.3 waarin de resultaten besproken worden in een stramen gebaseerd op de onderzoeksvragen.

Tabel 1: Algemene studiekenmerken actieve literatuurbronnen

Categorisering:	Belangrijkste bevindingen:	Bron:
Retrofit + Levenscyclus optimalisatie	Een nieuwe data-gedreven levenscyclus optimalisatie aanpak voor gebouwrenovatie beoordeelt prestaties op economisch, energie- en milieugebied om klimaatneutraliteit tegen 2050 te bereiken.	[1]
Modulaire systemen	PUBW (Prefabricated Unitized BIPV Wall) vergemakkelijkt installatie in modulaire prefab systemen, bespaart tijd op locatie en vereenvoudigt bedrading integratie.	[2]
Integratie/montage optimalisatie	Een ontwerp pad voor het integreren van actieve zonne-energiesystemen in gebouwen met behulp van een uitgebreide ontwerptool voor optimale plaatsing.	[3]
Economische analyse	Methodologie voor complexe analyse van voordelen en kosten in bouwinvesteringen, met de focus op economische en milieubesparingen.	[4]
Integratie/montage optimalisatie + Bouwtechnische optimalisatie	PV montage op rails maakt uitbreiding van het oppervlak mogelijk en verbetert de prestaties door koeling en reinigungsmechanismen.	[5]
Integratie/montage optimalisatie + Materiaalvergelijking	Semi-transparante BIPV-systemen tonen energieprestatievariëaties in verschillende klimaten, met nadruk op opkomende PV-technologieën voor efficiëntieverbeteringen.	[6]
Integratie/montage optimalisatie	AI data verwerking voor PV systemen resulteert in theoretische modellen voor temperatuur als functie van montagepositie, wat de efficiëntie verhoogt.	[7]
Retrofit	Post-consumer aanpassing van standaard zonnepanelen tot grote BIPV dakleien voor doe-het-zelf integratie.	[8]
Materiaalvergelijking	ETFE als lichtgewicht alternatief voor glas in PV-modules, biedt verminderde verliezen maar lagere duurzaamheid.	[9]
Bouwtechnische optimalisatie	Nauwkeurige modellering van externe convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënten is cruciaal voor de beoordeling van BIPV gevelprestaties, met significante temperatuur- en stroomvariëaties.	[10]
Bouwtechnische optimalisatie	Geventileerde PV gevels verbeteren de efficiëntie, met verhoogde prestaties door achterventilatie en afgevlakte productiecurves door verschillende oriëntaties.	[11]
Modulaire systemen	De PLUG-N-HARVEST gevel biedt modulaire, economische renovatieoplossingen, verbetert bestaande gebouwen met actieve en passieve componenten.	[12]
Bouwtechnische optimalisatie	Geventileerde luchtkamers achter gevels verhogen significant de thermische weerstand, met complexe thermodynamische interacties die efficiëntie verbeteren.	[13]
Bouwtechnische optimalisatie	Gevoeligheidsanalyse voor natuurlijk geventileerde BIPV-modules benadrukt het belang van ventilatie en warmteoverdrachtscoëfficiënten op de prestaties.	[14]
Bouwtechnische optimalisatie	Geventileerde PV gevels fungeren als een dubbele huid, verbeteren energie-efficiëntie, thermisch gedrag en interactie met gebouwschil.	[15]
Bouwtechnische optimalisatie	Geventileerde gevels met PV-modules hebben significant invloed op temperatuurregeling, verbeteren elektrische productie en thermische efficiëntie.	[16]
Bouwtechnische optimalisatie	PV-systemen geïntegreerd in gevelholtes verbeteren koeling en piekvermogen, wat HVAC-kosten en module prestatievermindering verlaagt.	[17]
Bouwtechnische optimalisatie	De BIPV/T module met ventilatiekleppen verbetert gevelventilatie,	[18]

	energieproductie en milieu- en economische haalbaarheid.	
Bouwtechnische optimalisatie	BIPV gevel ventilatiesysteem voor het verwarmen van binnenruimtes, met voordelen zoals beweegbare schaduwapparaten voor seizoensoptimalisatie.	[19]
Economische analyse	Levenscyclusanalyse toont energie- en economische effectiviteit van gebouwschilrenovaties met PV, waarbij optimalisatie van het ontwerp voor kosten en energiebehoeften wordt benadrukt.	[20]
Economische analyse	Analyse van gasemissierugverdiertijden voor residentiële PV-systemen benadrukt milieuvoordelen en efficiëntie.	[21]
Integratie/montage optimalisatie + Economische analyse	Optimalisatie van PV-arrays in historische gebouwen verbetert zelfvoorziening en financiële winstgevendheid in verschillende economische scenario's.	[22]
Economische analyse	BIPV gevels tonen potentieel voor significante primaire energiebesparingen, met uitdagingen in reële integratie en statische theoretische systeemverliezen.	[23]
Integratie/montage optimalisatie + Materiaalvergelijking	Gelijmde aluminium profielen op glas/glas PV-modules verbeteren structurele ondersteuning en integratie, voorkomen uitval.	[24]
Integratie/montage optimalisatie + Economische analyse	BIPVT-DSF systemen verminderen koelbelastingen en broeikasgasemissies, met scenario's die optimale PV-module oppervlakken suggereren voor energie-terugverdiertijd en levenscyclus opbrengst.	[25]
Integratie/montage optimalisatie + Economische analyse	Geïntegreerde PVT-HP-systemen voor residentiële gebouwen tonen efficiënte prestaties, met ruimte voor optimalisatie op financieel en milieugebied.	[26]
Integratie/montage optimalisatie + Economische analyse	Overzicht van BIPV-systemen identificeert barrières zoals publieke acceptatie, subsidies en architectonische overwegingen, en suggereert toekomstige onderzoeksrichtingen.	[27]
Materiaalvergelijking	Composietstructuren voor PV-modules bieden lichtgewicht oplossingen met uitstekende stabiliteit en duurzaamheid, vereenvoudigen productieprocessen.	[28]
Materiaalvergelijking	Glasvrije lichtgewicht PV-modules bieden verbeterde mechanische weerstand, wat het belang van fixatiesystemen benadrukt in het verminderen van stress en schade.	[29]
Integratie/montage optimalisatie	HBIM-gebaseerde workflow vergemakkelijkt integratie van geavanceerde PV-technologieën in historische gebouwen, door refurbishment praktijken te combineren met parametrische weergave.	[30]
Integratie/montage optimalisatie	LCPV technologie vermindert kosten en verhoogt stroomopwekking, met innovatieve concentratoren die de prestaties aanzienlijk verbeteren.	[31]
Bouwtechnische optimalisatie	Dubbele gevelsystemen met BIPV tonen variërende thermische belasting, wat het belang van holtediepte voor energie-efficiëntie benadrukt.	[32]
Integratie/montage optimalisatie	Zonneconcentratoren gecombineerd met schaduwsystemen in PVT toepassingen verbeteren gebouw energie-efficiëntie en integratie.	[33]
Integratie/montage optimalisatie + Materiaalvergelijking	BIPV module prestaties variëren met bedrijfstemperatuur, met verschillende impacts voor glas/backsheets en glas/glass configuraties, beïnvloed door montage.	[34]
Materiaalvergelijking	Ontwikkeling van lichtgewicht glasvrije PV-modules vereenvoudigt de productie en verbetert mechanische stabiliteit, gebruikmakend van verschillende encapsulants voor efficiëntie.	[35]
Bouwtechnische optimalisatie	Actieve geventileerde gevels beïnvloeden de algehele wandprestatie, wat het belang van gedetailleerde analyse in moderne bouwontwerpen benadrukt.	[36]

Verder worden de passief geraadpleegde literatuurbronnen vervat in tabel 2 die opnieuw de studiekekenmerken toont per bron. Zoals eerder besproken fungeren deze bronnen niet als actief geraadpleegde literatuur, maar worden wel gebruikt ter contextualisering en randinformatie.

Tabel 2: Algemene studiekekenmerken passieve literatuurbronnen

Categorisering:	Belangrijkste bevindingen:	Bron:
Levenscyclus optimalisatie + Bouwtechnische optimalisatie	Gedetailleerde planning en onderhoud zijn essentieel om prestatieverlies in BIPV-installaties te voorkomen, rekening houdend met problemen zoals waterdichtheid en schaduw.	[37]
Innovatieve oplossingen	Dynamische gevel met perovskiet PV-panelen toont veelbelovende energieratio's, met effectieve zon-volg en energieproductie balans.	[38]
Integratie/montage optimalisatie	Integratie van PV-panelen en energieopslag in dorpssecties verhoogt duurzaamheid, met gecentraliseerde warmtepompen en energiesystemen.	[39]
Retrofit + Economische	Optimaal formaat BIPV en BAPV systemen in multi-appartement renovaties	[40]

analyse	behalen kostenbesparingen, met noodzakelijke overheidssubsidies en financiële prikkels voor bredere adoptie.	
Integratie/montage optimalisatie	Geïntegreerde zonnekoelende gevels profiteren van productprestaties, multidisciplinair teamwork en maatwerkoplossingen, zoals blijkt uit interviews.	[41]
Integratie/montage optimalisatie + Bouwtechnische optimalisatie	Digitale oppervlaktemodellen van LiDAR-gegevens kaarten het zonnepotentieel van stedelijke oppervlakken in kaart, waarbij gevels ondanks lagere bestraling een significante impact tonen.	[42]
Economische analyse	Overzicht van PV energie-opbrengst simulaties benadrukt de noodzaak voor op maat gemaakte modellen voor bifaciale PV-systemen en vuilverliezen.	[43]
Integratie/montage optimalisatie	Efficiënte BIPV-integratie in daken en gevels kan netto-nul energiegebouwen bereiken, waarbij de correlatie tussen energieopwekking en gebouwoontwerp wordt benadrukt.	[44]
Integratie/montage optimalisatie	Materiaalcombinatie analyse toont economische en energetische voordelen van glas-backsheet combinaties	[45]
Retrofit + Economische analyse	Model voor het optimaliseren van de netto contante waarde (NPV), toont potentieel van BIPV en BAPV systemen op dak en voor meergezinswoningen	[46]

3.2 Discussie van resultaten uit de literatuurstudie

3.2.1 Integratie- en montage mogelijkheden

De montage mogelijkheden ter integratie van fotonvoltaïsche panelen in de verticale gevels van particuliere woonbouw zijn zeer divers, zoals blijkt uit verschillende methoden en aanbevelingen in de literatuur. Ook vanuit het marktonderzoek blijken diverse systemen beschikbaar te zijn, telkens met verschillende esthetische of financiële voordelen ten opzichte van andere systemen. Deze diversiteit benadrukt het belang van nauwkeurige evaluatie en overweging op basis van verschillende bouwtypen en andere klimatologische omstandigheden [1], [2], [3].

Het verschil tussen prefab modules en in situ montage wordt duidelijk op het vlak van de montagetijd en ontwerpflexibiliteit. Deze afweging is vaak afhankelijk van de omvang van het project, aangezien een prefab module een snelle montagetijd belooft, maar de ontwerpflexibiliteit beperkt, wat vaak een belangrijk aspect is bij particuliere woonbouw [2]. Een ander belangrijk aspect zijn de montage mogelijkheden voor retrofitting van BIPV op een reeds bestaande gebouwgevel. De verschillende reeds beschikbare montage mogelijkheden die voortkomen uit het marktonderzoek tonen een duidelijke afweging tussen de initiële meerkost en de esthetische afwerking die beide afhankelijk zijn van projectspecifieke randvoorwaarden. Hiervoor is een nauwkeurige optimalisatiebenadering die gericht is op het minimaliseren van de integratie- en project engineering kosten noodzakelijk. [4] kaart een optimalisatiebenadering aan waarbij rekening gehouden wordt met het energieverbruik gedurende de gehele levenscyclus van een systeem. [1] benadrukt verder het belang van een zo nauwkeurig mogelijke evaluatie en modellering van de bouwprestaties en projectspecifieke eisen. Tot slot toont [3] aan dat een goed doordachte ontwerpbenadering een waardevolle tool blijkt bij het optimaliseren van de integratie van fotonvoltaïsche oplossingen in constructies, vooral in particuliere woningen.

Geprefabriceerde modulaire systemen bieden aanzienlijke voordelen bij de integratie en montage van BIPV-systemen. De installatietijd op locatie wordt aanzienlijk verminderd, wat montage binnen een zeer korte tijd mogelijk maakt. Dit resulteert in lagere arbeidskosten en een snellere oplevering, wat vooral nuttig is in tijds- en weersafhankelijke situaties [5]. Verder toont [6] het gemak van de integratie van modulaire BIPV-systemen in gebouwstructuren, wat de noodzaak voor extra ondersteunende infrastructuur en materialen vermindert en lagere arbeidskosten oplevert.

Vooraf bij geprefabriceerde modulaire systemen is het garanderen van de structurele integriteit bij de integratie van cruciaal belang bij aspecten zoals de thermische capaciteit, brandveiligheid en waterdichtheid van een systeem. Deze factoren worden in rekening gebracht met modelleringen ter voorspelling van het temperatuursverloop alsook de waterdichtheid van een BIPV-systeem [7] [8]. Ook een goed doordachte keuze van gebruikte materialen is essentieel voor een geoptimaliseerde integratie waarvoor verschillende studies de toepassing van lichtgewicht composiet modules aanhalen in vergelijking met eerder traditionele glas-glas en glas-backsheet modules. Het verschil in gebruik van ethyleen-tetrafluorethyleen copolymeer (ETFE) als

vervanging voor glazen afdekplaten, met als resultaat een lichtgewicht module, duidt op verschillende voor- en nadelen die nader besproken worden bij de materiaalvergelijking in sectie 3.2.3 [9] [10].

Zoals besproken, spelen dus de materiaalkeuze en thermische capaciteit een essentiële rol bij het garanderen van de integriteit van een geïntegreerd fotovoltaïsch systeem in de gebouwschil. Desalniettemin vormt de absolute kern binnen de integratie een goed doordachte strategische beslissing omtrent de montage afhankelijk van projectspecifieke randvoorwaarden. In de literatuur worden verschillende montage mogelijkheden besproken met speciale aandacht voor efficiëntie in integratie en totale bezetting van fotovoltaïsch actieve bouwmaterialen [5]. Verdere toespitsing op het esthetisch aspect m.b.t. de montagestrategie werd duidelijk in het marktonderzoek met verschillende toepassingen. Een ander aspect dat in de literatuur besproken wordt, is de mogelijkheid tot modificaties na gebruik door de consument, zoals de toepassing van BIPV-dakleien, die getoond worden als een alternatieve integratiemethode voor retrofit [8].

Een belangrijk bouwtechnisch aspect, dat naar voren komt als een terugkerend thema, en zich direct linkt aan de montagestrategie is de ventilatie van een BIPV-gevel, met als doel de efficiëntie van de fotovoltaïsche panelen te verbeteren [11] [12]. Ook hebben geventileerde luchtruimten achter een BIPV-gevel een aanzienlijke invloed op de thermische weerstand van de muur [13]. Deze aspecten worden verder versterkt in een gevoeligheidsanalyse voor natuurlijk geventileerde BIPV-modules [14]. Toch brengt het ventileren van een BIPV-gevel meerdere uitdagingen met zich mee, zoals een duidelijke meerkost en de verhoogde brandgevoeligheid als resultaat van het schoorsteeneffect. Desondanks wordt in de literatuur het gebruik van geventileerde BIPV-gevels onderzocht, waarin de nadruk gelegd wordt op voordelen zoals verhoogde energieproductie en verminderde thermische verliezen [15] [16]. Systemen zoals het PLUG-N-HARVEST concept zoals getoond door [12], worden voorgesteld waarin een mechanisch geventileerde luchtpouw zijn voordelen bewijst. In theorie toont [11] aan dat een luchtruimte van 60 mm over het algemeen optimaal is, met als resultaat een bevorderde module-efficiëntie en thermische capaciteit, aangezien de koel- en verwarmingslasten verminderen [17]. Niet-geventileerde gevels leiden, afhankelijk van klimaatomstandigheden, tot vermogensverliezen van 6% bij nominale bedrijfsomstandigheden en 2.5% op jaarbasis in vergelijking met geventileerde gevels [16].

Ook is er sprake van een zekere verkenning in de literatuur naar verschillende innovatieve benaderingen. Verschillende toepassingen zoals geprefabriceerde geïntegreerde BIPV-wanden (PUBW), die efficiëntie tonen in de implementatie van een eenheidsgevel, worden besproken. Ook modulaire hybride fotovoltaïsche/thermische (PV/T) systemen tonen zich als potentiële tijdbesparende en efficiënte installatiemethoden [2] [18]. BIPV/T-systemen worden besproken als veelbelovende oplossingen voor stedelijke infrastructuur, waarbij het belang van levenscycluskostenanalyse (LCC) voor de economische levensvatbaarheid wordt benadrukt. [19] Verder benadrukt een vergelijkende analyse de cruciale rol van een optimaal gedimensioneerd BIPV-ontwerp bij de combinatie van een fotovoltaïsche gebouwschil en een thuisbatterij in meergezinswoningen voor een efficiënter eigenverbruik en zelfvoorziening [20].

3.2.2 Kostenreductie bij BIPV-implementatie

De discussie over de potentiële kostenreductie bij de implementatie van BIPV legt de nadruk op de optimalisatie van de levenscyclus van het systeem, waarbij rekening gehouden moet worden met de operationele energiekosten [8] [21] [22]. Een data gestuurde analyse voor deze optimalisatie suggereert dat de combinatie met isolatie een belangrijk aspect is voor een kosteneffectieve BIPV-implementatie voor het bereiken van een net-zero levenscyclus [1]. Een beduidende conclusie is dat de integratie van BIPV in de gebouwschil gedurende de ontwerp- of constructiefase van essentieel belang is voor een algehele kostenreductie als gevolg van het voorkomen van mogelijke retrofit oplossingen.

Bij het bespreken van een potentiële kostenbesparing is het belangrijk om de vergelijking tussen fotovoltaïsch actieve en passieve muren te maken. De literatuur suggereert een duidelijke mogelijkheid tot besparing van energiekosten gedurende de gehele levensduur van een gebouwschil bij het implementeren van BIPV [8] [21] [22] [6]. BIPV-façades kunnen de primaire energiebehoefte van gebouwen met 40% tot 52% verminderen, afhankelijk van de mate van optimalisatie van de integratie [23]. Voor grote stroomverbruikers bieden BIPV-systemen lage operationele kosten van zelf opgewekte stroom, wat energiekosten en onzekerheid op de lange termijn vermindert [24]. Bovendien bevordert de implementatie van BIPV in gevels de HVAC-kosten door een gespreide energieproductiecurve [17].

Ook wordt het kost reducerend potentieel van een hybride BIPV/T systeem, waar in combinatie met een geventileerde en geïsoleerde achter constructie de thermische capaciteit bevordert wordt, besproken [18] [25] [26]. Deze bijkomende winstgevendheid, in vergelijking met eerder traditionele toepassingen van fotovoltaïsche materialen in de gebouwschil, ondersteunt de financiële haalbaarheid van een BIPV-implementatie. Bovendien wordt, naast de economische voordelen, de nadruk gelegd op het ecologisch aspect van een BIPV-implementatie, waardoor de kapitaalinvesteringen en het netto energieverbruik beiden daalt [19].

De implementatie van modulaire BIPV-systemen kan leiden tot aanzienlijke kostenbesparingen aangezien deze conventionele bouwmaterialen kan vervangen, waardoor zowel materiaal- als arbeidskosten dalen [18]. Verder maken geprefabriceerde modulaire BIPV-systemen een snelle installatie mogelijk, wat de kosten verder reduceert [8]. Bovendien kunnen deze modulaire systemen zorgen voor verdere materiaalreducties doordat ze een draagstructuur kunnen voorzien voor de fotovoltaïsche panelen, waardoor het monteren op gevelstenen als dragende structuur overbodig wordt. Dit resulteert in lagere montagekosten en materiaalvermindering, wat eveneens een kostenreductie betekent [12]. Daarnaast kunnen modulaire systemen bestaande bouwmaterialen, zoals isolatie, integreren waardoor de montagekosten verder gereduceerd worden [27]. Deze aspecten worden verder bewezen in [8], waar aangetoond wordt dat modulaire systemen direct op daken kunnen worden gemonteerd, waardoor de behoefte aan traditionele dakbedekking wordt geëlimineerd en een kostenreductie van ongeveer 20% wordt gerealiseerd.

Het optimaliseren van het ontwerp van de fotovoltaïsche toepassingen in de gebouwschil voor een kostefficiënte implementatie is een belangrijke conclusie voortvloeiend uit de literatuur. De combinatie van de BIPV-implementatie en een thuisbatterij met geoptimaliseerde capaciteit is ook een uitbundig besproken onderwerp cruciaal in de praktische integratie, maar is van mindere relevantie in dit onderzoek, wat eerder conceptueel is. Toch is een evenwichtige combinatie van energieopbrengst, investeringskosten en het zelfvoorzieningsratio van cruciaal belang voor de kosteneffectiviteit gedurende de gehele levensduur van het systeem [20]. Methodologieën voor het beoordelen van de economische efficiëntie, oorspronkelijk ontworpen voor projecten zoals PV-installaties op daken, kunnen worden aangepast en uitgebreid om de kosteneffectiviteit van BIPV-muurimplementaties te evalueren [4].

Ook de materiaalkeuze omvat een ander belangrijk aspect in de kostenreductie. Het onderzoek naar de ontwikkeling van een lichtgewicht composiet fotovoltaïsch paneel opent een nieuwe weg naar een kostenefficiënt geheel [9] [28] [29]. De afweging voor het gebruik van een lichtgewicht fotovoltaïsch paneel wordt verder bij de materiaalvergelijking in sectie 3.2.3 besproken. Zoals eerder besproken is een optimale afweging tussen het verlagen van de operationele kosten d.m.v. een verbeterde thermische capaciteit van cruciaal belang. Als oplossing voor deze kwestie verkent [28] de mogelijkheid tot een modulair systeem met een sandwichpaneel als achterstructuur ter bevordering van de thermische capaciteit. Innovatieve oplossingen zoals deze zijn cruciaal voor de afwegingen betreffende de materiaalkeuze voor een kostenefficiënte integratie.

Tot slot is het belang van een efficiënte integratie cruciaal voor een optimale kostenreductie op vlak van de montage van een specifiek BIPV-systeem. Hiervoor duidt een casestudie op de bevorderde efficiëntie van een praktische implementatie van fotovoltaïsche toepassingen door het gebruik van collaboratieve workflows en informatiemodellering met behulp van bouwwerkinformatiemodellen (BIM) [30]. Bovendien introduceert een studie Low-Concentration Photovoltaic (LCPV)-technologie als oplossing voor de hoge kapitaalkosten die gepaard gaan met BIPV-systemen, waarbij niet alleen de kostenreductie wordt getoond, maar ook de opwekking van schone energie en de aanmoediging van innovatief architectonisch ontwerp [31].

3.2.3 Materiaal vergelijking

De materiaalkeuze voor BIPV-wanden is van cruciaal belang voor de prestaties en levensduur, zoals herhaaldelijk benadrukt in de literatuur [19] [20] [8] [32] [21] [9] [33] [28] [29] [34] [35]. De vergelijking omvat lichtgewicht composiet-, glas-glas- en glas-backsheet-modules, waarbij rekening wordt gehouden met economische-, ecologische aspecten en bouwtechnische eisen.

De materiaalkeuze is een grote factor voor enerzijds de structurele integriteit en anderzijds de economische effectiviteit van een BIPV implementatie. Een van de opkomende technologieën besproken in de literatuur is het gebruik van de ETFE copolymeer als een vervangend materiaal voor de traditioneel gebruikte glazen voorschermen met als resultaat een lichtgewicht PV module. ETFE toont een zekere weerstand tegen verschillende omgevingsomstandigheden zoals hoge temperaturen, vochtigheid, hagel en blootstelling aan Uv-

straling [9] [29]. Ondanks de voordelen van ETFE worden uitdagingen zoals bouwkosten en brandgevoeligheid erkend, wat de noodzaak van een optimale balans in de afweging van materiaaleigenschappen van enerzijds lichtgewicht-modules en eerder traditionele glas-glas- of glas-backsheet modules benadrukt [21] [9] [34]. Verder benadrukt een dynamisch mechanische analyse het belang van de stijfheid van de achter constructie. Een andere conclusie duidt op een zekere stijfheidsdrempel van een licht gewicht PV-module bij het gebruik van scheurvrije zonnecellen [29]. Een andere studie bekijkt ook de mogelijkheden voor lichtgewicht PV-modules met een composiet sandwich achter structuur en een polymere voorlaag met alternatieve inkapsel folies en productieprocessen ter bevordering van de mechanische eigenschappen [28].

Een ander cruciaal aspect in directe correlatie van materiaalkeuze is het thermisch gedrag van BIPV. Naast de materiaalkeuze van de fotovoltaïsche module, waar vaak de afweging is tussen een glas-glas of glas-backsheet module, is de materiaalkeuze van een hybride systeem in combinatie met ventilatie en isolatie essentieel. Zoals eerder besproken bevordert het ventileren van de achter constructie van een BIPV wandstelsel vooral de module-efficiëntie en de thermische capaciteit, maar ook de akoestische prestatie van de gebouwschil [20] [15] [16]. Ook de vergelijking tussen licht- en zwaargewicht muurkernen met geventileerde holtes duidt op belangrijke conclusies zoals het gebruik van materialen met een hoge traagheid en het gevolg op de thermische prestaties en elektrische efficiëntie [36].

Verder is de combinatie met isolatie in hybride PV systemen een belangrijke afweging die de thermische capaciteit van een wand sterk bevordert. A.d.h.v. verschillende simulaties kunnen de voordelen van geïntegreerde PV/T-systemen geconcludeerd worden, met als resultaat een lagere behoefte aan thermische energie vergeleken met traditionele PV-panelen [18] [36]. Het is van belang te erkennen dat er ook verschillende uitdagingen, waaronder bouwkosten en brandgevoeligheid, de veelzijdige aard van de materiaaloverweging bij BIPV-systemen benadrukt. Ook moet er rekening gehouden worden met convectieve warmteoverdracht naar buiten toe, waarbij het belang van gedetailleerde prestatiebeoordeling wordt benadrukt [10]. Ook wordt het belang van bouwvoorschriften, normen en beleid benadrukt om de groei van BIPV/T systemen te ondersteunen. [19] Bovendien suggereren verschillende studies dat zowel BIPV- als, in het bijzonder, BIPV/T-systemen positief bijdragen aan het bereiken van bijna-energie neutrale gebouwen (nZEB) [32] [21] [28].

3.3 Conclusie literatuurstudie en marktonderzoek

De integratie- en montage mogelijkheden van BIPV in verticale gevels van particuliere woonbouw zijn veelzijdig en vereisen zorgvuldige overwegingen van diverse factoren, zoals gebouwprestaties, ventilatie, structurele integriteit, materialen en montage methoden. Uit het marktonderzoek blijkt dat er verschillende integratiemethodieken bestaan, elk met specifieke voor- en nadelen, wat maakt dat, zoals de literatuur benadrukt, een gedetailleerde evaluatie en afweging op basis van specifieke gebouwtypes noodzakelijk is.

Een belangrijke afweging in de literatuurstudie is die tussen prefab modules en in situ montage, afhankelijk van het projectformaat. Prefab modules, zoals PUBW en modulaire hybride PV/T-systemen, beloven een snellere montage, maar bieden beperkte ontwerpflexibiliteit. Retrofitten van BIPV in bestaande gevels biedt meer ontwerpflexibiliteit, maar biedt minder mogelijkheden voor kostenreducties in vergelijking met BIPV die in ontwerpfase geïntegreerd wordt. Het marktonderzoek bevestigt dit door te wijzen op de kostenefficiënte en esthetische voordelen van systemen die direct vanaf de fabrikant naar de bouwplaats kunnen worden gestuurd, waar de montagesystemen al zijn voorbereid. Verder bevestigt de literatuur dit door te wijzen op de voordelige kostenreducties die modulaire systemen beloven.

Beide studies benadrukken de uitdagingen en voordelen van geventileerde luchtruimten achter PV-modules. Hoewel ventilatiespouwen achter de PV-modules in de literatuur als ideaal worden beschouwd vanwege de verhoogde energieproductie en verminderde thermische verliezen, zijn deze in de huidige marktsystemen nog niet volledig geoptimaliseerd. Dit resulteert in suboptimale energieprestaties en thermische capaciteit van het geheel.

De materiaalkeuze voor BIPV-wanden is essentieel voor zowel prestaties als levensduur en varieert afhankelijk van de specifieke projecttoepassingen. In de literatuur worden vergelijkingen gemaakt tussen verschillende materialen voor PV-modules, waarbij de voordelen van innovatieve materialen zoals ETFE als alternatief voor glas worden belicht. Echter, dit onderzoek richt zich voornamelijk op de vergelijking tussen conventionele PV-modules, met een nadruk op de verschillen tussen gestandaardiseerde en op maat gemaakte modules. Daarnaast

gaat de materiaalvergelijking verder dan alleen de PV-modules en omvat ook de constructieve en thermische elementen van een BIPV-gevel. Deze vergelijking is gebaseerd op verdere modelleringen, aangezien de literatuur niet in dezelfde mate praktisch ingaat op bevestigingsmaterialen voor BIPV in verticale wanden.

Het marktonderzoek wijst op een kloof tussen theoretische idealen en praktische toepassingen, waarbij veel huidige systemen niet voldoen aan de gewenste bouwtechnische prestaties én een esthetische afwerking. Esthetisch aantrekkelijke systemen zijn vaak duurder en vereisen complexere montagemethoden, terwijl kostenefficiënte systemen vaak minder aantrekkelijk en minder flexibel in ontwerp zijn. Beide studies benadrukken de noodzaak voor verdere ontwikkeling en optimalisatie van BIPV-systemen om aan zowel technische als esthetische eisen te voldoen.

De gecombineerde bevindingen onderstrepen de noodzaak van voortdurende innovatie en optimalisatie van BIPV-systemen. Er is een duidelijke kloof tussen de theoretische ideale specificaties en de huidige markttoepassingen. Om deze kloof te overbruggen, is verder onderzoek nodig naar innovatieve montagemethoden voor een optimaal ontwerp.

4 Modelleringsmethodologie

In dit onderzoek wordt een grondige methodologie toegepast voor het modelleren en berekenen van verschillende conceptuele uitwerkingen voor specifieke bouwtechnische eisen zijnde: thermische capaciteit, brandveiligheid en structurele integriteit van BIPV systemen. De methodologie omvat het gebruik van gespecialiseerde software om nauwkeurige en betrouwbare resultaten te verkrijgen die de basis vormen voor de evaluatie van de ontwikkelde concepten.

4.1 Materiaaleigenschappen en geometrische bepaling

De modellering is beperkt tot een wand bestaande uit vier modules in de breedte en één module in de hoogte, wat representatief wordt geacht voor alle conceptuele uitwerkingen. De specifieke afmetingen van de gestandaardiseerde PV-panelen bedragen 1134 bij 1762 mm en worden eveneens toegepast op de op maat gemaakte PV-panelen, teneinde een zo nauwkeurig mogelijke vergelijking te garanderen. Dit resulteert in een totaal modeloppervlakte van +/- 8,15 m², afhankelijk van kleine conceptspecifieke eigenschappen zoals hoe dicht de PV-modules op elkaar geplaatst kunnen worden binnen elk concept.

In deze modellen worden diverse materialen in overweging genomen, waaronder snelbouwsteen, PIR-isolatie, aluminium en verschillende fotovoltaïsche modules. Deze materialen worden in alle modelleringen consistent beschouwd wat betreft warmtegeleidingscoëfficiënt (λ), emissiviteit (ϵ), dichtheid (ρ) en soortelijke warmtecapaciteit (c) om een zo nauwkeurig mogelijke vergelijking te waarborgen. Specifieke materiaaleigenschappen worden aangepast met externe informatie, terwijl andere materiaaleigenschappen standaard beschikbaar zijn in de modelleringsoftware.

Tabel 3: *Materiaaleigenschappen*

Materiaal	λ [W/mK]	ϵ [-]	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]
Hoog transmissie, gehard 3,2 mm glas [47]	1,0	0,84	2500	800
Hoog transmissie, gehard 4 mm glas [47]	1,0	0,84	2500	800
Aluminium constructie	180	0,05	2700	897
Keper	0,12	0,85	550	1600
OSB-plaat	0,13	0,90	600	1700
PIR-isolatie	0,025	0,90	30	1000
Flexibele isolatie [48]	0,036	0,90	30	1000
Snelbouwsteen	0,18	0,90	800	840
Hittebestendige verlijming [49]	0,80	0,50	1400	900
Achterconstructie standaard paneel (Tedlar)	0,19	0,85	1780	1200
Tussenlaag op maat gemaakt paneel (EVA)	0,35	0,9	960	2000

Tot slot wordt er voor de geometrische bepaling van een model een doorsnede in bovenaanzicht als een bitmap gemodelleerd, zoals te zien is op figuur 2. Deze bitmap kan, binnen eenzelfde model, dienen als input voor verschillende software ter modellering van de thermische capaciteit en brandveiligheid.

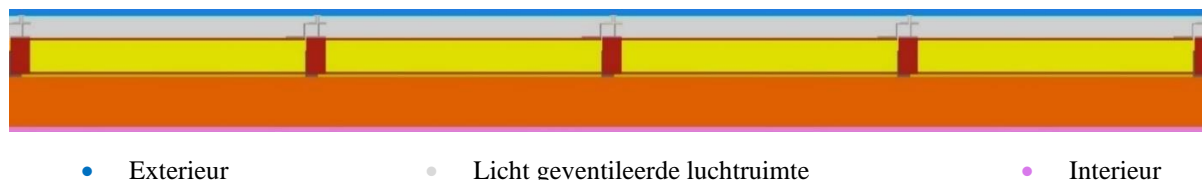


Fig. 2: *Voorbeeld geometrische bepaling a.d.h.v. een bitmap*

Ter modellering van een bitmap worden de verschillende materialen aangegeven met verschillende kleuren die worden toegekend met de specifieke materiaaleigenschappen, zoals aangegeven in tabel 3. Verder worden de grenzen van een model bepaald met verschillende randvoorwaarden die de niet-materiaalspecifieke eigenschappen definiëren. Specifiek worden de interieur- en exterieurgrenzen van het model, alsook eventueel geventileerde luchtruimtes gemodelleerd a.d.h.v. de parameters gegeven in tabel 4.

Tabel 4: Niet-materiaalspecifieke randvoorwaarden

Interieur
- Warmteoverdrachtcoëfficiënt: $h_{\text{int}} = 7,70$ [W/m ² K] (volgens NBN EN 6946)
Exterieur
- Warmteoverdrachtcoëfficiënt: $h_{\text{ext}} = 25,00$ [W/m ² K] (volgens NBN EN 6946)
Luchtruimte
- Gemodelleerd als licht geventileerde holte met fysieke stroming
- Warmtegeleidingscoëfficiënt: $\lambda = 30,575$ [W/mK] (volgens NBN EN 10077)
- Emissiviteit warme en koude zijde respectievelijk: $\epsilon_1 / \epsilon_2 = 0,90 / 0,90$ [- / -]

4.2 Thermische capaciteit

Als eerste aspect binnen de bouwtechnische eisen wordt de thermische capaciteit berekend gebruikmakend van de TRISCO 3D software. A.d.h.v. deze software kan de warmtedoorgangscoefficiënt of U-waarde berekend, alsook het temperatuurverloop doorheen de modelleringswand geplot worden. De modelleringen worden uitgevoerd met de materiaaleigenschappen en de specifieke randvoorwaarden, als gegeven in tabel 3 en 4 respectievelijk, om de omstandigheden van het systeem te definiëren, waarbij dezelfde voorwaarden consistent worden toegepast op alle modellen.

Als resultaat van de modelleringen kan de warmtedoorgangscoefficiënt berekend worden a.d.h.v. formule 1.

$$U = \frac{Q}{(t_i - t_e) - U_2 * A_2} \cdot A_1 \quad (1)$$

Waarbij de parameters zoals weergegeven in tabel 5 gelden voor elk ontwerp en de parameters zoals weergegeven in tabel 6 specifiek bepaald worden per model.

Tabel 5: Constante parameters in modellering

Binnentemperatuur	$t_i = 20,00$ [°C]
Buitentemperatuur	$t_e = 0,00$ [°C]
Modeloppervlakte	$A_1 = 8,15$ [m ²] (+/-)
Modeloppervlakte	$A_2 = 8,15$ [m ²] (+/-)

Tabel 6: Modelspecifieke parameters in modellering

Warmtestroom	Q [W]
Partiële warmtedoorgangscoefficiënt	U_1 [W/(m ² .K)]
Partiële warmtedoorgangscoefficiënt	U_2 [W/(m ² .K)]

4.3 Brandveiligheid

In tegenstelling tot de 3D modellering in TRISCO 3D wordt er een vereenvoudigde 2D-benadering wordt gebruikt a.d.h.v. de BISTRA 2D software, in plaats van de meer complexe 3D VOLTRA-brandveiligheidsberekeningen. Dit met als reden dat de scope van het onderzoek zich niet focust op enkel de brandveiligheid, maar deze enkel als indicatief zal in rekening brengen.

a.d.h.v. BISTRA 2D zal een brandveiligheidsanalyse worden uitgevoerd, waarbij er gebruik wordt gemaakt van de gestandaardiseerde ISO 834 brandcurve. De modelleringen richten zich op het verloop van de temperatuurpenetratie doorheen de wand bij blootstelling aan brand. Voor de blootstelling aan brand te modelleren wordt de temperatuurstijging toegekend aan de lucht- (θ_a) en radiatietemperatuur (θ_r) van het volledig buitenoppervlakte gemodelleerd als “exterieur” op de bitmap. Deze temperatuurstijging wordt als in de ISO 834 normering beschreven a.d.h.v. formule 2.

$$T - T_0 = 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (2)$$

Waarbij de temperatuur T [°C] stijgt in functie van de tijd t [min] beginnende van de begintemperatuur T_0 [°C] die wordt aangenomen op 20°C, zijnde eenzelfde temperatuur als de eerder besproken randvoorwaarden. Deze temperatuurstijging beschreven a.d.h.v. formule 2 wordt geplot zoals te zien op figuur 3, waarna deze via een .fte bestand in de software kan toegekend worden zoals eerder besproken.

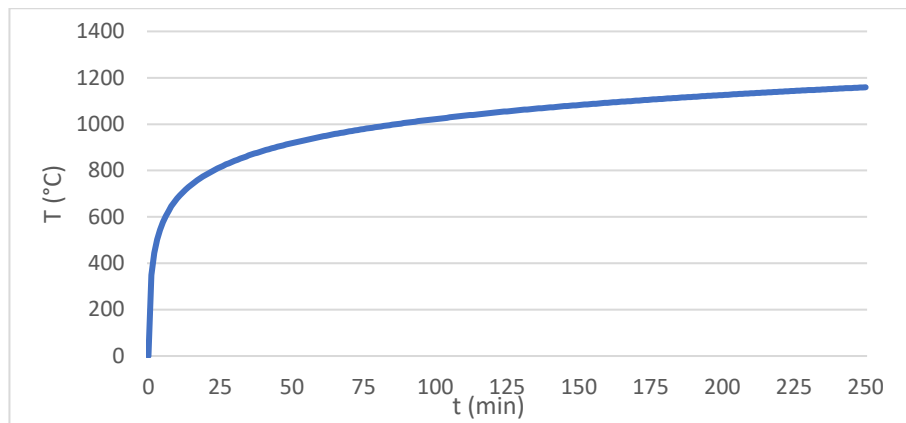


Fig. 3: ISO 834 brandcurve

De modelleringen omtrent de brandveiligheid worden beperkt tot de hoogte van één enkele module zonder rekening te houden met het effect van de geventileerde spouw over grotere hoogtes, zoals bij montage in hoogbouw. Dit als gevolg van het feit dat dit onderzoek zich richt op particuliere woonbouw, met verminderde brandveiligheidseisen. De invloed van de geventileerde spouw zal echter worden besproken in sectie 9.4 Toepassingsmogelijkheden in andere situaties: hoogbouw, waar de huidige aanbevelingen voor het waarborgen van brandveiligheid bij hoogbouw met een geventileerde luchtruimte worden behandeld.

Als resultaat van de modellering in BISTRA wordt de gemiddelde temperatuurstijging, als gevolg van de ISO 834 brandcurve, per materiaal uitgezet in functie van de tijd. Deze resultaten worden indicatief bekeken en kunnen vergeleken worden overheen verschillende conceptuele uitwerkingen. Zaken die kunnen geconcludeerd worden zijn mogelijke faalmechanismen voor specifieke materialen, de hitte absorptie het globaal systeem. Verder wordt de brandveiligheid in samenhang besproken met de structurele integriteit van een systeem. Dit aangezien de bevestigingsmethoden, denk aan de afweging tussen verankering en verlijming, de structurele integriteit van een systeem waarborgen en een potentieel faalmechanisme blijken in geval van brand.

4.4 Structurele integriteit

Tot slot zal de structurele integriteit van de BIPV-systemen worden geëvalueerd door de montage- en verankeringsmethoden te analyseren. Hierbij worden zowel conventionele bevestigingsmethoden, zoals schroeven en verlijmen, als innovatieve modulaire benaderingen in beschouwing genomen. Deze evaluatie houdt rekening met praktische aspecten, waaronder het werken rond de onregelmatigheden van de snelbouwwand en andere bouwtechnische vereisten. Daarnaast wordt het gewicht van elke conceptuele uitwerking, belastend op de wand, bepaald door het volume van elk gebruikt materiaal te berekenen en dit te vermenigvuldigen met de dichtheid van het materiaal. De dichtheden en globale dimensies blijven consistent over de verschillende conceptuele uitwerkingen om een zo nauwkeurig mogelijke vergelijking te waarborgen. Belangrijk om te vermelden is dat de structurele integriteit wordt besproken in de conceptuele uitwerkingen, echter wordt de krachtswerking enkel voor het geïntegreerd eindconcept nader bekeken aangezien hier

Deze methodologie biedt een gestructureerde benadering voor het evalueren van BIPV-systemen op basis van thermische prestaties, brandveiligheid en structurele integriteit. Door het gebruik van geavanceerde modelleringstools zoals TRISCO 3D en BISTRA 2D, kunnen gedetailleerde en betrouwbare gegevens worden verkregen die cruciaal zijn voor het ontwikkelen van geoptimaliseerde BIPV-concepten voor particuliere woonbouw.

5 Theoretisch optimaal voorontwerp

Als uitgangspunt van de conclusies die voortkomen uit de literatuurstudie wordt er een voorontwerp opgemaakt dat als theoretisch ideaal fungeert. Dit model dient als hypothetisch referentiepunt voor verdere praktische uitwerkingen, aangezien het verschillende aspecten omvat die de fotovoltaïsche integratie optimaliseren op vlak van module- en integratie efficiëntie evenals een algemene kostenreductie. Het theoretische ideale model zal verder ook de randvoorwaarden van het onderzoek verduidelijken en hieraan voldoen.

Een eerste belangrijk punt binnen dit model is de incorporatie van een geventileerde luchtspouw achter de fotovoltaïsche modules. Zoals aangetoond zal een luchtruimte van 60 mm optimaal de module-efficiëntie en thermische capaciteit bevorderen. Een groot nadeel bij een geventileerde luchtspouw is de sterk verminderde brandveiligheid als gevolg van het schoorsteeneffect bij brand. Dit onderzoek beperkt zich echter tot particuliere laagbouw met als resultaat gereduceerde brandveiligheidseisen waaraan het model moet voldoen.

Verder zal het theoretisch model over een geoptimaliseerde thermische capaciteit beschikken als resultaat van meerdere overwegingen. Zoals eerder besproken bevordert het gebruik van een geventileerde luchtspouw de thermische capaciteit. Verder zijn de materiaalkeuze, alsook het vermijden van koudebruggen in de gevelconstructie essentieel voor een geoptimaliseerde thermische capaciteit. Beide deze aspecten worden verder in de praktische uitwerkingen van dit model besproken. Tot slot beschikt het voorontwerp alsook verdere praktische conceptuele uitwerkingen over een eenheidsdikte van 12 cm polyisocyanuraat (PIR) isolatiemateriaal.

5.1 Economische eigenschappen

Het efficiënt gebruik van materialen staat centraal bij de integratie van fotovoltaïsche modules in een gevel. Bij een retrofit-implementatie van BIPV verliest de bestaande gevelafwerking, zoals de gevelsteen getoond op figuren 4 en 6, echter zijn oorspronkelijke functie, wat leidt tot een suboptimale integratie van fotovoltaïsche gevelmaterialen. Zoals eerder vermeld, biedt de integratie van fotovoltaïsche modules in de ontwerpfase van een bouwschil aanzienlijke voordelen, aangezien een volledige vervanging van traditionele gevelmaterialen door BIPV mogelijk wordt, zoals te zien is op figuren 5 en 7.

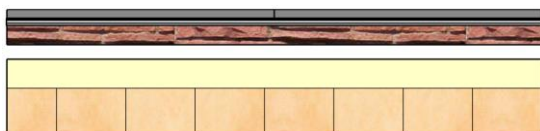


Fig. 4: Bovenaanzicht retrofit BIPV

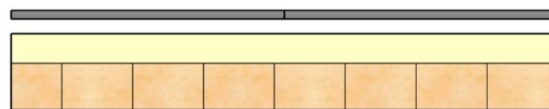


Fig. 5: Bovenaanzicht voorontwerp BIPV

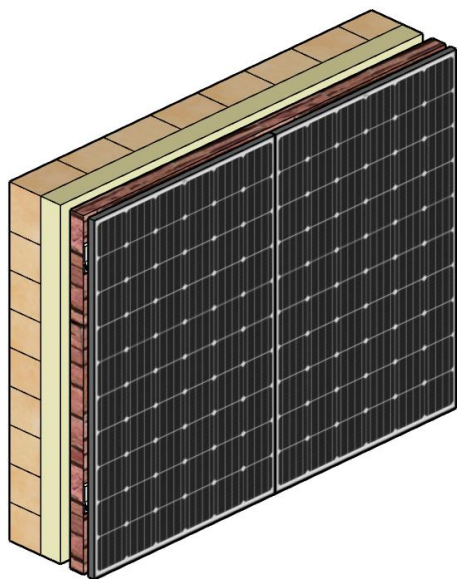


Fig. 6: Perspectief zicht retrofit BIPV

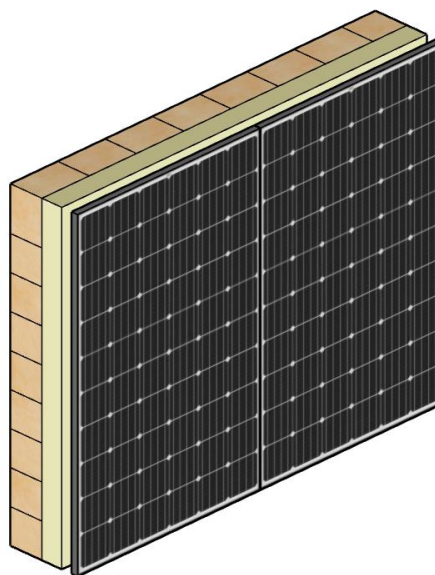


Fig. 7: Perspectief zicht theoretisch optimaal voorontwerp BIPV

Als gevolg van dit principe wordt de wanddikte verminderd, wat leidt tot een kostenreductie door de afname in het gebruik van gevelmaterialen. Bovendien verbetert een efficiënte benutting van de luchtruimte achter de fotovoltaïsche panelen de module-efficiëntie, resulterend in een hogere opbrengst. Deze benadering maakt de integratie van fotovoltaïsche panelen tijdens de ontwerpfase voordeliger in vergelijking met de retrofitting van BIPV, waarbij de bestaande gevelafwerking wordt vervangen door fotovoltaïsche panelen met een verbeterde functionaliteit.

5.2 Bouwtechnische eisen

Als resultaat kan het voorontwerp gemodelleerd worden om te fungeren als een kwantitatieve streefreferentie voor verdere praktische uitwerkingen, m.b.t. de verschillende bouwtechnische aspecten.

5.2.1 Thermische capaciteit

Allereerst wordt de thermische capaciteit berekend met als resultaat de warmtedoorgangscoefficiënt of U-waarde ter vergelijking tussen verschillende modellen. Verder wordt ook het temperatuurverloop doorheen de wand geplot ter visuele voorstelling. Deze modellering wordt uitgevoerd met specifieke randvoorwaarden om de omstandigheden van het systeem te definiëren, zoals besproken in hoofdstuk 4: Modelleringmethodologie.

De structuur wordt gemodelleerd a.d.h.v. een bitmap, zoals weergegeven op figuur 9, die als input dient voor zowel de thermische capaciteitsberekeningen in TRISCO 3D als de brandberekening in BISTRA 2D. Zoals te zien is in het model van het voorontwerp op figuur 8, is deze structuur opgebouwd uit snelbouwsteen, isolatie en het fotovoltaïsch paneel dienend als afwerkingsmateriaal. Verder is de geventileerde spouw als licht geventileerd gemodelleerd en ook zichtbaar in de bitmap.

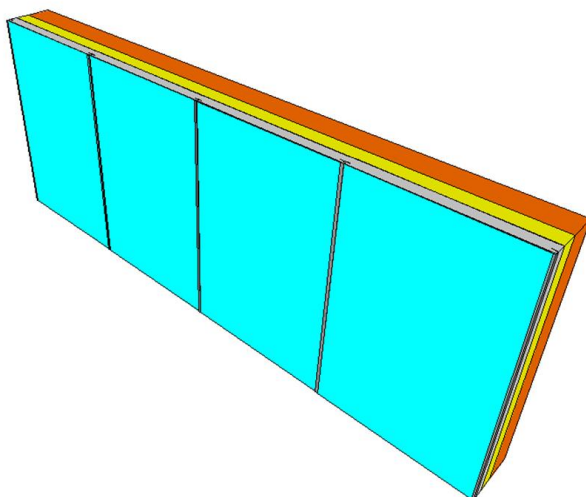


Fig. 8: *Perspectiefzicht modellering voorontwerp in TRISCO 3D*



Fig. 9: *Bovenaanzicht van 1 module uit bitmap voorontwerp*

- Exterieur
- Glas
- Aluminium montageprofiel
- Licht geventileerde luchtruimte
- Isolatie
- Snelbouwsteen
- Interieur

Zoals eerder besproken, en nu ook zichtbaar in de modellering, heerst er geen structurele coherentie in het voorontwerp. Dit met de reden dat het model enkel fungeert als ideale referentie voor verdere praktische uitwerkingen of concepten.

Als resultaat van de eerste modellering kan dus de theoretisch optimale warmtedoorgangscoefficiënt bepaald worden a.d.h.v. formule 1, met als resultaat:

$$U = 0,173 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$$

Verder wordt als visueel resultaat het temperatuurverloop geplot overheen de dikte van het model, zoals te zien is op figuren 10 en 11. Het is belangrijk om op te merken dat het temperatuurverloop volledig parallel verloopt overheen de breedte van het model. Dit is als gevolg van het feit dat er geen structurele bevestigingen van de fotovoltaïsche panelen zijn die als koudebruggen het temperatuurverloop zouden kunnen storen. Verder in de praktische uitwerkingen zullen concrete bevestigingsmethoden gemodelleerd worden die het model structureel

zullen doen kloppen met als gevolg een verminderde thermische capaciteit in vergelijking met de huidige warmtedoorgangscoefficiënt.

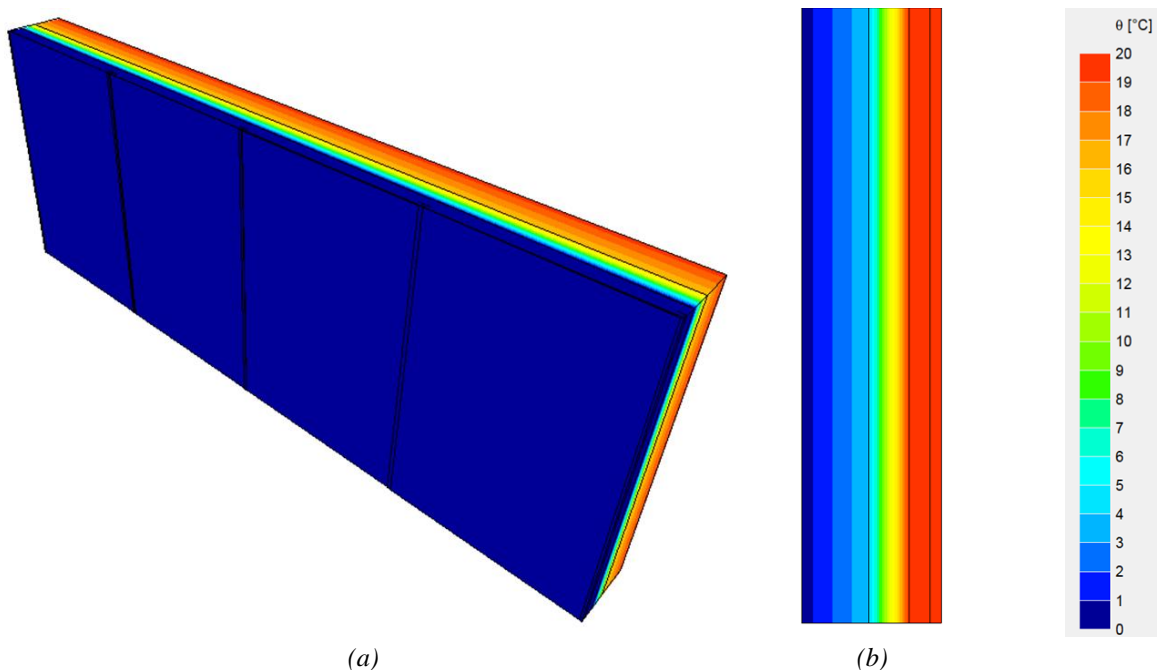


Fig. 10: Temperatuursverloop in perspectiefzicht (a) en op kritische doorsnede (b)

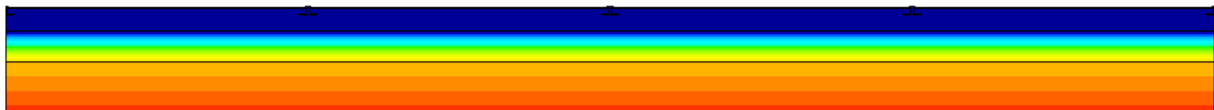


Fig. 11: Temperatuursverloop in bovenaanzicht

5.2.2 Brandveiligheid

Brandveiligheid is het tweede aspect waarop de systemen beoordeeld zullen worden. Bij het theoretisch ideaal voorontwerp is de hitteoverdracht tussen de fotovoltaïsche panelen en de isolatie beperkt, omdat er geen structurele verbinding is tussen deze componenten. Een exacte modellering van dit voorontwerp zal dus resulteren in niet realistische resultaten. Verdere conceptuele uitwerkingen van het voorontwerp worden wel nader gemodelleerd m.b.t. tot de brandveiligheid.

5.2.3 Structurele integriteit

Het laatste deel van de bouwtechnische aspecten, waarop de modellen worden beoordeeld, behandelt de structurele integriteit m.b.t. de gebruikte verankerings- en montagemethoden, alsook de structurele eenheid van het systeem zelf. Hierbij wordt gekeken naar eerder praktische aspecten binnen de montage zoals het werken met de onregelmatigheden in de snelbouwwand en het waarborgen van de bouwtechnische vereisten. Zoals eerder besproken bij de brandveiligheid, wordt ook hier gekeken naar mogelijkheden voor bevestigingen die intern in het systeem worden gebruikt, los van de bevestiging van het systeem aan de muur. Dit omvat de praktische toepassingen van verankerungen, verbindingen en verlijmingen binnen het systeem.

5.3 Aspecten betreffende implementatie

Verder zal het voorontwerp praktisch worden uitgewerkt met als resultaat twee concepten met elk een verschillende benadering in integratie van het fotovoltaïsch materiaal als gevelafwerking. Deze praktische conceptuele uitwerkingen worden tot slot beoordeeld o.b.v. verschillende aspecten betreffende de implementatie van elke uitwerking specifiek.

Elk concept zal geanalyseerd worden o.b.v. de efficiëntie van de implementatie ervan in de gebouwschil. Een gerichte vraag is in hoeverre dit concept kan leiden tot vereenvoudigde project engineering. Met andere

woorden, in welke mate kan dit concept modulair worden bevestigd zonder dat er veel complexiteit ontstaat tijdens de montage.

Een ander belangrijk aspect is de mate waarin een concept kan worden toegepast in diverse projecten met uiteenlopende randvoorwaarden. Hierbij wordt onderzocht in hoeverre het concept aanpasbaar is aan verschillende projectspecifieke eisen en omgevingen.

Tot slot zal worden gekeken naar de gebruiksvriendelijkheid van het eerste concept tijdens de montage. Het is van belang om te beoordelen in hoeverre het concept eenvoudig te installeren is, zodat de drempel voor arbeiders om het te plaatsen zo laag mogelijk blijft.

5.4 Beslissingstabel ter vergelijking conceptuele uitwerkingen

Een beslissingstabel (Tabel 2) wordt opgesteld op basis van de bevindingen uit het theoretisch optimaal voorontwerp, ideale principes die blijken uit de literatuurstudie alsook gebreken vastgesteld uit het marktonderzoek. Deze tabel dient als een cruciaal instrument voor het beoordelen en vergelijken van verdere conceptuele uitwerkingen. Door gebruik te maken van een gestructureerde evaluatie op basis van verschillende criteria, biedt de tabel inzicht in de economische eigenschappen, bouwtechnische eisen en implementatieaspecten van elk concept. Het doel van deze vergelijking is om de sterkten en zwakten van de verschillende uitwerkingen helder in kaart te brengen, zodat een weloverwogen keuze gemaakt kan worden voor de meest geschikte oplossing in de praktijk. Deze systematische benadering zorgt ervoor dat de besluitvorming ondersteund wordt door gedetailleerde en objectieve analyses, die voortkomen uit een grondige theoretische basis.

Tabel 7: Beslissingstabel o.b.v het voorontwerp, literatuurstudie en marktonderzoek

Bouwtechnische eisen
1 Thermische capaciteit
1.1 Warmtedoorgangscoefficiënt
1.2 Temperatuurverloop
2 Brandveiligheid
2.1 Temperatuurstijging per materiaal
2.2 Faalmechanismen
2.3 Mogelijkheid tot verlijming
3 Structurele integriteit
3.1 Interne nauwkeurigheid
3.2 Systeem gewicht
3.3 Bestendigheid tegen onnauwkeurigheden
Economische eigenschappen
1 Initiële meerkost
2 Mogelijkheden tot kostenreducties
Aspecten betreffende implementatie
1 Modulariteit
2 Gebruiksvriendelijkheid
3 Mate van project engineering
4 Projectspectifieke toepasbaarheid
5 Circulariteit

6 Concept I: In situ montage

Als een eerste praktische uitwerking van het theoretisch optimaal voorontwerp wordt een concept ontwikkeld voor een in-situ-montage van een BIPV-wand. Dit concept heeft als doel het creëren van een kosteneffectieve plaatsingsmethode die zo toegankelijk mogelijk is in montage en simultaan zo nauwkeurig mogelijk kan worden toegepast op eerder kleinschalige projectbasis. Hiermee wordt enigszins beoogd om de reeds bestaande standaard (in situ) plaatsingsmethoden op de markt te evalueren. Echter zijn deze reeds bestaande plaatsingsmethoden voornamelijk geschikt voor industriële gevels en worden meestal toegepast op reeds geïnstalleerde gevelafwerkingsmaterialen, zoals sandwichpanelen. Zoals eerder besproken, resulteert dit niet tot een optimale integratie van fotonvoltaïsche modules in een gevel. Bovendien voorzien de huidige plaatsingssystemen niet een intentionele of geoptimaliseerde geventileerde luchtruimte achter de panelen.

Binnen dit concept wordt de keuze gemaakt om gebruik te maken van gestandaardiseerde fotonvoltaïsche panelen, in tegenstelling tot op maat gemaakte panelen, zoals te zien is op figuren 12 en 15. Verder wordt er gebruik gemaakt van geschroefde profielen die op de achterconstructie van het standaard paneel worden geplaatst. Deze panelen worden vervolgens m.b.v. deze profielen opgehangen en verder verankerd aan een railsysteem dat bevestigd is aan kepers, waar tussen isolatie wordt geplaatst, zoals weergegeven op figuren 12, 13, 14 en 15. De kepers zijn op hun beurt verankerd in de snelbouwwand.

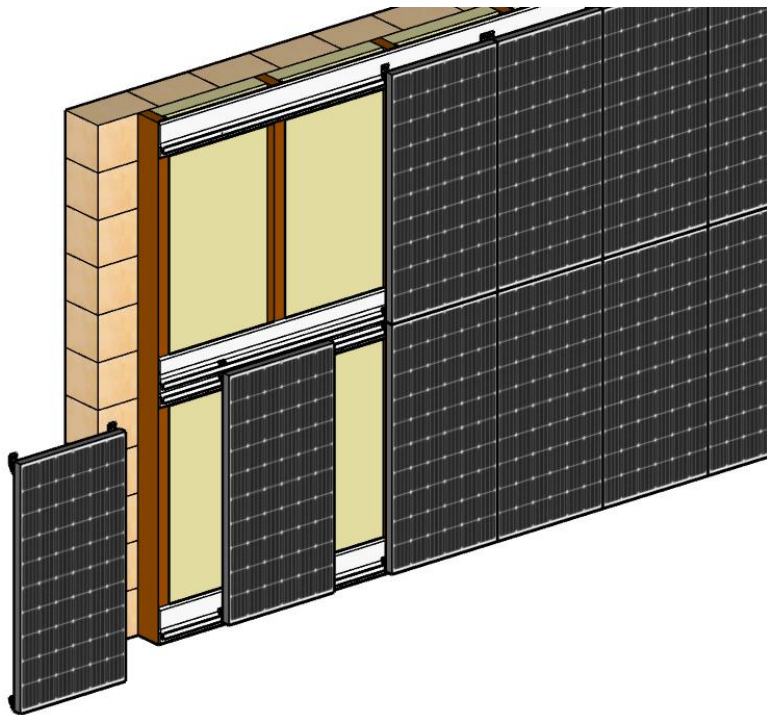


Fig. 12: Perspectiefvooraanzicht Concept I

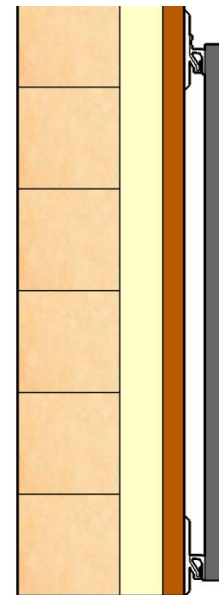


Fig. 13: Zijaanzicht Concept I

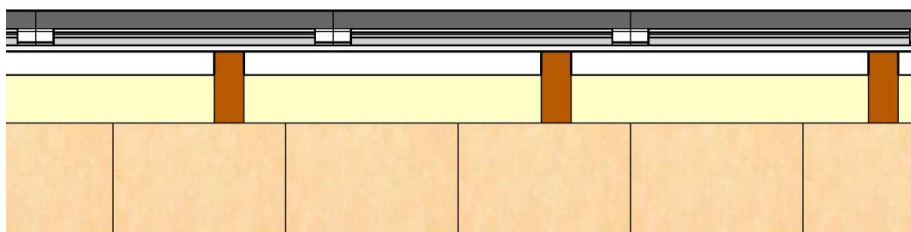


Fig. 14: Bovenaanzicht Concept I

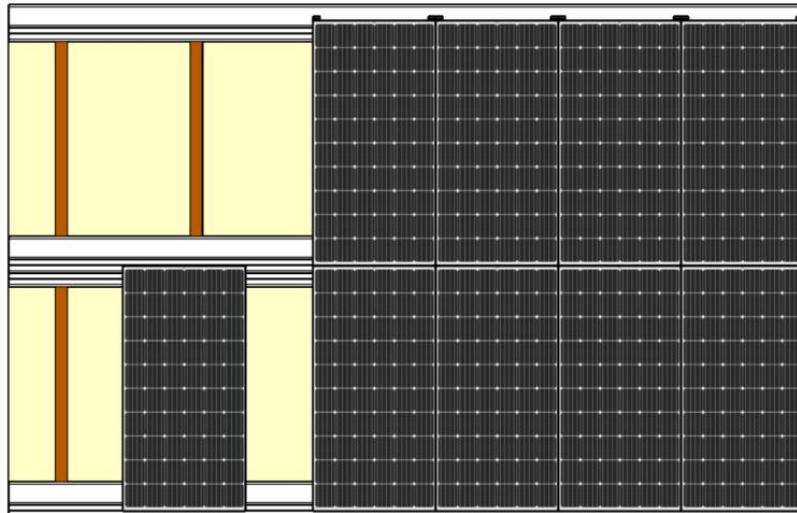


Fig. 15: Vooraanzicht plaatsing en verankering fotovoltaïsche panelen op railsysteem Concept I

6.1 Economische eigenschappen

Aangezien de financiële insteek van dit concept is om de systeemkost zo redelijk mogelijk te behouden werd de keuze gemaakt om gestandaardiseerde fotovoltaïsche panelen te gebruiken. Een andere aspect binnen deze insteek is het minimaal gebruik van materialen, wat resulteert in een volledige montage op de bouwplaats zal gebeuren.

Deze benadering zal echter ten koste gaan van mogelijke kostenbesparingen tijdens de plaatsing, aangezien de benodigde arbeidskrachten op de bouwplaats een toenemende onzekerheid vormen en daardoor aanzienlijke kosten met zich mee kunnen brengen. Bovendien is de mogelijkheid tot kostenbesparing op het gebied van project engineering beperkt, aangezien er het ontwerp binnen elk project specifiek zal verschillen.

6.2 Bouwtechnische eisen

6.2.1 Thermische capaciteit

Aangezien Concept I is samengesteld uit dunne horizontale rail- en kleine verankeringsprofielen, is ervoor gekozen om de modellering in bovenaanzicht uit te voeren met behulp van een equivalent volume aan aluminium bevestigingen, zoals te zien is op figuren 16 en 17, in vergelijking met figuur 14. Deze aanpak is gerechtvaardigd vanwege de complexiteit die wordt geïntroduceerd door deze profielen. Bovendien zal de warmtedoorgangscoefficiënt slechts indicatief worden beoordeeld voor de praktische conceptuele uitwerkingen, met als gevolg dat de overmatig complexe modellering als niet noodzakelijk beschouwd.

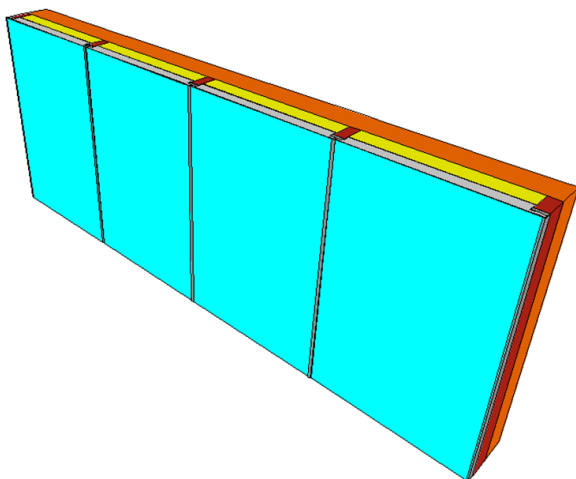


Fig. 16: Perspectiefzicht modellering Concept I in TRISCO 3D



Fig. 17: Bovenaanzicht van 1 module uit bitmap Concept I

- Exterieur
- Glas
- Licht geventileerde luchtruimte
- Aluminium bevestigingsprofielen
- Isolatie
- Snelbouwsteen
- Interieur

Als resultaat van de modellering kan de warmtedoorgangscoefficiënt berekend worden a.d.h.v. formule 1, met als resultaat een U-waarde van 0,209 [W/(m²K)].

Hoewel deze waarde als indicatief beschouwt zal worden, kan geconcludeerd worden dat dit concept, binnen de praktische grenzen van een structureel coherente uitvoering, een optimale thermische capaciteit biedt doordat de structurele bevestiging via houten kepers plaatsvindt, wat de onderbreking van de isolatie beperkt.

Een tweede conclusie kan worden getrokken uit het temperatuursverloop, zoals geplot op figuren 18 en 19, van het model. Het effect van kepers als onderbreking van de isolatie is zichtbaar, maar heeft slechts een minimaal effect op de thermische capaciteit in vergelijking met het theoretische ideaal. De uitwijking van de isotherme lijnen in het temperatuursverloop, zoals te zien op figuur 19, toont dit effect aan. Desondanks is het duidelijk dat er geringe indringing van het koudefront is op de kritische doorsnede, zoals te zien is op figuur 18b, wat resulteert in een acceptabele warmtedoorgangscoefficiënt.

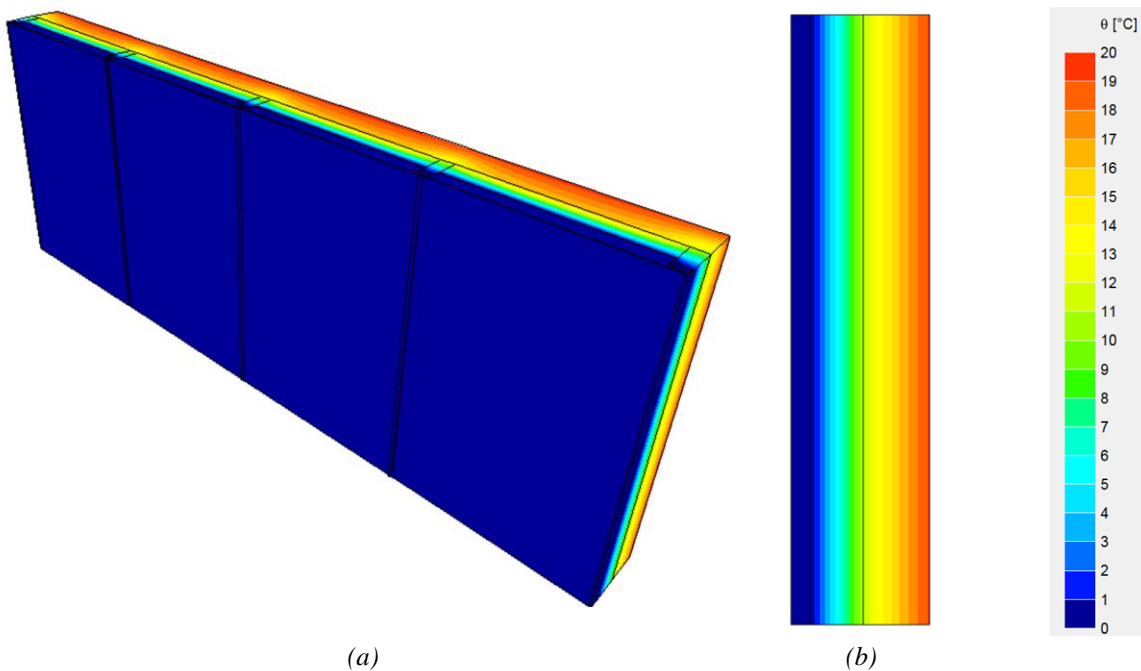


Fig. 18: Temperatuursverloop Concept I in perspectiefzicht (a) en op kritische doorsnede (b)

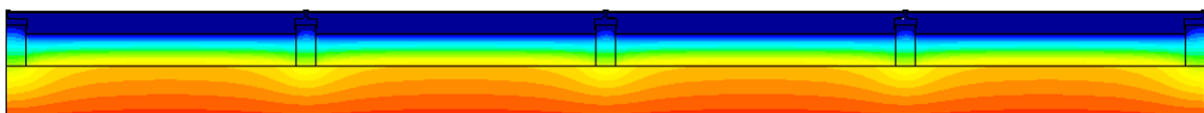


Fig. 19: Temperatuursverloop Concept I in bovenaanzicht

6.2.2 Brandveiligheid

Zoals eerder besproken wordt de brandveiligheid geanalyseerd m.b.v. de BISTRA 2D software, waarbij de genormeerde ISO 834 brandcurve gebruikt wordt. Als resultaat van de modellering wordt de gemiddelde temperatuurstijging, als gevolg van de ISO 834 brandcurve, per materiaal uitgezet in functie van de tijd, zoals geïllustreerd op figuur 20. Deze resultaten worden indicatief bekeken en kunnen vergeleken worden overheen verschillende conceptuele uitwerkingen.

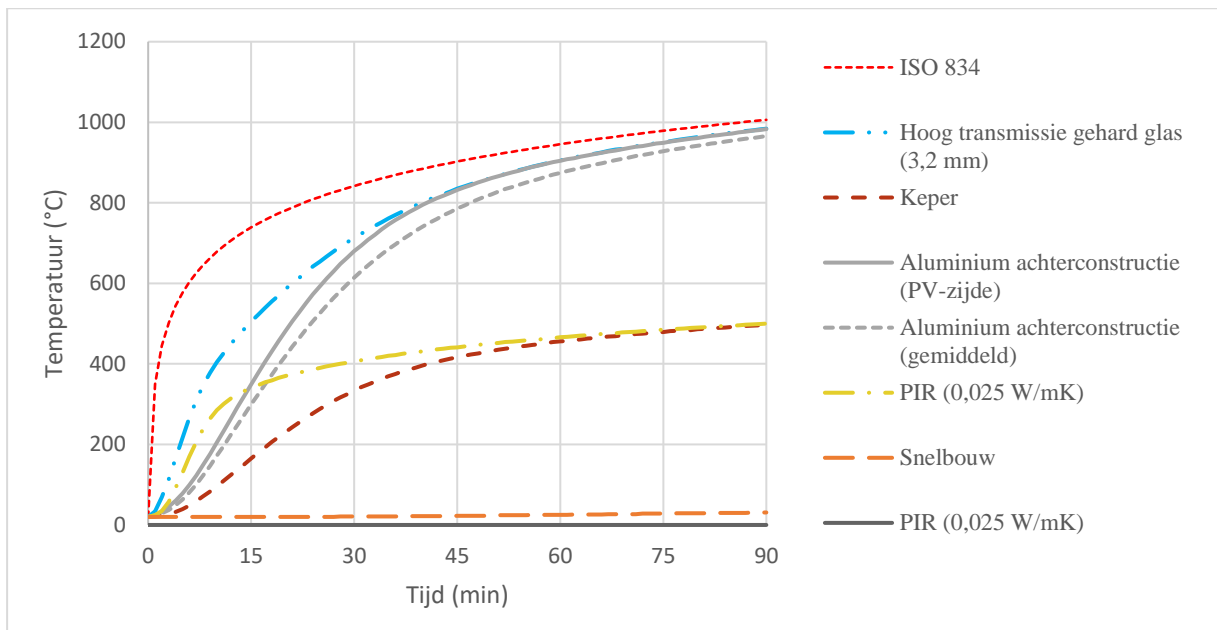


Fig. 20: Gemiddelde temperatuurstijging bij brand Concept I

Uit het verloop van de gemiddelde temperatuurstijging van Concept I kunnen reeds enkele conclusies worden afgeleid. Er is een aanzienlijke stijging waargenomen bij het glas dat wordt gebruikt in het standaard fotovoltaïsche paneel, evenals bij de aluminium bevestigingsprofielen. Dit suggereert mogelijk een falen van deze materialen onder brandbelasting. Bovendien is er slechts een minimale temperatuurstijging waargenomen bij de snelbouwsteen, wat aangeeft dat het systeem zelf effectief warmte absorbeert in geval van brand.

6.2.3 Structurele integriteit

Het voordeel van Concept I m.b.t. de structurele integriteit is dat het zeer specifiek op projectbasis kan worden toegepast. Dit resulteert in de mogelijkheid om de structurele integriteit binnen elk project te optimaliseren, zij het ten koste van de projectengineering en implementatiekosten. Dit impliceert dat de montage binnen elk project zeer nauwkeurig moet plaatsvinden, zoals nader besproken wordt bij 6.3: Aspecten betreffende implementatie, met de mogelijkheid tot een positief effect op de structurele integriteit, maar negatief effect op de mogelijke kostenreducties, zoals besproken bij 6.1: Economische eigenschappen.

Concept I biedt bovendien voordelen dankzij het lichte gewicht, dat volgens de modelleringsmethodologie benaderd wordt op ongeveer 50 kg dragend gewicht per module. Dit gewicht omvat de railprofielen, verankeringsprofielen en standaard fotovoltaïsche panelen. Het relatief lage gewicht biedt verschillende voordelen, zoals:

- Verminderde werklust bij montage
- Verminderde transportlast
- Verminderde structurele belasting

Daarnaast zijn specifieke aanpassingen tijdens de montage eenvoudiger uit te voeren. Dit is vooral nuttig voor projecten met speciale vereisten of onregelmatige muurvormen, wat vaak voorkomt bij particuliere woonhuizen.

6.3 Aspecten betreffende implementatie

Zoals eerder besproken, biedt Concept I een aanzienlijk voordeel door zijn vermogen tot zeer nauwkeurige projectspecificatie, wat een belangrijk punt is aangezien, in tegenstelling tot industriële eenheidsgevels, vereist de particuliere woonbouw frequent werk rond deuren en ramen. In combinatie met weinig uniformiteit in muurgeometrieën resulteert dit in de noodzaak van een systeem met een hoge mate van aanpasbaarheid, waarin Concept I uitblinkt vanwege zijn projectspecificatiemogelijkheden.

Als nadelig gevolg van deze mogelijkheid tot projectspecificatie doet zich een situatie voor waarbinnen elk project vereist dat het systeem zeer nauwkeurig wordt ontworpen en uitgevoerd wat resulteert in een toename in

zowel de montagekosten als de -duur, zoals besproken bij de *Economische eigenschappen* van Concept I. Daarnaast brengt het feit dat het montagesysteem uit meerdere componenten bestaat extra uitdagingen met zich mee. Het systeem vereist eerst de bevestiging van verankeringsprofielen op het fotovoltaïsch paneel, waarna deze in het horizontale railsysteem worden verankerd, zoals te zien is op figuren 21 en 22. Op meerdere punten in de implementatie moet dus nauwkeurigheid gegarandeerd worden, wat het risico op fouten vergroot.

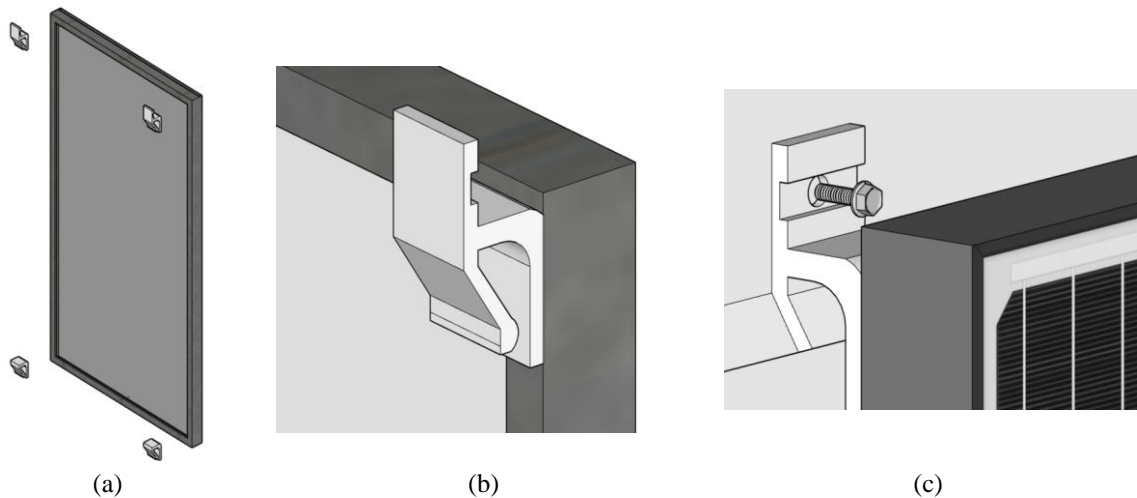


Fig. 21: (a) Plaatsing verankeringsprofielen Concept I op fotovoltaïsch paneel, (b) Detail geplaatst verankeringsprofiel Concept I, (c) Verankeringsprofiel Concept I op horizontaal railsysteem Concept I

Een andere fundamentele reden voor de noodzaak van nauwkeurig ontwerp en montage is het feit dat de meerdere bevestigingsmethoden tijdens de implementatie direct invloed hebben op de paralleliteit van de gevelafwerking. Specifiek moeten de verankeringsprofielen met grote nauwkeurigheid op het fotovoltaïsch paneel worden bevestigd, zoals te zien op figuren 21a en 21b waarna deze profielen in het railsysteem worden geplaatst als op figuur 21c. Hiernaast moeten ook de kepers met grote nauwkeurigheid uitgelijnd en bevestigd worden op de snelbouwwand om de paralleliteit van de horizontale railsystemen te waarborgen waarna de fotovoltaïsche panelen met de verankeringsprofielen bevestigd worden, zoals te zien is op figuur 22. Al deze aspecten hebben een aanzienlijke invloed op de algehele esthetische afwerking van de gevel. Daarom is het essentieel dat zowel de kepers als de verankeringsprofielen met grote nauwkeurigheid worden ontworpen en geplaatst om de integriteit van de afwerking te waarborgen.

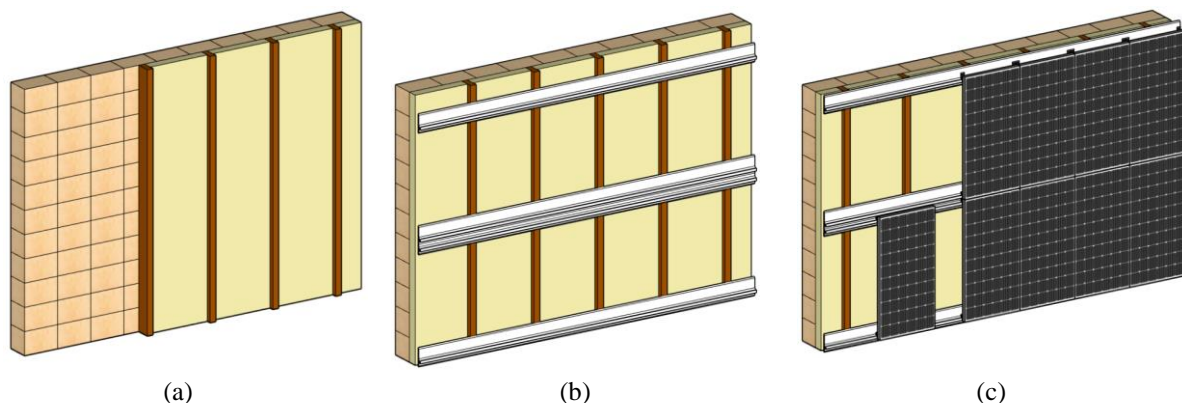


Fig. 22: (a) Plaatsing kepers en isolatie Concept I op snelbouwwand, (b) Plaatsing horizontaal railsysteem op kepers Concept I, (c) Plaatsing en verankeringsprofiel Concept I op fotovoltaïsch paneel Concept I

Het is van belang te benadrukken dat, hoewel de noodzaak voor nauwkeurigheid in ontwerp en uitvoering de kosten en montagetijd verhoogt, Concept I wel het voordeel biedt van aanpasbaarheid binnen elk project. Dit kenmerk is bij andere conceptuele uitwerkingen niet altijd aanwezig. Ondanks de nadelen maakt deze flexibiliteit het systeem tot een waardevolle keuze voor projecten met specifieke eisen aan esthetiek en structurele integriteit.

7 Concept II: Een Modulaire Benadering

Als een tweede praktische uitwerking van het theoretische ideaalmodel, wordt Concept II geïntroduceerd als een innovatieve modulaire benadering voor de realisatie van fotovoltaïsch actieve gevels, geïntegreerd met isolatie en een luchtsponw. Deze benadering heeft als doel de kosten voor projectengineering en integratie te verlagen door de ontwikkeling van een prefab systeem dat geschikt is voor een breed scala aan toepassingen. Dit in tegenstelling tot reeds bestaande bevestigingsmethoden, die vaak beperkt zijn tot standaard panelen, biedt Concept II een oplossing die de implementatie van op maat gemaakte fotovoltaïsche panelen en hun flexibiliteit mogelijk maakt.

Concept II vertegenwoordigt een vooruitstrevende benadering van de integratie van fotovoltaïsche systemen in gebouwgevels, met een focus op modulariteit, maatwerk en efficiëntie. Door het combineren van vernieuwende technologieën en innovatieve ontwerpprincipes, streeft Concept II ernaar om de normen te verleggen en een nieuwe standaard te vestigen voor duurzame en kosteneffectieve gebouwintegratie van zonne-energie.

Het kernprincipe van Concept II ligt in de modulaire aanpak, waarbij op maat gemaakte glas/glas fotovoltaïsche panelen worden gebruikt, die vervolgens worden verlijmd op een aluminium achterconstructie. Deze achterconstructie integreert niet alleen de fotovoltaïsche panelen, maar bevat ook geïntegreerde isolatie en een geventileerde luchtruimte, zoals te zien is op figuren 23, 24, 25.

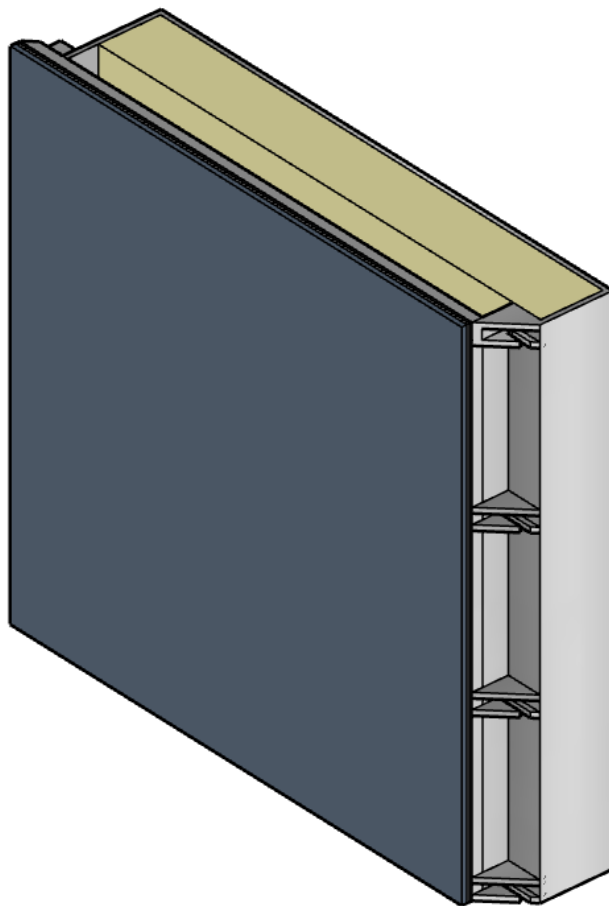


Fig. 23: Perspectiefzicht Concept II

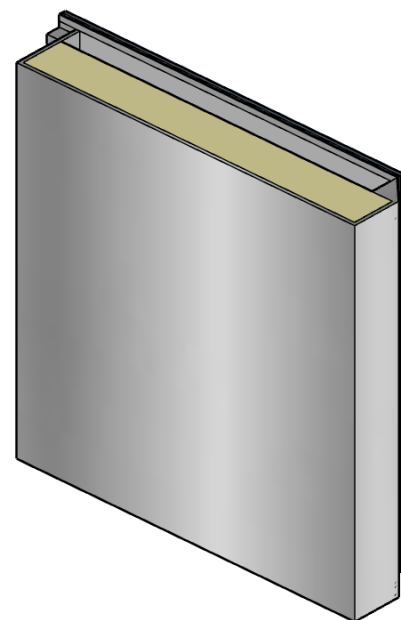


Fig. 24: Perspectiefzicht Concept II

Er is gebruik gemaakt van een afgeschuind "klik" systeem, waardoor de verankering van de modules in de snelbouwwand als blinde bevestiging kan worden uitgevoerd. Dit principe zorgt ervoor dat elke module verankering wordt bedekt door een volgende module, zoals weergegeven op figuur 25.

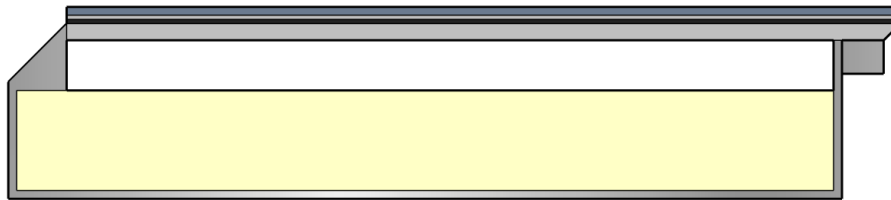


Fig. 25: Bovenaanzicht concept II

7.1 Economische eigenschappen

In lijn met het financiële perspectief van Concept II, gericht op het minimaliseren van systeemkosten, is besloten om op maat gemaakte glas/glas fotovoltaïsche panelen te gebruiken. Deze aanpak biedt niet alleen esthetische voordelen, maar stelt ook in staat om de modules te optimaliseren voor specifieke projectvereisten, waardoor onnodig materiaalgebruik wordt vermeden. Echter een logisch nadeel in het gebruik van op maat gemaakte fotovoltaïsche panelen, is het feit dat de initiële investering opmerkelijk hoger zal liggen in vergelijking met standaard panelen. Bovendien is de financiële afweging enorm afhankelijk van de schaal van productie en projectdimensies, waarbij het in de doorsnee particuliere projecten vaak het breekpunt blijkt.

Hiernaast biedt Concept II, desondanks een hogere initiële kost, meer mogelijkheden tot kostenreducties t.o.v. Concept I. Eerst en vooral biedt de modulaire benadering de mogelijkheid tot een zekere vermindering van arbeidskosten en – duur in de montage, aangezien het systeem zeer efficiënt kan geplaatst worden zoals besproken wordt bij de *Structurele integriteit* van Concept II. Bovendien biedt het concept ook mogelijkheden voor materiaaloptimalisatie, aangezien overdimensionering kan worden voorkomen dankzij de precisie die mogelijk is door het volledig prefabriceren van het systeem.

7.2 Bouwtechnische eisen

7.2.1 Thermische capaciteit

De thermische berekeningen voor Concept II gebeuren analoog aan de berekeningen besproken voor Concept I. Het verschil hierbij is dat, dankzij de verticale lineariteit van de module, er geen gebruik is gemaakt van een equivalent volume aan aluminium waardoor het model redelijk nauwkeurig berekend kan worden. Eensgelijk als bij Concept I wordt een bitmap, zoals te zien is op figuur 27, opgesteld van het systeem die verder, binnen eenzelfde randvoorwaarden, berekend zal worden. Dit betekent ook dat de dimensies van de op maat gemaakte fotovoltaïsch panelen als gelijk genomen worden, zoals te zien op figuur 26, aan die van het standaard paneel gebruikt bij Concept I alsook het theoretisch ideaal.

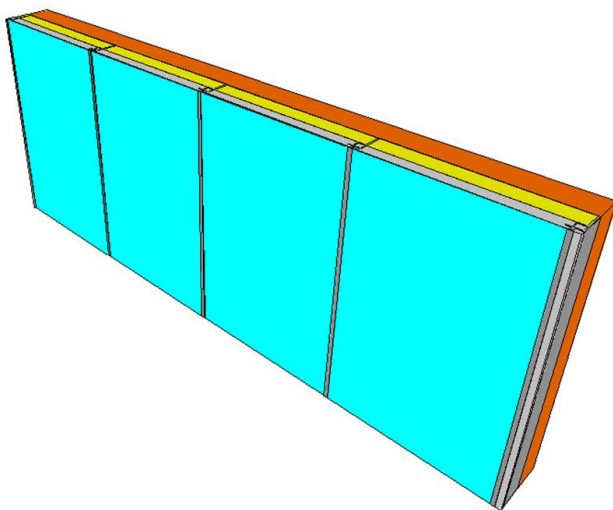


Fig. 26: Perspectiefzicht modellering Concept II in TRISCO 3D



Fig. 27: Bovenaanzicht van 1 module uit bitmap Concept II

- Exterieur
- Glas
- Licht geventileerde luchtruimte
- Aluminium achterconstructie
- Isolatie
- Snelbouwsteen
- Interieur

Als resultaat van de modellering wordt de warmtedoorgangscoefficiënt bepaald a.d.h.v. formule 1 met als resultaat een U-waarde van 0,531 [W/m²K]. Hoewel deze waarde als indicatief beschouwt zal worden, kan geconcludeerd worden dat dit concept een opmerkelijk verminderde thermische weerstand vertoont ten opzichte van Concept I.

De verminderde thermische weerstand is direct het gevolg van het overmatige gebruik van aluminium, wat leidt tot koudebruggen, zoals zichtbaar is op figuur 28.



Fig. 28: Bovenaanzicht aluminium koudebruggen Concept II

Deze conclusie wordt verder versterkt als door het temperatuursverloop van het model, zoals te zien is op figuren 29 en 29, waar een opvallende afwijking van de isothermische lijnen merkbaar is ter hoogte van de bevestigingspunten van de modules. Dit is de locatie waar de aluminium loopt van de gevelzijde van de module tot aan de snelbouwsteen en waar dus zich de koudebruggen zich bevinden. Als gevolg hiervan vindt er een significante verplaatsing plaats van het koudefront dieper in de wand, zoals te zien is op de kritische doorsnede als getoond op figuur 29b, in vergelijking met de geringe indringing van het koudefront als bij Concept I, op figuur 18b.

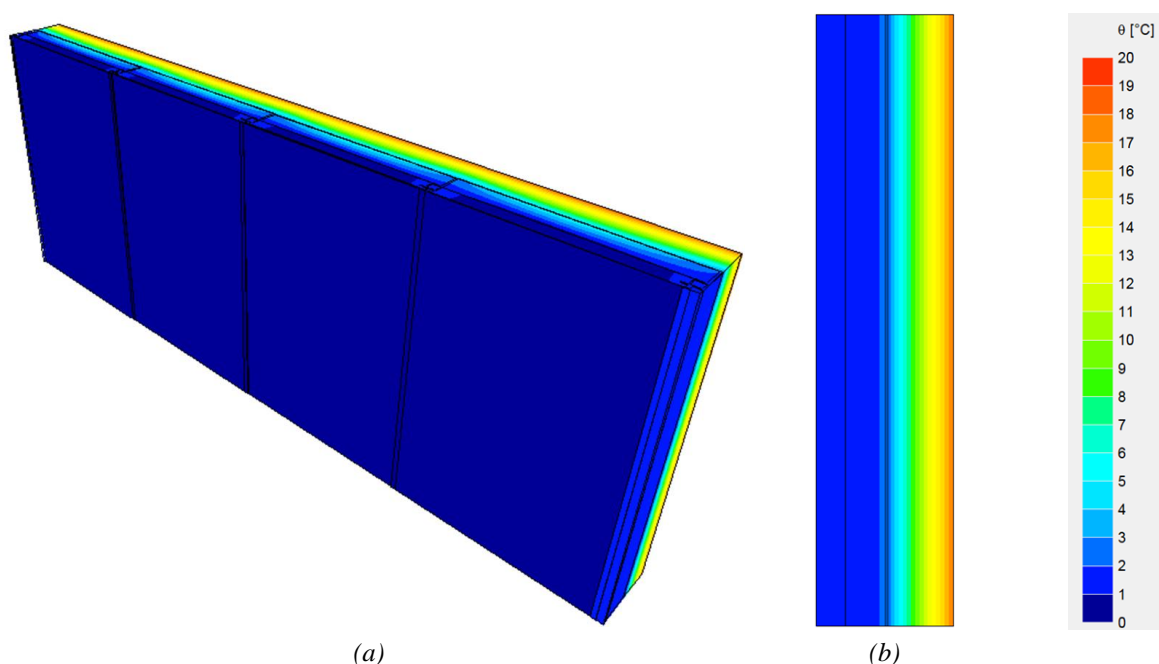


Fig. 29: Temperatuursverloop Concept II in perspectiefzicht (a) en op kritische doorsnede (b)

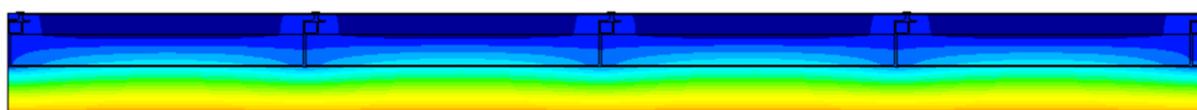


Fig. 30: Temperatuursverloop Concept II in bovenaanzicht

7.2.2 Brandveiligheid

De brandveiligheid van Concept II gebeurt o.b.v. eenzelfde bitmap, als te zien is op figuur 27, op analoge wijze zoals beschreven in *Brandveiligheid* bij Concept I. Als resultaat van deze modellering wordt opnieuw de gemiddelde temperatuurstijging, als gevolg van de lineair benaderde brandcurve, per gebruikt materiaal uitgezet

in functie van de tijd, zoals geplot is op figuur 31. Hierbij wordt er ook onderscheid gemaakt tussen de aluminium enerzijds aan de gevelzijde en anderzijds aan de snelbouwzijde.

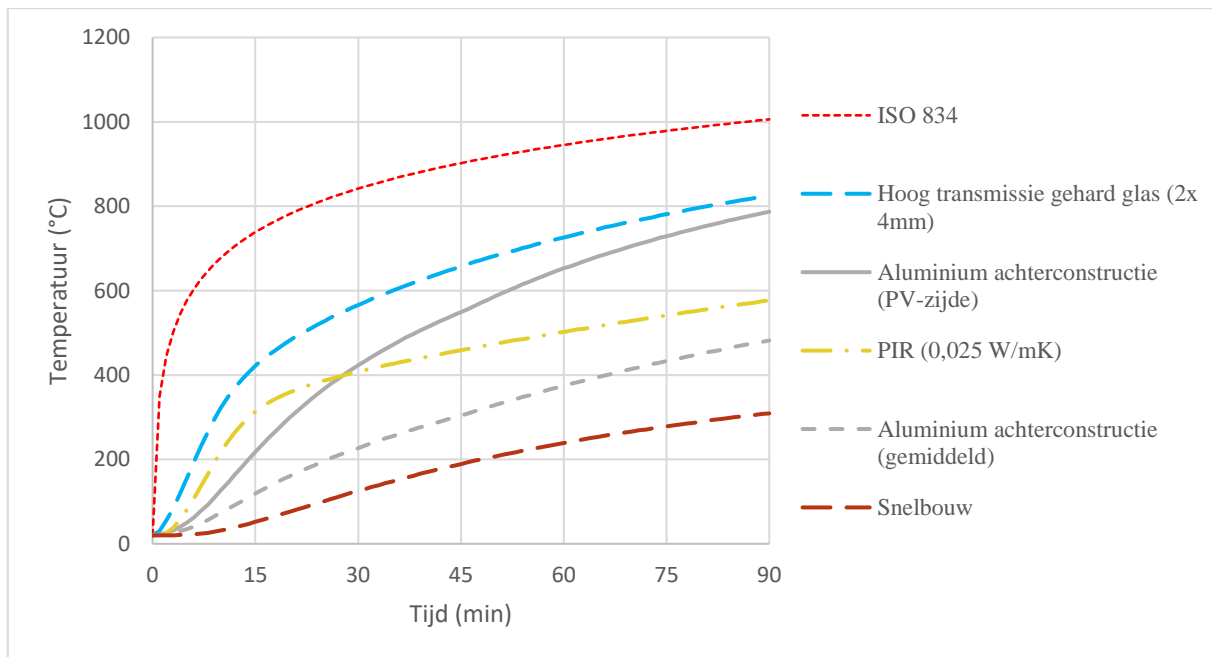


Fig. 31: Gemiddelde temperatuurstijging

Deze resultaten worden indicatief vergeleken worden met de temperatuurstijgingscurves van Concept I, waaruit conclusies betreffende verschillende faalmechanismen tussen beide concepten kunnen getrokken worden. Deze vergelijking en concrete conclusies worden nader besproken in hoofdstuk 8: Discussie van modelleringsresultaten.

7.2.3 Structurele integriteit

Een belangrijk gegeven binnen Concept II is het feit dat de modules volledig in prefabricage gemaakt kunnen worden, wat wil zeggen dat er een grotere nauwkeurigheid heerst betreffende de verbindingen tussen verschillende materialen, bevorderend voor de algehele structurele integriteit.

Bovendien kan de te plaatsen module met behulp van het “klik-schroef” systeem, zoals te zien is op figuur 32, worden vergrendeld in de reeds verankerde module. Dankzij de momentenloze mechanische verbinding tussen deze modules, kan de te plaatsen module na vergrendeling worden verankerd in de snelbouw, als getoond op figuur 33.

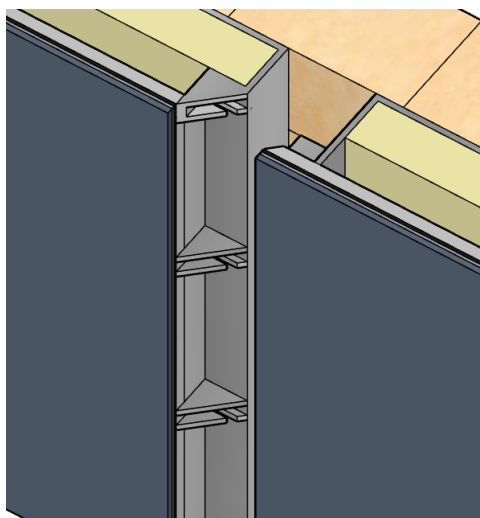


Fig. 32: “Klik”-systeem Concept II

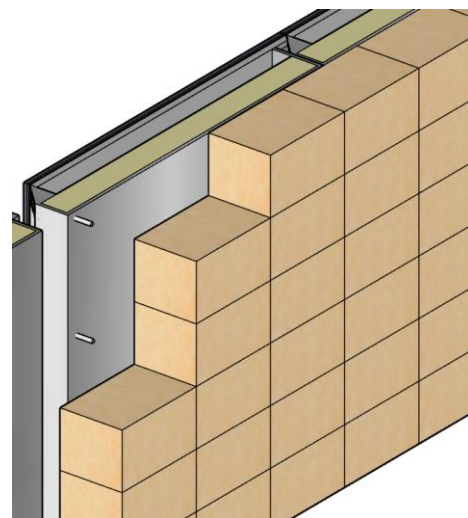


Fig. 33: Verankering modules Concept II in snelbouw

Concept II brengt echter nadelen met zich mee vanwege het zwaardere gewicht, dat volgens de modelleringsmethodologie benaderd wordt op ongeveer 93 kg dragend gewicht. Dit gewicht omvat de aluminium achterconstructie, isolatie en op maat gemaakte fotovoltaïsche panelen met een 4 mm voor- en achterglas. Het relatief hoge gewicht resulteert in een verhoogde werklust bij montage en een zwaardere transportlast. De structurele belasting is complexer omdat de muurdimensie, wegens de modulariteit van Concept II, verminderd in vergelijking met Concept I. Hoewel de krachtswerking hierdoor voordeliger is, moet dit zorgvuldig worden afgewogen tegen het verzwaarde gewicht.

7.3 Aspecten betreffende implementatie

Een laatste belangrijk aspect binnen de totstandkoming van dit concept is de esthetische afwerking van het systeem bij implementatie. Met behulp van het eerder besproken “klik”-systeem, zoals te zien is op figuur 32 kunnen de modules in de snelbouw verankerd worden, zoals getoont op figuur 33, waarbij de achterconstructie volledig onzichtbaar is in de afwerking, als te zien op figuur 34.

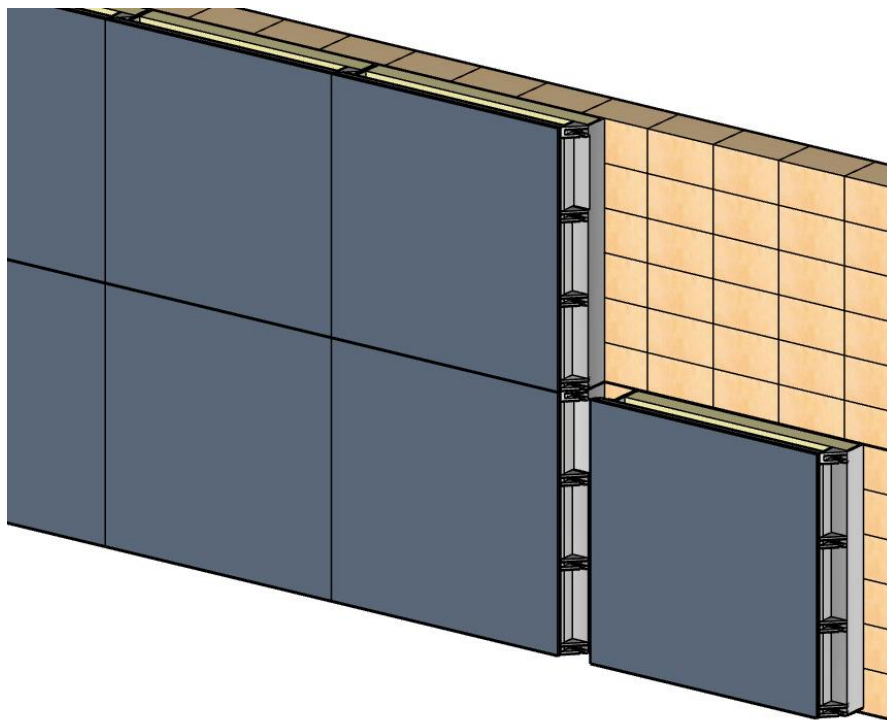


Fig. 34: Esthetische afwerking met onzichtbare achterconstructie Concept II

Daarnaast bieden de op maat gemaakte fotovoltaïsche panelen een esthetisch hoogwaardige gevelafwerking. Door het gebruik van gekleurde folies, het ontbreken van een aluminium kader voor verankering, en het elimineren van andere minder aantrekkelijke kenmerken die typisch zijn voor gestandaardiseerde fotovoltaïsche panelen, zorgen deze op maat gemaakte panelen voor esthetische voordelen die gestandaardiseerde panelen niet kunnen evenaren. Tot slot biedt het gebruik van op maat gemaakte panelen niet alleen een esthetisch voordeel, maar stelt ook in staat om de modules te optimaliseren in dimensie voor specifieke projectvereisten.

8 Discussie van onderzoeksresultaten

In tabel 3 worden de modelleringsresultaten van Concept I (In-Situ Montage) en Concept II (Modulaire Benadering) vergeleken en beoordeeld op basis van hoe dicht ze in de buurt van de waarden van het theoretisch optimaal voorontwerp komen. Dit biedt inzicht in de sterke en zwakke punten van beide concepten op verschillende criteria, zoals eerder besproken en te zien in tabel 2.

Tabel 8: Vergelijking bouwtechnische eisen Concept I en II

Bouwtechnische eisen	Concept I: In-Situ Montage	Concept II: Modulaire Benadering
1 Thermische capaciteit		
1.1 Warmtedoorgangscoefficiënt	0,209 [W/(m ² K)]	0,531 [W/(m ² K)]
1.2 Temperatuurverloop	Minimale invloed van kepers op isolatie	Significant koudefront, koudebruggen door aluminium
2 Brandveiligheid		
2.1 Temperatuurstijging per materiaal	Glas standaard panelen kritisch	Warmtegeleiding doorheen aluminium constructie kritisch
2.2 Faalmechanismen	Kritisch falen van glas en aluminium profielen van standaard panelen	Kritisch falen van het systeem door aluminium verankeringen wegens hoge warmteoverdracht
2.3 Mogelijkheid tot verlijming	Ja	Nee
3 Structurele integriteit		
3.1 Interne nauwkeurigheid	Noodzaak voor nauwkeurigheid bij montage	Reeds hoge nauwkeurigheid door prefabricage
3.2 Systeem gewicht	+/- 50 [kg]	+/- 93 [kg]
3.3 Bestendigheid tegen onnauwkeurigheden	Mogelijkheid tot werken rond onnauwkeurigheden	Weinig mogelijkheden tot werken rond onnauwkeurigheden

Bij de bouwtechnische eisen blijkt dat Concept I een betere thermische capaciteit heeft met een lagere U-waarde van 0,209 [W/(m²K)] en minder significante koudebruggen dankzij het gebruik van houten kepers. Hierdoor benadert Concept I het theoretisch optimaal voorontwerp met een U-waarde van 0,173 [W/(m²K)] zeer nauwkeurig. Concept II, daarentegen, heeft een hogere U-waarde van 0,531 [W/(m²K)], wat aangeeft dat er meer warmteverlies is door de aluminium constructie, wat koudebruggen veroorzaakt.

Op het gebied van brandveiligheid kunnen de temperatuurstijgingen van Concept I en II indicatief vergeleken worden, waaruit blijkt dat de op maat gemaakte glas/glas panelen meer brandwerend zijn in vergelijking met de dun glazige standaard panelen. Deze conclusie wordt duidelijk als de glascurves van Concept I en II vergeleken worden zoals te zien is op figuur 35. Verder toont deze figuur ook dat het systeem toch hittegeleidend als gevolg van het overmatige gebruik van aluminium, in vergelijking met de keperbevestigingen bij Concept I, aangezien de temperatuur aan het oppervlakte van de snelbouw sneller stijgt bij Concept II in vergelijking met Concept I.

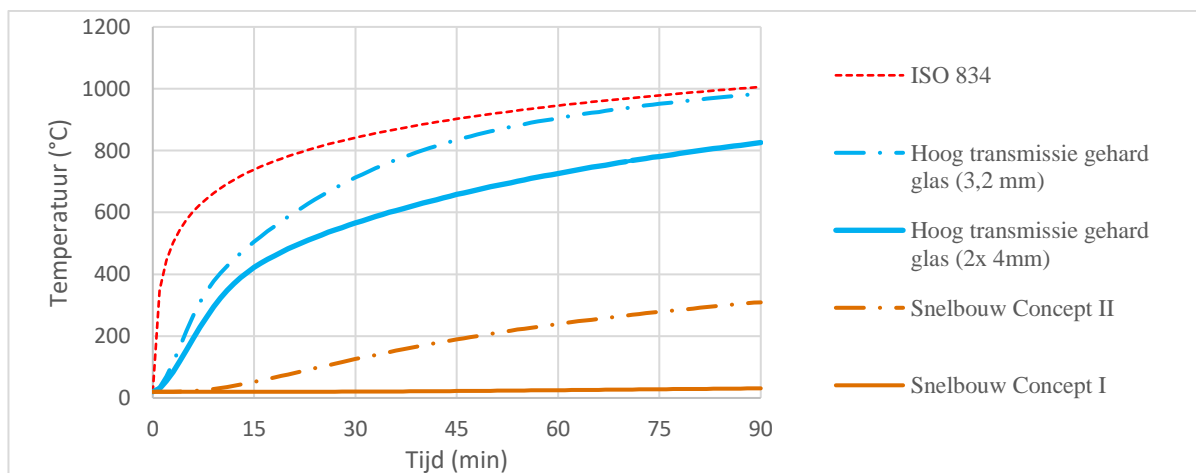


Fig. 35: Vergelijking temperatuurstijgingen Concept I en II

O.b.v. deze gegevens kunnen verschillende faalmechanismes geconcludeerd worden, waarvoor allereerst kan afgeleid worden dat het glas van het standaard fotonvoltaïsch paneel uit Concept I eerder zal falen in geval van brand in vergelijking met het op maat gemaakte paneel uit Concept II. Echter, op structureel vlak zal Concept II eerder falen, aangezien het volledige systeem sneller opwarmt als gevolg van brand, wat resulteert in een snellere bezwijklast voor het aluminium profiel of de verankeringen.

De structurele integriteit van Concept I vereist nauwkeurige montage op de bouwplaats, wat kosten en tijd kan verhogen. Concept II biedt hier een voordeel door de prefabricage van modules, wat leidt tot een grotere nauwkeurigheid en een kortere montagetijd.

Tabel 9: Vergelijking economische eigenschappen Concept I en II

Economische eigenschappen	Concept I: In-Situ Montage	Concept II: Modulaire Benadering
1 Initiële meerkost	Laag (gebruik van standaard panelen)	Hoog (gebruik van op maat gemaakte panelen)
2 Mogelijkheden tot kostenreducties	Beperkt (hoge montagekosten)	Veel (montage-efficiëntie en materiaaloptimalisatie)

Economisch gezien heeft Concept I lagere initiële kosten door het gebruik van standaard panelen, maar beperkte mogelijkheden voor kostenreducties. Concept II heeft hogere initiële kosten door op maat gemaakte panelen, maar biedt meer mogelijkheden voor kostenbesparing door montage-efficiëntie en materiaaloptimalisatie.

Tabel 10: Vergelijking aspecten betreffende implementatie Concept I en II

Aspecten betreffende implementatie	Concept I: In-Situ Montage	Concept II: Modulaire Benadering
1 Modulariteit	Laag, volledige montage in situ	Hoog, prefabricage van modules
2 Gebruiksvriendelijkheid	Complex, vereist nauwkeurige montage	Eenvoudiger, modulaire benadering
3 Mate van project engineering	Hoog, specifiek voor elk project	Laag, door modulariteit
4 Projectspectifieke toepasbaarheid	Hoog, kan aangepast worden aan specifieke projectvereisten	Op maat gemaakte panelen maken projectspectifieke toepasbaarheid enigszins mogelijk
5 Circulariteit	Mogelijkheid tot volledige demontage	Moeizame demontage wegens verlijmingen

Wat betreft de implementatie biedt Concept I aanpasbaarheid voor specifieke projecten, maar vereist een nauwkeurige en complexe montage. Concept II biedt een hogere mate van modulariteit en gebruiksvriendelijkheid door de prefabricage van modules, wat de montagetijd verkort en de kwaliteit verbetert. Tot slot biedt Concept II een hogere esthetische afwerking aangezien er gebruik gemaakt wordt van op maat gemaakte fotonvoltaïsche panelen.

Kortom, beide concepten hebben unieke voor- en nadelen, afhankelijk van de specifieke projectvereisten en doelstellingen. Deze tabel helpt bij het beoordelen van welke benadering het beste aansluit bij de theoretisch optimale waarden en de praktische toepassingen.

9 Concept III: een geïntegreerd eindontwerp

Het geïntegreerde eindontwerp combineert de sterke punten van zowel Concept I als Concept II om een optimaal systeem te creëren dat voldoet aan bouwtechnische eisen, economische efficiëntie, praktische toepasbaarheid, en esthetische voorwaarden. Dit ontwerp maakt gebruik van gestandaardiseerde fotovoltaïsche panelen, wat initiële kostenreducties en flexibiliteit mogelijk maakt.

De structuur van het geïntegreerde eindontwerp omvat houten kepers als structurele verankering in combinatie met een aluminium L-profiel dat tegen de snelbouwwand wordt bevestigd. Deze aanpak van de keper-profiel verankering vangt de onnauwkeurigheden van de snelbouwstenen op en zorgt voor een nauwkeurige en stabiele montage. Verder bestaat het ontwerp uit de 12 cm PIR isolatie tussen OSB-platen ter behoud van de structurele integriteit van het systeem. Het gebruik van de keper en OSB-platen voor de structuur van de module biedt een optimale thermische capaciteit met minimale koudebruggen, dankzij het beperkte gebruik van thermisch geleidende materialen zoals aluminium. Tot slot wordt de thermische capaciteit verder geoptimaliseerd door het gebruik van flexibele isolatie. Deze isolatie vult eventuele luchtruimtes tussen de modules en de snelbouwwand, evenals de ruimten tussen de modules zelf, op.

Echter wordt de voorstructuur, ter verankering van het fotovoltaïsch paneel, wel uit aluminium gecreëerd wegens structurele voorwaarden. Deze maakt verder ook de geventileerde luchtsponw mogelijk maakt, die zoals eerder besproken de thermische verliezen minimaliseert en de energieopbrengst maximaliseert. Tot slot zorgt het momentvrije klik-systeem voor een gebruiksvriendelijke en nauwkeurige montage van de modules en biedt ook een hoogstaande esthetiek door een volledig onzichtbare achterconstructie. Dit ontwerp combineert alle aspecten van voorgaande concepten tot een geoptimaliseerde hybride hout-aluminium module zoals te zien is op figuur 36.

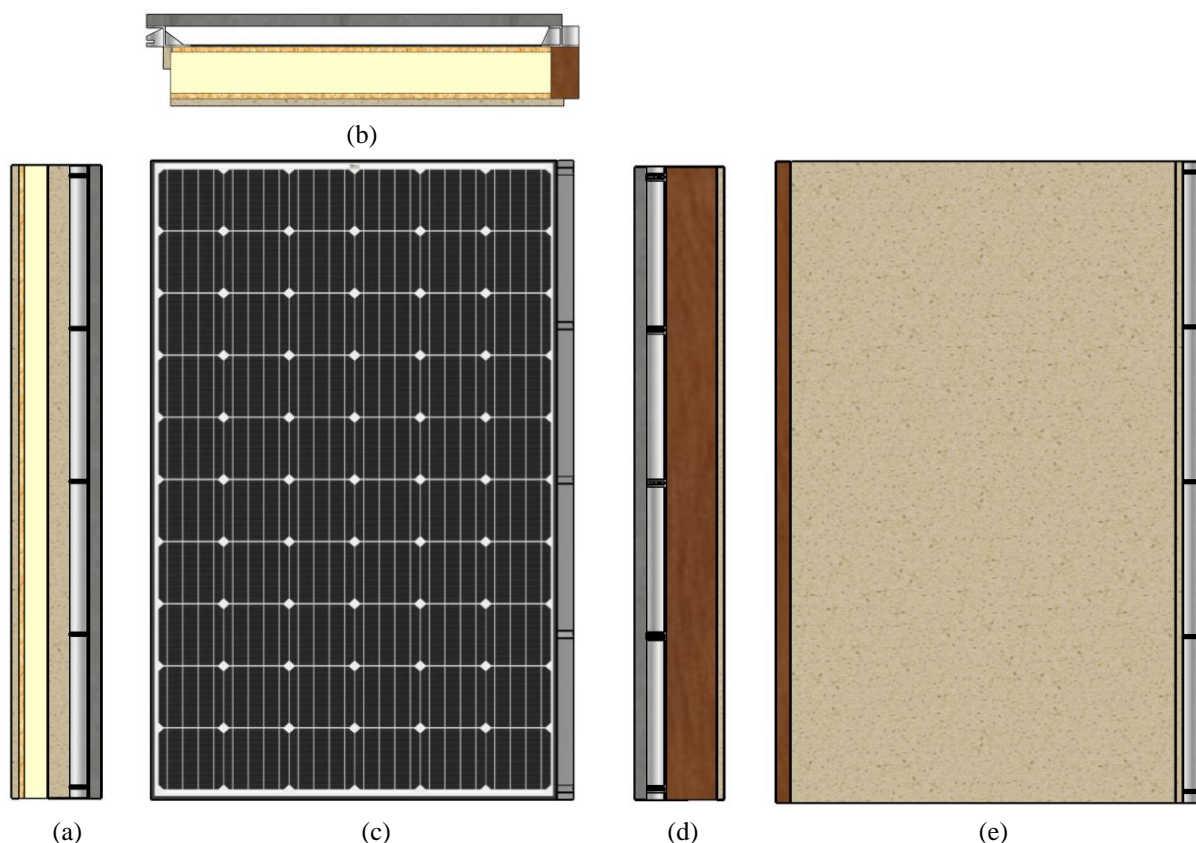


Fig. 36: (a) Linkerzijaanzicht, (b) bovenaanzicht, (c) vooraanzicht, (d) rechterzijaanzicht, (e) achteraanzicht Concept III

De modules zijn dus opgebouwd uit verschillende componenten die in gecontroleerde fabrieksomstandigheden nauwkeurig kunnen gemonteerd worden. Deze componentenstructuur, zoals te zien is op figuur 37, maakt het systeem aanpasbaar aan verschillende projectomgevingen, aangezien enkel de isolatie en OSB-platen van dimensie hoeven te veranderen om een ander fotovoltaïsch paneel passend te maken, zoals duidelijk gemaakt op figuren 38 en 39. Deze flexibiliteit in combinatie met de modulaire opzet alsook het gebruik van

gestandaardiseerde panelen dragen bij aan een kostenefficiënt ontwerp toepasbaar binnen verschillende projectsituaties met mogelijkheden voor verdere kostenreducties.

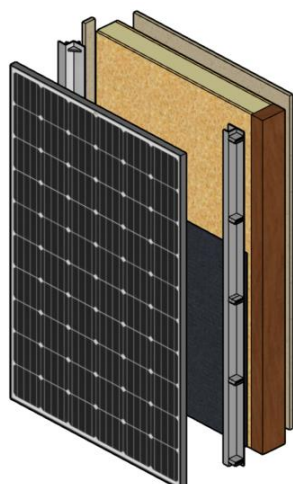


Fig. 37: Componentenstructuur Concept III

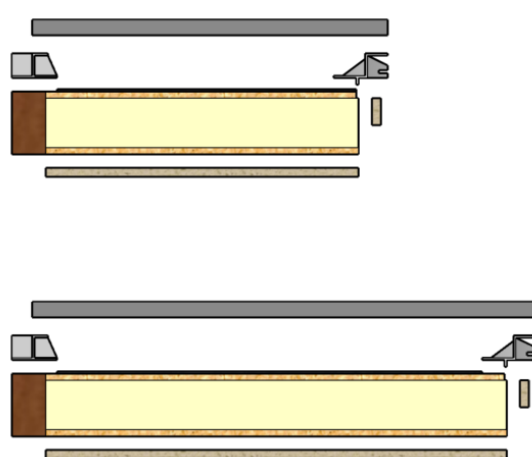


Fig. 38: Bovenaanzicht assemblage verschillende componenten Concept III

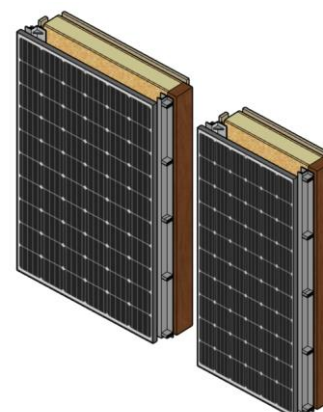


Fig. 39: Aanpassing dimensies Concept III

9.1 Economische eigenschappen

Concept III maakt als geïntegreerd eindontwerp gebruik van gestandaardiseerde fotovoltaïsche panelen, wat een initiële kostenreductie mogelijk maakt in vergelijking met Concept II. Echter liggen de initiële kosten hoger dan Concept I wegens de modulariteit, maar maakt wegens eenzelfde reden ook verschillende andere kostenreducties mogelijk die niet van toepassing zijn voor Concept I. Zoals eerder besproken, zijn deze kostenbesparende voordelen in productie van modulaire systemen cruciaal, vooral nu de vraag meer en meer toeneemt. Bovendien vermindert de prefabricage van de modulaire systemen de montage-duur op de bouwplaats, wat leidt tot lagere installatiekosten. Dit is, zoals eerder besproken, een belangrijk aspect aangezien het aantal beschikbare werknemers steeds meer een onzekerheid vormt. Verder is de plaatsingsmethode gebruiksvriendelijk wat de montage-efficiëntie verder bevordert. Het feit dat de modules in prefabricage gemaakt kunnen worden garandeert ook meer structurele integriteit en nauwkeurigheid wat verdere kosten gedurende de levensduur van het systeem beperkt. Het eindontwerp beschikt ook over zekere flexibiliteit waardoor de schaalbaarheid van het systeem ter passing binnen verschillende projectspecifieke randvoorwaarden mogelijk maakt.

9.2 Bouwtechnische eisen

9.2.1 Thermische capaciteit

De thermische berekeningen voor het eindontwerp volgen eenzelfde methodologie als bij Concept I en II. Na een zekere simplificering van de structuur kan wegens de verticale lineariteit van de modules relatief nauwkeurig gemodelleerd worden zonder gebruik te maken van een equivalent volume aan aluminium. Tot slot worden eenzelfde materiaaleigenschappen gehanteerd bij het modelleren van de bitmap, als besproken in sectie 4: Modelleringsmethodologie, zoals te zien is op figuur 41, met als resultaat een model, zoals te zien is op figuur 40, met eenzelfde geometrische randvoorwaarden als voorgaande concepten.

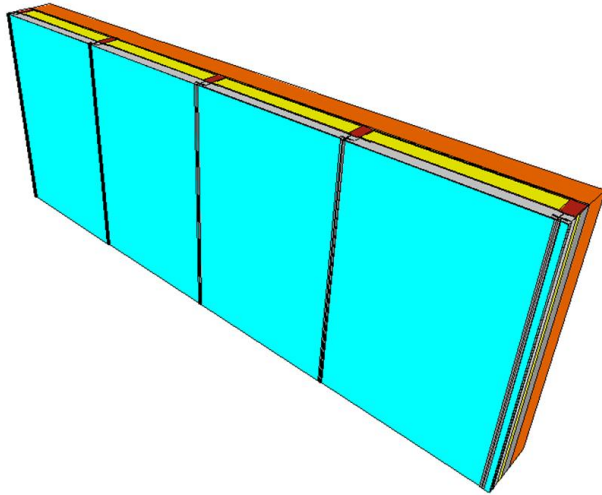


Fig. 40: Perspectiefzicht modellering eindontwerp in TRISCO 3D

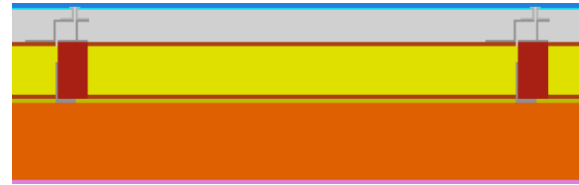


Fig. 41: Bovenaanzicht van 1 module uit bitmap eindontwerp

- Exterieur
- Glas
- Licht geventileerde luchtruimte
- Aluminium achterconstructie, L-profielen
- PIR-isolatie
- OSB-platen, houten keper
- Flexibele isolatie
- Snelbouwsteen
- Interieur

Als resultaat van de modellering wordt de warmtedoorgangscoefficiënt berekend volgens formule 1, waarbij een U-waarde van $0,222 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ is vastgesteld. Deze U-waarde valt binnen de norm en is dus optimaal ondanks de modulaire benadering, die doorgaans voor een slechtere thermische capaciteit zorgt, zoals bij Concept II.

Het ontwerp zorgt dus voor een optimale thermische capaciteit voor een modulaire benadering, met minimale koudebruggen dankzij de houten kepers en flexibele isolatie [48] die de koudebrug tussen de aluminium L-profielen en de achterconstructie doorbreekt, zoals te zien is op figuur 42. Bovendien minimaliseert de implementatie van de geventileerde spouw thermische verliezen.

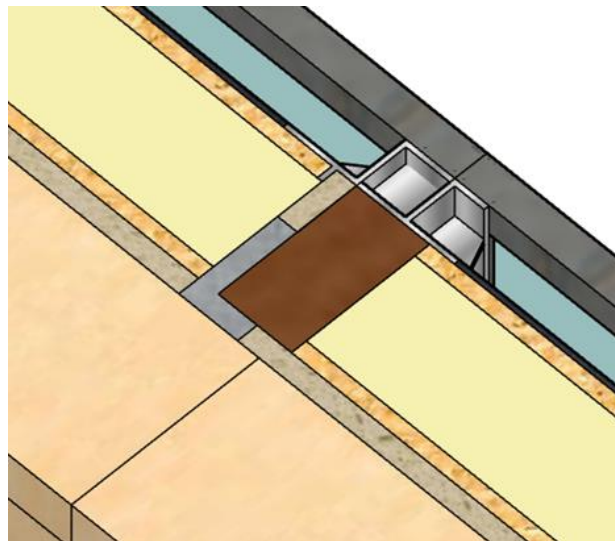


Fig. 42: Detail thermische onderbreking van koudebrug tussen aluminium L-profiel en de achterconstructie

Deze conclusie wordt versterkt door het temperatuursverloop van het model, zoals geplot op figuren 43 en 44. In tegenstelling tot Concept II, waar significante afwijkingen van de isothermische lijnen merkbaar waren bij de bevestigingspunten, toont Concept III een verbeterde thermische capaciteit. Hierdoor zijn de afwijkingen van de isothermische lijnen minder opvallend. Het koudefront ligt verder van de interieurkant af dan bij Concept II, zoals te zien is op figuur 43b, wat dus meer in lijn is met de resultaten van Concept I. De verbeterde thermische capaciteit zorgt ervoor dat het temperatuurverschil voornamelijk door de isolatie wordt opgevangen, resulterend in een acceptabele warmtedoorgangscoefficiënt.

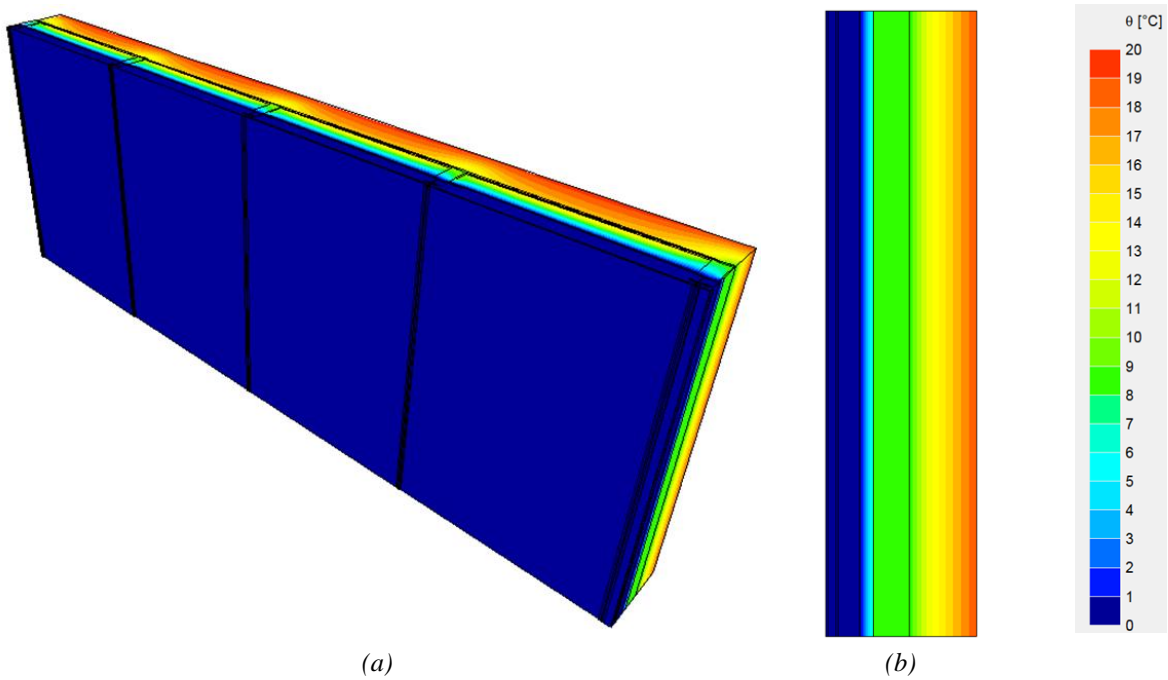


Fig. 43: Temperatuursverloop eindontwerp (a) in perspectiefzicht (b) op kritische doorsede

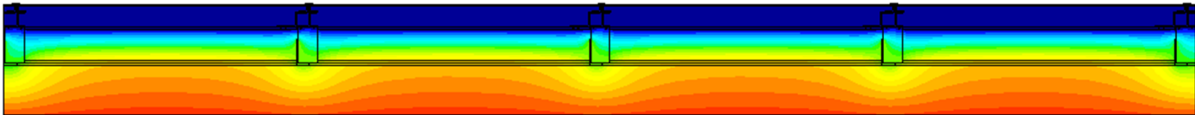


Fig. 44: Temperatuursverloop eindontwerp in bovenaanzicht

9.2.2 Brandveiligheid

De brandveiligheid van het geïntegreerde eindontwerp is vergelijkbaar met de andere concepten. De gemiddelde temperatuurstijging per materiaal wordt gemodelleerd en vergeleken, waarbij het systeem relatief goede brandveiligheid vertoont door het beperkte gebruik van aluminium, wat de hittegeleiding doorheen het systeem minimaliseert. Deze conclusie wordt bevestigd aangezien de temperatuur van de snelbouwsteen aan de exterieurzijde en de gemiddelde temperatuur van het L-verankeringsprofiel nauwelijks stijgen, zoals te zien op figuur 45, op de modelleringsduur van 90 minuten.

Verder kan ook geconcludeerd worden dat het gebruik van de OSB-platen, zoals eerder besproken voor structurele redenen, ook een brandveiligheidsvoordeel biedt aangezien de temperatuur van de isolatie een minder snelle stijging ervaart binnen dit systeem, in vergelijking met Concept I en II. Tot slot gelden eenzelfde conclusies voor het standaard fotovoltaïsch paneel, zoals besproken voor Concept I in vergelijking met Concept II op figuur 35, aangezien de glastemperatuur snel stijgt tot hoge temperaturen.

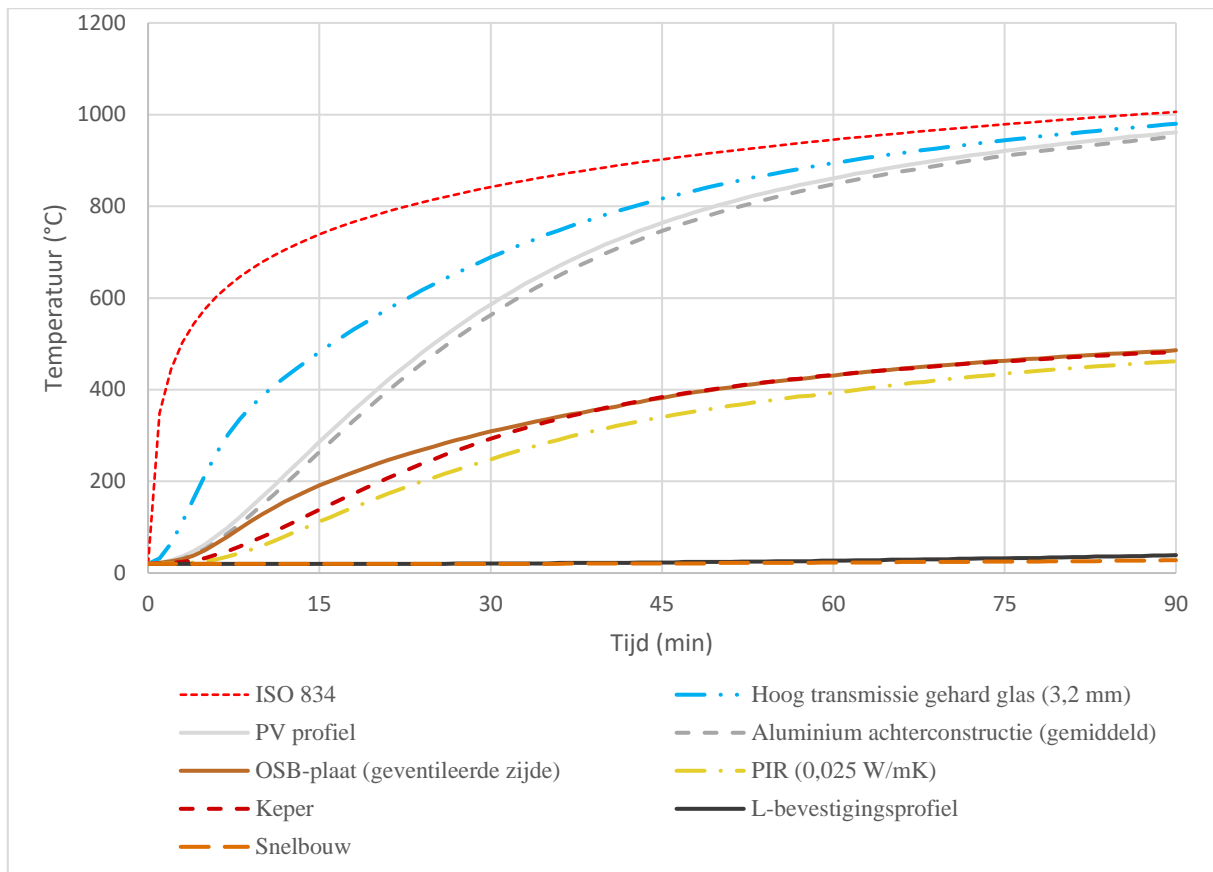


Fig. 45: Temperatuurstijgingen eindontwerp bij brand per materiaal

Ter controle van de bevestigingen van de aluminium achterconstructie enerzijds op de keper/OSB-plaat en anderzijds op het verankeringsprofiel van het standaard fotovoltaïsch paneel wordt de temperatuur geëvalueerd op deze twee bevestigingspunten. Voor deze controle wordt een nieuwe modellering gedaan waarbij op deze bevestigingspunten een nieuw materiaal geplaatst wordt, zoals te zien op figuur 46, dat de eigenschappen hanteert van de hittebestendige verlijming zoals gegeven in tabel 3.

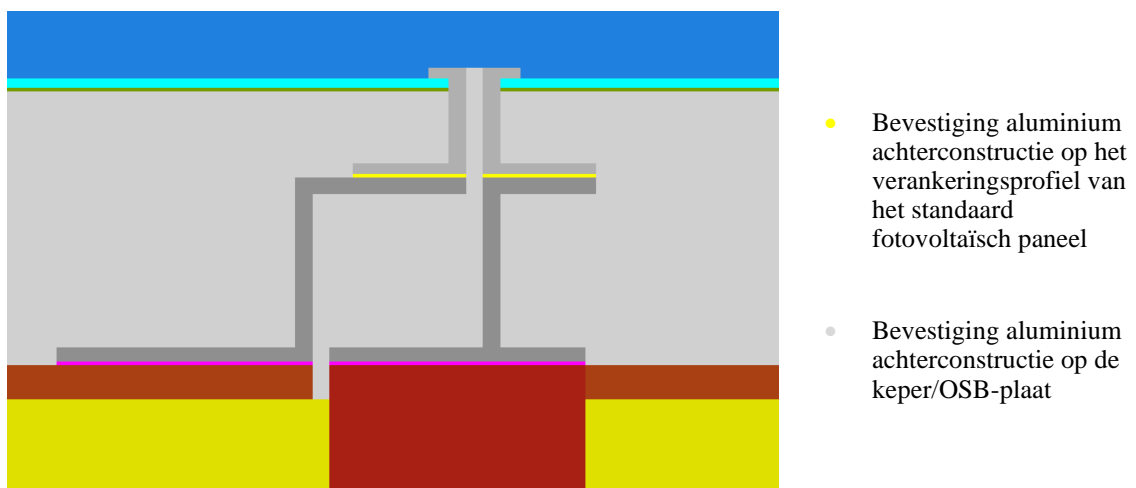


Fig. 46: Bevestigingspunten aluminium achterconstructie eindontwerp

Voor deze bevestigingspunten wordt de gemiddelde temperatuurstijging geplot op figuur 47, waarop eenzelfde waarden van figuur 45 getoond worden. Figuur 47 toont de temperatuurstijgingen per materiaal tot op het punt van structurele bezwijking o.b.v. de bezwijktemperaturen zoals gegeven in tabel X.

Tabel 11: Bezwijktemperaturen per materiaal

Materiaal	Bezwijktemperatuur [°C]
Hoog transmissie, gehard 3,2 mm glas [49]	350
Verankeringsprofiel standaard paneel [51]	450
Hittebestendige silicone verlijming [49]	315
Aluminium constructie [51]	450
OSB-plaat [52]	230
PIR-isolatie [53]	255
Keper [52]	260

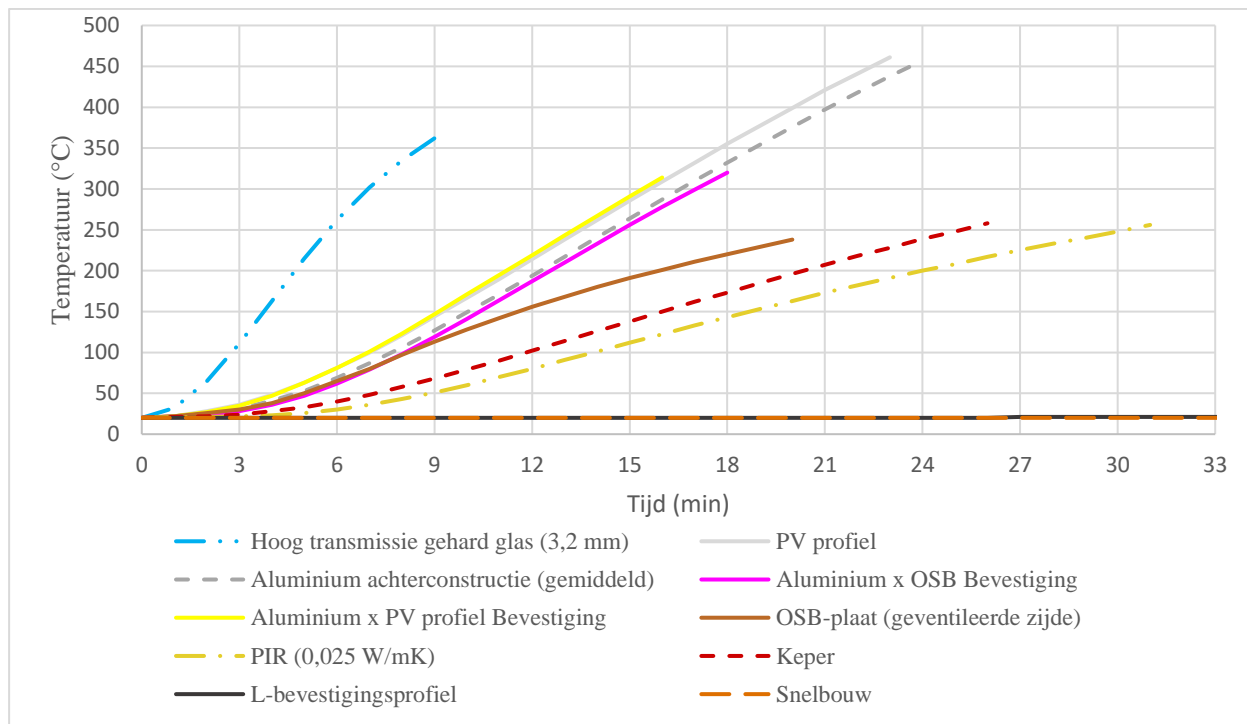


Fig. 47: Bezwijkmechanismen eindontwerp bij brand per materiaal

Zoals te zien is op figuur 47 faalt het glas van het standaard fotovoltaïsch paneel relatief snel, reeds na ongeveer 10 minuten. Hoewel glas snel bezwijkt, vormt dit geen structureel probleem voor de algehele constructie, aangezien het niet functioneert als een dragend element.

Verder faalt de aluminium achterconstructie eerder in het geval van verlijming in vergelijking met de mechanisch verankerde variant, hetgeen wijst op een inferieure brandveiligheid. De mechanische verankering kan benaderd worden o.b.v. de temperatuurstijging van het aluminium verankeringsprofiel en de achterconstructie. De grafiek laat zien dat de verlijmde aluminiumconstructie tussen ongeveer 15 en 18 minuten faalt, terwijl de verankerde aluminiumconstructie minimaal 22 minuten standhoudt voordat deze bezwijkt. Dit verschil onderstreept de voordelen van mechanische verankering voor een verbeterde brandveiligheid, maar toont toch een mogelijkheid voor de hittebestendige verlijming van de profielen. Deze benadrukt verder de cruciale rol van het type verankering in de constructie.

Rond 20 minuten na blootstelling begint de voorste OSB-plaat te branden, zoals geïllustreerd op figuur 47. Hierna, rond 26 minuten, begint ook de keper te branden. Deze punten markeren kritieke momenten waarop de brand snel kan escaleren. De temperatuur van de isolatie zal daarbij ook snel stijgen, en ongeacht de eventuele brandende kepers en OSB-platen, zal deze na 31 minuten bezwijken. Het is echter belangrijk te vermelden dat er geen gebruik gemaakt van brandvertragende folies of andere beschermingslagen bovenop de OSB-platen, met als resultaat dat een worstcasescenario gemodelleerd wordt ter veiligheid. Echter, het toepassen van brandwerende platen zoals brandvertragend gipskarton of speciale brandwerende coatings kan de brandveiligheid aanzienlijk verbeteren door de tijd tot falen van de OSB-platen te verlengen.

Het kan geconcludeerd worden dat het geïntegreerd eindontwerp een relatief robuuste brandveiligheid vertoont door het beperkte gebruik van aluminium. De grafiek toont aan dat glas snel faalt zonder structurele gevolgen alsook dat de verankerde aluminium constructie beter presteert dan de verlijmde variant. Toch wordt de mogelijkheid tot verlijming bewezen met een relatief goede brandbestendigheid. Tot slot onderstreept het relatief vroege falen van de OSB-platen en kepers het belang van aanvullende brandwerende maatregelen in worstcasescenario's, zoals het gebruik van brandvertragende folies.

9.2.3 Structurele integriteit

Het geïntegreerde eindontwerp combineert de sterke punten van zowel Concept I als Concept II om een optimaal structureel integer systeem te creëren. Dit ontwerp neemt de modulariteit van Concept II, wat wegens prefabricage een hogere nauwkeurigheid mogelijk maakt, maar minimaliseert het zware gewicht dat bij Concept II een nadeel was als resultaat van het vervangen van de aluminium achterstructuur door een hybride houten-aluminium constructie.

Daarnaast beschikt het eindontwerp over een verminderde wanddikte, wegens de modulariteit, wat een structureel voordeel als gevolg van een voordeligere krachtswerking. Het modulaire eindontwerp heeft een volgens de methodologie benaderd dragend gewicht van 68,8 kg en biedt dus het beste van beide werelden aangezien de voordelen van een lichtere constructie van Concept I behouden worden terwijl dit gecombineerd wordt met de modulaire en structurele integere montagestructuur, zoals getoond op figuur 48, van Concept II.

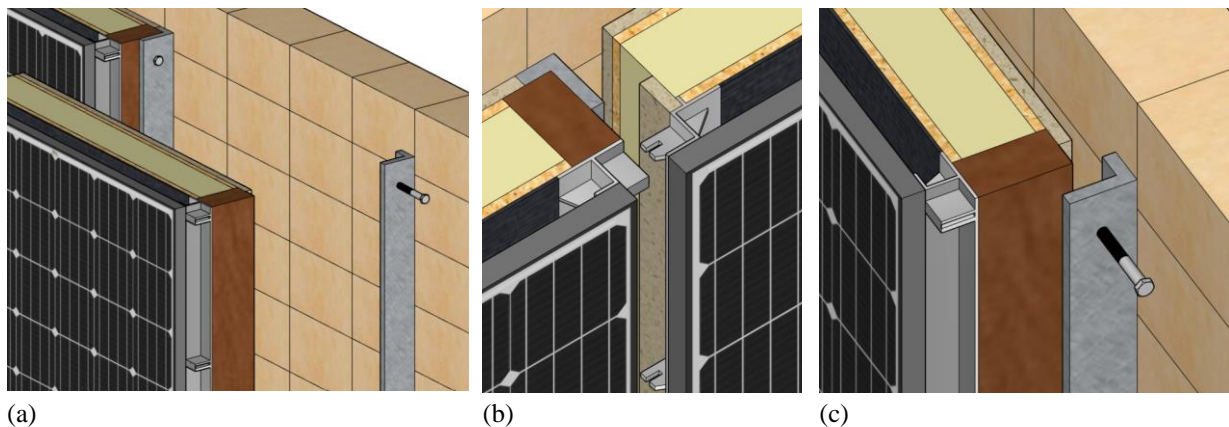


Fig. 48: (a) Plaatsing L-verankeringsprofiel, (b) momentvrije klik-systeem te plaatsen module in reeds verankerde module, (c) verankering te plaatsen module

Bij het analyseren van de structurele integriteit van het eindontwerp, is de verankering van de keper op het reeds verankerde L-profiel een cruciale verbinding. Deze verankering vindt plaats door middel van een boutverbinding zowel bovenaan als onderaan, zoals te zien is op figuur 49. De krachtswerking op deze boutverbindingen wordt weergegeven op figuren 50 en 51, waar de momenten en dwarskrachten aangegeven worden, met de resultaten te zien in Tabel 4.

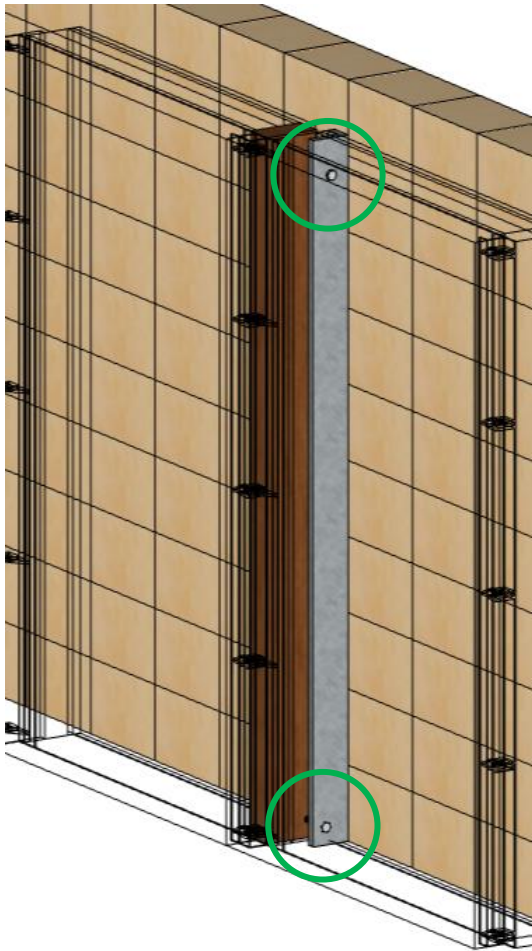


Fig. 49: Keperverankering op L-profiel

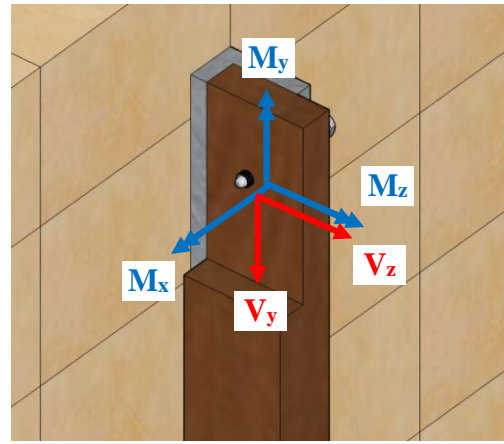


Fig. 50: Krachtswerking bovenaan keperverankering op L-profiel

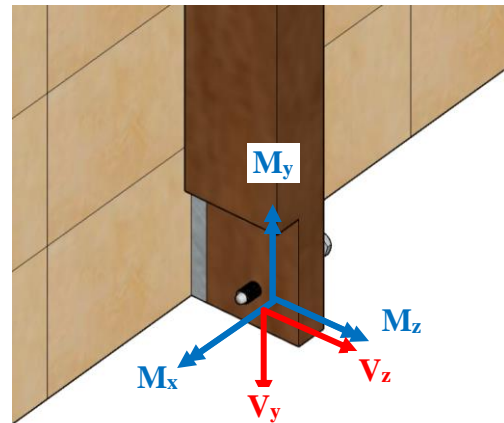


Fig. 51: Krachtswerking onderaan keperverankering op L-profiel

De krachtswerkingen zijn verkregen door elk materiaal een eigen gewichtskracht toe te kennen, die aangrijpt op het zwaartepunt van elk materiaal afzonderlijk. Het eigengewicht wordt op deze manier verdeeld en omgerekend naar de krachtswerkingen zoals weergegeven op figuren 47 en 48. Hiernaast wordt de meest ongunstige windbelasting wordt berekend met behulp van Wind Interactive en komt uit op 1002 N/m² windzuiging in de z-richting, loodrecht op de fotovoltaïsche panelen.

Verder is het belangrijk te vermelden dat de keperverbinding twee keer de helft van het eigengewicht van één module draagt. De andere helften worden overgedragen naar de andere modules via het "klik"-systeem zoals eerder besproken. Dit "klik"-systeem is een momentsvrije verbinding, waardoor de keperverbinding het moment, geïnduceerd door het eigengewicht, draagt van één enkele module. Daarnaast induceert ook de windzuigbelasting een moment dat wel wordt opgenomen door het "klik"-systeem. Dit moment, zijnde het moment in de y-richting, wordt voor de helft gedragen door de verbinding van de keper met het L-profiel van één module. Vanzelfsprekend draagt deze verbinding in totaal twee keer de helft van het moment.

Tabel 12: Aangrijpende krachten en momenten op keperverankering op L-profiel

Bovenste boutverbinding:	Onderste boutverbinding:
Moment in x-richting: $M_x = 0,287$ [kNm]	Moment in x-richting: $M_x = 0,287$ [kNm]
Moment in y-richting: $M_y = 0,284$ [kNm]	Moment in y-richting: $M_y = 0,284$ [kNm]
Moment in z-richting: $M_z = 0,087$ [kNm]	Moment in z-richting: $M_z = 0,087$ [kNm]
Dwarskracht in y-richting: $V_y = 0,34$ [kN]	Dwarskracht in y-richting: $V_y = 0,34$ [kN]
Dwarskracht in z-richting: $V_z = 1,00$ [kN]	Dwarskracht in z-richting: $V_z = 1,00$ [kN]

Op deze manier wordt de structurele integriteit van de verbindingen geanalyseerd en verzekerd, rekening houdend met zowel het eigengewicht als de windbelasting. Deze krachtswerking is van belang bij de praktische dimensionering van de cruciale boutverbinding die de module verankerd in het L-profiel dat op zijn beurt verankerd is in de snelbouwwand.

9.3 Aspecten betreffende implementatie

Het geïntegreerde eindontwerp is allereerst gebruiksvriendelijk in montage wegens de modulaire aard, zoals reeds besproken bij Concept II. Verder biedt het eindontwerp flexibiliteit dankzij de keperverankering op het L-profiel, zoals te zien is op figuur 49, waardoor aanpassingen mogelijk zijn om onnauwkeurigheden in de snelbouwwand te corrigeren. Bovendien maakt de componentenstructuur het systeem aanpasbaar aan verschillende projectomgevingen, omdat alleen de isolatie en OSB-platen van dimensie hoeven te veranderen om een ander gestandaardiseerd paneel passend te maken.

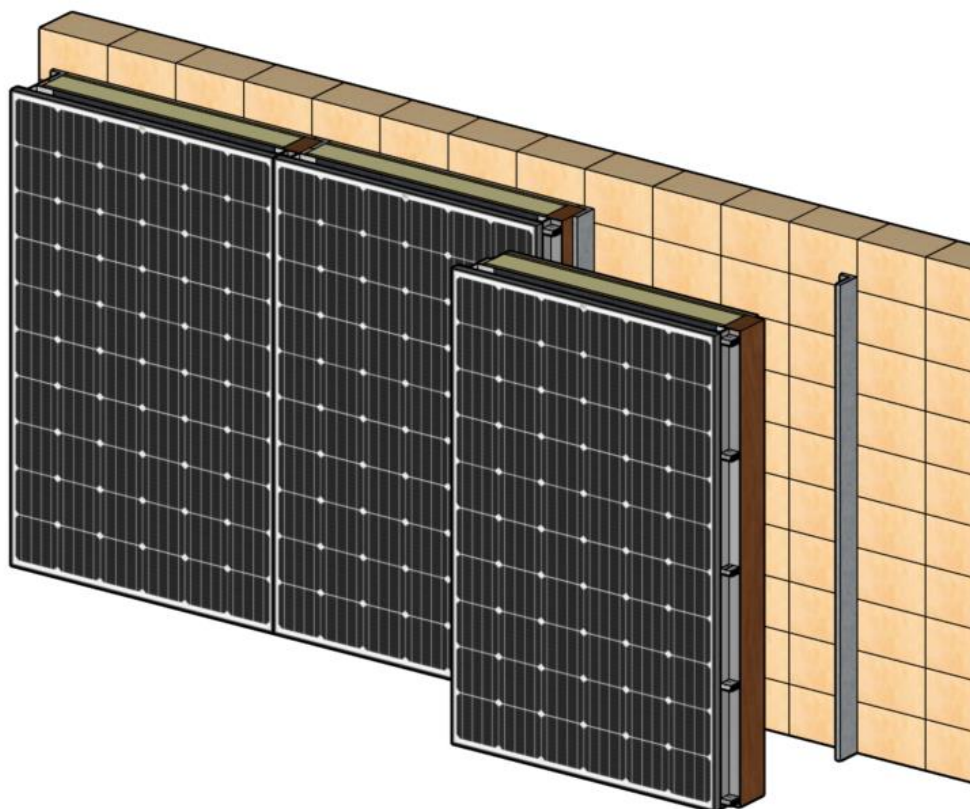


Fig. 52: Implementatie eindontwerp

De combinatie van het modulaire karakter samen met de implementatie van gestandaardiseerde panelen zorgt voor kostenreducties door een gebruiksvriendelijke en snellere montage, structurele nauwkeurigheid, duurzaamheid alsook een lagere initiële kost in vergelijking met de op maat gemaakte panelen die in Concept II worden gebruikt. Daarnaast zorgt het overlappende klik-schroef principe van Concept II voor een volledig onzichtbare achterconstructie, wat resulteert in een robuuste en visueel aantrekkelijke installatie.

9.4 Toepassingsmogelijkheden in andere situaties: hoogbouw

Dit onderzoek beperkt zich tot toepassing binnen particuliere laagbouw, met als gevolg het belangrijk is te vermelden dat de toepassingsmogelijkheden van het eindontwerp beperkt zijn voor hoogbouw. Dit met reden dat de huidige modelleringen voor brandveiligheid gebaseerd zijn op minder kritische situaties, wat de constructie vereenvoudigt en de noodzaak om rekening te houden met de schoorsteenwerking minimaliseert. Zoals besproken wordt een geventileerde luchtspouw voorzien in de modellen wat bouwtechnisch gezien bijdraagt aan de thermische efficiëntie van de constructie, maar vereisen strikte maatregelen om brandverspreiding te voorkomen. Bij laagbouw is dit risico op brandverspreiding door de schoorsteenwerking beperkt vanwege de lagere bouwhoogte. In tegenstelling tot laagbouw zijn de brandveiligheidseisen bij hoogbouw aanzienlijk strenger door de verhoogde risico's van brandoverslag via de gevels en de geventileerde luchtspouw.

Een van de belangrijkste maatregelen in hoogbouw is de installatie van brandwerende schermen. Deze schermen moeten horizontaal ter hoogte van de vloer tussen de eerste en tweede verdieping worden geplaatst. Indien de verticale afstand tussen het maaiveld en dit scherm groter is dan acht meter, dient er om de acht meter een brandwerend scherm toegevoegd te worden. Vervolgens moet er om de twee bouwlagen een horizontaal scherm, of ter hoogte van elke bouwlaag een scherm rondom raamopeningen worden geplaatst, zoals getoond op figuur 53. Het doel van deze schermen is om de brandbare materialen, zoals isolatie, en de doorlopende luchtspouw te onderbreken, waardoor de kans op brandoverslag via de gevel wordt verminderd.

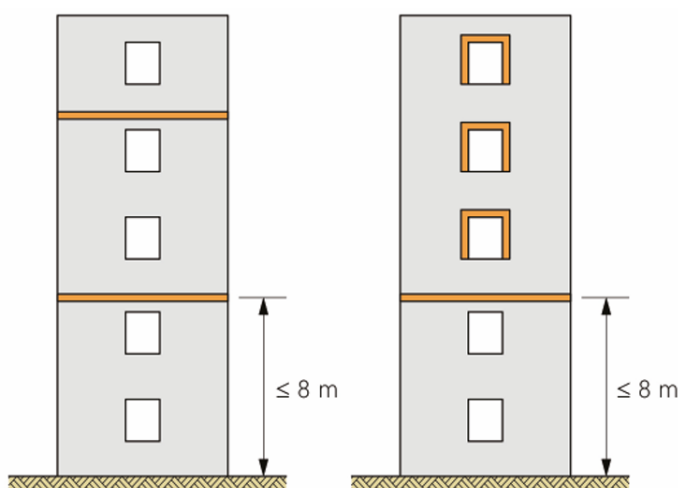


Fig. 53: Plaatsing brandwerende schermen voor gevels van middelhoge gebouwen met een doorlopende luchtspouw [54, p. 26]

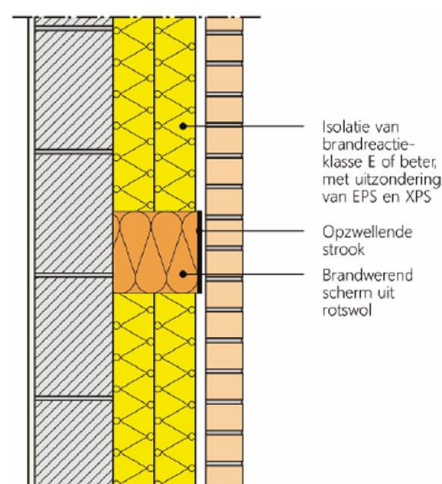


Fig. 54: Brandwerend scherm met opzwelende strook in geval van brand [54, p. 27]

Daarnaast moeten alle wezenlijke gevelonderdelen in hoogbouw onbrandbaar zijn en voldoen aan de brandreactieklasse A2-s3, d0 of beter. Voor de stijlen van de draagstructuur van de gevel geldt de eis van brandreactieklasse A1. Het gebruik van onbrandbare isolatiematerialen en het installeren van innovatieve systemen, zoals de opzwelende strook, als getoond op figuur 54, die bij brand de luchtspouw afsluiten, worden sterk aanbevolen.

De herziene regelgeving eist dat bij hoogbouw zowel de brandreactie-eisen voor de gevelbekleding als voor de wezenlijke gevelonderdelen in acht worden genomen. Dit betekent dat zowel de zichtbare bekleding als de achterliggende constructiematerialen moeten voldoen aan strenge brandveiligheidseisen om de integriteit van de gevel te waarborgen tijdens een brand.

Het verschil in brandveiligheidseisen tussen laagbouw en hoogbouw is significant. Terwijl laagbouwprojecten gebruik kunnen maken van basismaatregelen om brandveiligheid te waarborgen, vereisen hoogbouwprojecten een uitgebreide set aan maatregelen, waaronder de implementatie van brandwerende schermen, het gebruik van onbrandbare materialen en het naleven van strenge regelgeving. Deze maatregelen zijn essentieel om de risico's van brandoverslag en de effecten van het schoorsteeneffect in geventileerde luchtspouwen te beperken, wat cruciaal is voor de veiligheid van hoge gebouwen.

10 Conclusie

Op basis van het uitgevoerde onderzoek naar de implementatie van BIPV-systemen in de gevels van particuliere woningen kan worden geconcludeerd dat dergelijke systemen zowel aan technische eisen als thermische capaciteit, brandveiligheid en structurele integriteit moeten voldoen, evenals economisch efficiënt en praktisch toepasbaar moeten zijn binnen diverse projectomgevingen. Het gebruik van fotovoltaïsche materialen op gevels biedt verschillende voordelen, zoals geoptimaliseerde energieprestaties en esthetisch aantrekkelijkheid, wat bijzonder relevant is voor particuliere woningbouw.

Uit de literatuurstudie blijkt dat een ventilatiespouw van 60 mm achter de fotovoltaïsche modules essentieel is voor optimale thermische capaciteit en energieopwekking. In de conceptuele uitwerkingen van het theoretisch optimale voorontwerp is een zorgvuldige afweging vereist tussen prefab modules en in situ montage. Op maat gemaakte prefab-modules beloven een snellere montage en betere structurele integriteit, maar beperken de ontwerpflexibiliteit. Daarentegen biedt in situ montage meer ontwerprijheid, maar biedt weinig mogelijkheden voor kostenreductie. Een grondige evaluatie van standaard fotovoltaïsche panelen, die aanvankelijk goedkoper zijn, versus op maat gemaakte glas-glas- of samengestelde lichtgewicht panelen, die grotere esthetische, brandveiligheids- en structurele voordelen kunnen bieden, is cruciaal, afhankelijk van de specifieke projectvereisten.

Het geïntegreerde eindontwerp biedt door de modulaire aanpak aanzienlijke reducties in plaatsingstijd, wat leidt tot lagere arbeidskosten en een efficiënter bouwproces. Bovendien draagt deze aanpak bij aan een verminderde wanddikte, wat de structurele integriteit ten goede komt. Kostenreducties worden verder gerealiseerd door het gebruik van standaard fotovoltaïsche panelen en de prefabricage van modules, wat niet alleen de initiële kosten verlaagt, maar ook de flexibiliteit en schaalbaarheid van het systeem vergroot. Het eindontwerp biedt een acceptabele thermische capaciteit, ondanks dat de modulaire structuur de thermische capaciteit beïnvloedt. Brandveiligheidsberekeningen tonen aan welke zwakke punten er nog in het ontwerp zitten, maar ook de verbeterde brandveiligheid door het gebruik van mechanische verankeringen. De mogelijkheid van verlijming wordt onderzocht, waarbij slechts een geringe vermindering van brandveiligheid is vastgesteld in vergelijking met mechanische verankeringen. Deze aspecten maken het geïntegreerde eindontwerp een kosteneffectieve en duurzame oplossing voor de integratie van BIPV-systemen in particuliere woninggevels.

Hoewel modulaire BIPV-systemen hogere initiële kosten met zich meebrengen, kan het geoptimaliseerd eindontwerp deze kosten compenseren door een gebruiksvriendelijke en snelle montage en een verbeterde efficiëntie en duurzaamheid op lange termijn. Het is belangrijk te benadrukken dat huidige modelleringen voor thermische capaciteit, brandveiligheid en structurele integriteit zijn indicatief en vereisen verdere validatie en verfijning voor een praktisch eindontwerp. Gezien de focus op particuliere laagbouw, kunnen de bevindingen niet zonder meer worden geëxtrapoleerd naar andere bouwtypen zoals hoogbouw of industriële gebouwen.

Toekomstig onderzoek moet zich richten op de verdere ontwikkeling en praktische implementatie van de voorgestelde BIPV-concepten, inclusief uitgebreide veldtesten om het eindontwerp te verfijnen en aan te passen aan specifieke bouwprojecten. Door deze stappen te volgen, kunnen de voordelen van BIPV-systemen volledig worden gerealiseerd, wat bijdraagt aan de bredere doelstelling van klimaatneutrale gebouwen en duurzame stedelijke ontwikkeling tegen 2050.

11 Referenties

- [1] X. Luo, O. Oyedele en O. Lukumon, „A data-driven life-cycle optimisation approach for building retrofitting: A comprehensive assessment on economy, energy and environment,” *Journal of Building Engineering*, vol. 43, nr. 102934, pp.1-26, 2021.
- [2] T. Chen, K. Tai, G. Raharjo, C. Heng en S. Leow, „A novel design approach to prefabricated BIPV walls for multi-storey buildings,” *Journal of Building Engineering*, vol. 63, nr. 105469, pp.1-20, 2022.
- [3] C. Vassiliades, S. Kalogirou, A. Michael en A. Savvides, „A roadmap for the integration of active solar systems into buildings,” *Applied Sciences*, vol. 9, nr. 2462, pp.1-16, 2019.
- [4] L. Serrano-Lujána, C. Toledo, J. Colmenar, J. Abad en A. Urbina, „Accurate thermal prediction model for building-integrated photovoltaics systems using guided artificial intelligence algorithms,” *Applied Energy*, vol. 315, nr. 119015, pp.1-11, 2022.
- [5] C. Vassiliades, G. Barone, A. Buonomano, C. Forzano, G. Giuzio en A. Palombo, „Assessment of an innovative plug and play PV/T system integrated in a prefabricated house unit: Active and passive behaviour and life cycle cost analysis,” *Renewable Energy*, vol. 186, pp.845-863, 2022.
- [6] E. Szafranko, „Assessment of the economic efficiency of energy-saving projects, methodology based on simple and compound methods,” *Energy Science & Engineering*, vol. 10, pp.423-438, 2021.
- [7] D. Moor, „Building integrated photovoltaic – details in façade industry,” *Stahlbau*, vol. 85, pp.173-181, 2016.
- [8] N. Martín-Chivelet, J.C. Gutiérrez, M. Alonso-Abella, F. Chenlo, en J. Cuenca, „Building retrofit with photovoltaics: Construction and performance of a BIPV ventilated façadeR,” *Energies*, vol. 11, nr. 1719, pp.1-15, 2018.
- [9] H.M. Maghrabie, K. Elsaid, E.T. Sayed, (...), T. Wilberforce, en A.G. Olabi, „Building-integrated photovoltaic/thermal (BIPVT) systems: Applications and challenges,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 45, nr. 101151, pp.1-15, 2021.
- [10] P. Corti, L. Capannolo, P. Bonomo, P.D. Berardinis, en F. Frontini, „Comparative Analysis of BIPV Solutions to Define Energy and Cost-Effectiveness in a Case Study,” *Energies*, vol. 13, nr. 3827, pp.1-23, 2020.
- [11] R. Pataky, Á. Áts, Zs. Áts-Leskó, en O. Birtalan, „Constructional considerations for the mobile Plus-Energy House,” *Energy and Buildings*, vol. 83, pp.195-208, 2014.
- [12] J.M. Pearce, J. Meldrum, en N. Osborne, „Design of post-consumer modification of standard solar modules to form large-area building-integrated photovoltaic roof slates,” *Designs*, vol. 1, nr. 9, pp.1-16, 2017.
- [13] G. Barone, C. Vassiliades, C. Elia, A. Savvides, en S. Kalogirou, „Design optimization of a solar system integrated double-skin façade for a clustered housing unit,” *Renewable Energy*, vol. 215, nr. 119023, pp.1-12, 2023.
- [14] H. Elarga, A. Zarrella, en M. De Carli, „Dynamic energy evaluation and glazing layers optimization of façade building with innovative integration of PV modules,” *Energy and Buildings*, vol. 111, pp.468-478, 2016.
- [15] T.F. Kristjansdottir, C.S. Good, M.R. Inman, R.D. Schlanbusch, en I. Andresen, „Embodied greenhouse gas emissions from PV systems in Norwegian residential Zero Emission Pilot Buildings,” *Solar Energy*, vol. 133, pp.155-171, 2016.
- [16] K. Ordoumpozanis, T. Theodosiou, D. Bouris, en K. Tsikaloudaki, „Energy and thermal modeling of building façade integrated photovoltaics,” *THERMAL SCIENCE*, vol. 22, nr. 3, pp.921-932, 2018.
- [17] A. Ożadowicz en G. Walczyk, „Energy Performance and Control Strategy for Dynamic Façade with Perovskite PV Panels—Technical Analysis and Case Study,” *Energies*, vol. 16, nr. 3793, pp.1-23, 2023.

- [18] F. Lisco, F. Bukhari, L.O. Jones, J.M. Walls, en C. Ballif, „ETFE and its Role in the Fabrication of Lightweight c-Si Solar Modules,” *IEEE JOURNAL OFPHOTOVOLTAICS*, vol. 13, nr. 3, pp.349-354, 2023.
- [19] R. Arena, S. Aneli, G.M. Tina, en A. Gagliano, “Experimental analysis of the performances of ventilated photovoltaic facades,” in *Proc. 20th International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Vigo, 2022, pp.178-183.
- [20] E. Lucchi en R. Agliata, „HBIM-based workflow for the integration of advanced photovoltaic systems in historical buildings,” *Journal of Cultural Heritage*, vol. 64, pp.301-314, 2023.
- [21] J.M. Gremmelspacher, R. Campamà Pizarro, M. van Jaarsveld, H. Davidsson, en D. Johansson, „Historical building renovation and PV optimisation towards NetZEB in Sweden,” *Solar Energy*, vol. 223, pp.248-260, 2021.
- [22] M.L. Guen, L. Mosca, A.T.D. Perera, (...), N. Mohajeri, en J.-L. Scartezzini, „Improving the energy sustainability of a Swiss village through building renovation and renewable energy integration,” *Energy and Buildings*, vol. 158, pp.906-923, 2017.
- [23] S. Horn, E. Bagda, K. Brandau, en B. Weller, „Influence of building-integrated photovoltaics in façades for the energetic evaluation of buildings. Part 1: Potential of façade integration of photovoltaics,” *Bauphysik*, vol. 40, pp.68-73, 2018.
- [24] A. Cappelletti, L. Ceccherini Nelli, en A. Reatti, „Integration and architectural issues of a photovoltaic/thermal linear solar concentrator,” *Solar Energy*, vol. 169, pp.362-373, 2018.
- [25] A.C. Martins, V. Chapuis, F. Sculati-Meillaud, A. Virtuani, en C. Ballif, „Light and durable: Composite structures for building-integrated photovoltaic modules,” *Progress in Photovoltaics*, vol. 26, pp.718-729, 2018.
- [26] M. Shakouri, H. Ghadamian, S. Hoseinzadeh, en A. Sohani, „Multi-objective 4E analysis for a building integrated photovoltaic thermal double skin Façade system,” *Solar Energy*, vol. 233, pp.408-420, 2022.
- [27] C. Eiban, J. Oman, R. Hecker, en C. Popp, „New z3 façade in stuttgart – load bearing bonded photovoltaics. | [Neue Z3-Fassade in Stuttgart – Lastabtragend geklebte Photovoltaik-Verbundverglasung],” , , pp.63-74, 2016.
- [28] L. Rijvers, C. Rindt, en C. de Keizer, „Numerical analysis of a residential energy system that integrates hybrid solar modules (Pvt) with a heat pump,” *Energies*, vol. 15, nr. 96, pp.1-29, 2021.
- [29] M. Rahiminejad en D. Khovalyg, „Numerical and experimental study of the dynamic thermal resistance of ventilated air-spaces behind passive and active façades,” *Building and Environment*, vol. 225, nr. 109616, pp.1-20, 2022.
- [30] S.H. Abu-Bakar, F. Muhammad-Sukki, D. Freier, (...), A. Abubakar Mas'ud, en N.A. Ban, „Performance analysis of a solar window incorporating a novel rotationally asymmetrical concentrator,” *Energy*, vol. 99, pp.181-192, 2016.
- [31] J.E. Gonçalves, H. Montazeri, T. van Hooff, en D. Saelens, „Performance of building integrated photovoltaic facades: Impact of exterior convective heat transfer,” *Applied Energy*, vol. 287, nr. 116538, pp.1-16, 2021.
- [32] M. Rahiminejad, A. Louis Marie Pâris, H. Ge, en D. Khovalyg, „Performance of lightweight and heavyweight building walls with naturally ventilated passive and active facades,” *Energy and Buildings*, vol. 256, nr. 111751, pp.1-23, 2021.
- [33] M.L. Guen, L. Mosca, A.T.D. Perera, (...), N. Mohajeri, en J.-L. Scartezzini, „Improving the energy sustainability of a Swiss village through building renovation and renewable energy integration,” *Energy and Buildings*, vol. 158, pp.906-923, 2017.

- [34] A.C. Martins, V. Chapuis, A. Virtuani, en C. Ballif, „Robust Glass-Free Lightweight Photovoltaic Modules with Improved Resistance to Mechanical Loads and Impact,” *IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS*, vol. 9, nr. 1, pp.245-251, 2019.
- [35] H. Hamida, T. Konstantinou, A. Prieto, en T. Klein, „Solar Cooling Integrated Façades: Key perceived enabling factors and prospects of future applications,” *Journal of Building Engineering*, vol. 76, nr. 107355, pp.1-25, 2023.
- [36] P. Redweik, C. Catita, en M. Brito, „Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape,” *Solar Energy*, vol. 97, pp.332-341, 2013.
- [37] I.A. Tsanakas, I. Lokhat, A. Jay, (...), A. Armbruster, en J. Bor, „State-of-Play and Emerging Challenges in Photovoltaic Energy Yield Simulations: A Multi-Case Multi-Model Benchmarking Study,” *Solar RRL*, vol. 7, nr. 2200582, pp.1-10, 2022.
- [38] R. Khalifeeh, H. Alrashidi, N. Sellami, T. Mallick, en W. Issa, „State-of-the-art review on the energy performance of semi-transparent building integrated photovoltaic across a range of different climatic and environmental conditions,” *Energies*, vol. 14, nr. 3412, pp.1-19, 2021.
- [39] R.A. Agathokleous en S.A. Kalogirou, „Status, barriers and perspectives of building integrated photovoltaic systems,” *Energy*, vol. 191, nr. 116471, 2020.
- [40] A. Azami en H. Sevinç, „The energy performance of building integrated photovoltaics (BIPV) by determination of optimal building envelope,” *Building and Environment*, vol. 199, nr. 107856, pp.1-14, 2021.
- [41] A. Gok, E. Ozkalay, G. Friesen, en F. Frontini, „The Influence of Operating Temperature on the Performance of BIPV Modules,” *IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS*, vol. 10, nr. 5, pp.1371-1378, 2020.
- [42] V. Dannapfel, T. Osterhage, M. Klein, (...), D. Müller, en M. Kuhnhenne, „The plug-n-harvest façade: A second skin with active and passive components,” *Journal of Facade Design & Engineering*, vol. 7, nr. 1, pp.101-114, 2019.
- [43] A.C. Martins, V. Chapuis, A. Virtuani, (...), L.-E. Perret-Aebi, en C. Ballif, „Thermo-mechanical stability of lightweight glass-free photovoltaic modules based on a composite substrate,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 187, pp.82-90, 2018.
- [44] J.E. Gonçalves, T. van Hooff, en D. Saelens, „Understanding the behaviour of naturally-ventilated BIPV modules: A sensitivity analysis,” *Renewable Energy*, vol. 161, pp.133-148, 2020.
- [45] M.C. López-Escalante, E. Navarrete-Astorga, M. Gabas Perez, J.R. Ramos- Barrado en F. Martín, „Photovoltaic modules designed for architectural integration without negative performance consequences,” *Applied Energy*, vol. 279, nr. 115741, pp.1-12, 2020.
- [46] F. Bernadetta, H. Auer en W. Friedl, „Profitability of active retrofitting of multi-apartment buildings: Building-attached/integrated photovoltaics with special consideration of different heating systems,” *Energy and Buildings*, vol. 190, pp.86-102, 2019.
- [47] Präzisions Glas & Optik GmbH, „BOROFLOAT® 33 High-quality borosilicate glass from SCHOTT,” 21 Mei, 2024. [Online.] Available: <https://www.pgo-online.com/intl/borofloat.html>. [Geopend 7 juni 2024]
- [48] Van Drimmelen, „STEICO Flex.” 2024. [Online.] Available: <https://www.vandrimmelen.nl/product/steico-flex/>. [Geopend 23 mei 2024]
- [49] D. Kopeliovich, „Thermoset Epoxy (EP).” *SubsTech (Substances & Technologies)* 14 December, 2023. [Online.] Available: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=thermoset_epoxy_ep. [Geopend 7 juni 2024]
- [50] Asahi India Glass Ltd., „Types of heat resistant glass.” 24 April, 2023. [Online.] Available: <https://www.aisglass.com/types-of-heat-resistant->

- glass/#:~:text=Tempered%20glass%20usually%20comes%20in,C%20(662%C2%B0F). [Geopend 7 juni 2024]
- [51] MatWeg (Material Property Data), „Overview of materials for 6000 Series Aluminium Alloy.” [Online.] Available: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=26d19f2d20654a489aefc0d9c247cebf&ckck=1>. [Geopend 7 juni 2024]
- [52] FIREPROOFDEPOT, „Wood Flash Point, Ignition Temperature & Combustion Temp.” 7 Maart, 2024. [Online.] Available: <https://fireproofdepot.com/what-temperature-does-wood-ignite/>. [Geopend 7 juni 2024]
- [53] „Temperature resistance / stability.” Polyurethanes. [Online.] Available: <https://highperformanceinsulation.eu/home/insulating-with-pu/pu-a-premium-insulant/temperature-resistance-stability/#:~:text=PUR%20FPIR%20rigid%20insulation%20materials,sealed%20with%20bituminous%20roof%20covering>. [Geopend 7 juni 2024]
- [54] S. Eeckhout en Y. Martin, „Brandveiligheid van gevels: de nieuwe regelgeving toegelicht,” Magazine - Fireforum, vol. 79, pp.20-29, 2021.

12 Appendices

Appendix A: Zoekopdracht ter literatuuridentificatie o.b.v. terminologie

(TITLE-ABS-KEY (BIPV) OR TITLE-ABS-KEY (IPV) OR TITLE-ABS-KEY (BAPV) OR TITLE-ABS-KEY (building AND applied AND photovoltaic) OR TITLE-ABS-KEY (building AND integrated AND photovoltaic) AND TITLE-ABS-KEY (glass AND backsheet) OR TITLE-ABS-KEY (integration AND system) OR TITLE-ABS-KEY (integration AND possibility) OR TITLE-ABS-KEY (integration AND possibilities) OR TITLE-ABS-KEY (facade) OR TITLE-ABS-KEY OR TITLE-ABS-KEY (mounting) OR TITLE-ABS-KEY (standarised AND panels) OR TITLE-ABS-KEY (standarized AND panels) OR TITLE-ABS-KEY (standarised AND modules) OR TITLE-ABS-KEY (standarized AND modules) OR TITLE-ABS-KEY (standarised AND panel) OR TITLE-ABS-KEY (standarized AND panel) OR TITLE-ABS-KEY (standarised AND module) OR TITLE-ABS-KEY (standarized AND module) OR TITLE-ABS-KEY (project AND engineering) OR TITLE-ABS-KEY (cost AND reduction) OR TITLE-ABS-KEY (modular AND home) OR TITLE-ABS-KEY (modular AND house) OR TITLE-ABS-KEY (aesthetic) OR TITLE-ABS-KEY (best AND practice) OR TITLE-ABS-KEY (aesthetic) OR TITLE-ABS-KEY (prefab) OR TITLE-ABS-KEY (prefabrication) OR TITLE-ABS-KEY (module AND house) OR TITLE-ABS-KEY (module AND housing) OR TITLE-ABS-KEY (modular AND housing) OR TITLE-ABS-KEY (manufactured AND housing) OR TITLE-ABS-KEY (mobile AND housing) OR TITLE-ABS-KEY (mobile AND house) OR TITLE-ABS-KEY (mobile AND home) OR TITLE-ABS-KEY (prefabricated AND housing) OR TITLE-ABS-KEY (prefabricated AND house) OR TITLE-ABS-KEY (preconstructed AND housing) OR TITLE-ABS-KEY (preconstructed AND house))

n = 2513

Appendix B: Filters toegepast in zoekopdracht

AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENER") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "MATE"))

n = 2096

AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar"))

n = 1259

AND (LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Italy") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"United Kingdom") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Spain") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Austria") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Belgium") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Bulgaria") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Croatia") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Cyprus") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Czech Republic") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Denmark") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Estonia") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Finland") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"France") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Germany") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Greece") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Hungary") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Ireland") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Latvia") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Lithuania") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Luxembourg") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Netherlands") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Norway") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Poland") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Portugal") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Romania") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Singapore") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Slovakia") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Slovenia") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Sweden") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Switzerland") OR LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY,"Turkey"))

n = 599