

Bachelor Eindopdracht

Op weg naar Bijna Energie Neutrale Gebouwen

Casestudie naar drie onderwijsgebouwen



VALSTAR SIMONIS

ADVISEURS INSTALLATIETECHNIEK

Sander Smit (s1567187)
Begeleider UT: T.J.H. Rovers
Opdrachtgever: Valstar Simonis

Civiele Techniek
Universiteit Twente
05 juli 2017

Op weg naar Bijna Energie Neutrale Gebouwen

Casestudie naar drie onderwijsgebouwen

Bachelor of Science in Civiele Techniek

S. Smit

Juli 2016

Op weg naar Bijna Energie Neutrale Gebouwen

Casestudie naar drie onderwijsgebouwen

Bachelor eindopdracht

Bachelor of Science in Civiele Techniek

Civiele Techniek

Universiteit Twente

Auteur: Sander Smit
Email: s.smit@student.utwente.nl

Begeleiders:

Ir. T.J.H. (Twan) Rovers
Department of Construction, Management and Engineering
Universiteit Twente

Ir. G.F.A. (Gino) Lambert
Specialist energie en duurzaamheid
Valstar Simonis

Voorwoord

Dit verslag is geschreven ter afronding van mijn opleiding Civiele Techniek aan de Universiteit Twente. In dit verslag wordt het onderzoek naar Bijna Energie Neutrale Gebouwen (BENG) beschreven. Er is onderzoek gedaan naar maatregelen om te voldoen aan de nieuwe BENG-eisen door middel van een casestudie naar onderwijsgebouwen. Mijn bachelor eindopdracht heb ik uitgevoerd bij Valstar Simonis te Apeldoorn. Valstar Simonis is een Nederlands advies- en ingenieursbureau op het gebied van duurzaamheid, comfort en veiligheid in gebouwen.

Ik wil graag mijn beide begeleiders ir. G.F.A. Lambert en ir. T.J.H. Rovers bedanken voor hun feedback gedurende mijn onderzoek. Daarnaast wil ik mijn overige collega's bedanken voor de hulp en uitleg die ik heb mogen ontvangen tijdens het uitvoeren van mijn onderzoek.

Enschede, Juli 2017

Sander Smit

Samenvatting

Trefwoorden: Bijna Energie Neutrale Gebouwen (BENG); Energiebehoefte; Primair Energiegebruik; Aandeel duurzame energie

Klimaatverandering is een grote bedreiging voor de planeet. De uitstoot van broeikasgassen is één van de belangrijkste oorzaken van klimaatverandering. In 2010 waren gebouwen verantwoordelijk voor 32% van het wereldwijde energiegebruik en 19% van de energie-gerelateerde broeikasgassenuitstoot. Een maatregel om de uitstoot van broeikasgassen door gebouwen te reduceren is het bevorderen van energiebesparende maatregelen en duurzame opwekking van energie. De EU heeft besloten dat alle nieuwe gebouwen vanaf 2021 bijna energieneutraal moeten zijn. De lidstaten mogen zelf invullen hoe ze de BENG-wetgeving invullen. In Nederland wordt vanaf 1 januari 2021 de EPC-eis voor alle nieuwe gebouwen vervangen door drie nieuwe energieprestatie eisen:

- Een maximale energiebehoefte-eis
- een maximale primair energiegebruik-eis
- een minimaal aandeel aan duurzame energie-eis.

Dit onderzoek is een casestudie en er is gekeken naar drie onderwijsgebouwen: het Montessori College, Het Bildt en het Koningsberger gebouw. Allereerst is BENG-wetgeving geanalyseerd en gekeken waar zich energiebesparingsmogelijkheden bevinden. Voor onderwijsgebouwen zijn verwarming en verlichting de grootste posten voor de energiebehoefte. Verlichting, verwarming en ventilatie zijn de grootste posten voor het primair energiegebruik.

Vervolgens is er een literatuur- en marktonderzoek uitgevoerd om maatregelen te vinden die de BENG indicatoren positief beïnvloeden. De invloed van deze maatregelen is daarna individueel bepaald en tenslotte zijn de maatregelen gecombineerd in pakketten. Door verschillende pakketten toe te voegen aan het ontwerp van een gebouw, wordt getracht de BENG-eisen te halen.

Goede maatregelen om de energiebehoefte te beperken zijn efficiënte warmteterugwinning (90%), hoge luchtdichtheid van het gebouw ($0,15 \text{ dm}^3/\text{s.m}^2$), gebalanceerde ventilatie met CO_2 -sturing met twee of meer zones, een goed geïsoleerde thermische schil ($R_c = 10 \text{ m}^2\text{K/W}$ en U waarde = $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$) en efficiënte verlichting. Lage warmtebehoefte, efficiënte verlichting, betonkernactivering met LTV en HTK en een warmtepomp als warmte-opwekker zijn maatregelen die het primair fossiel energiegebruik kunnen verlagen. PV-panelen op het dakoppervlak, PV panelen op de het geveloppervlak en een warmtepomp met een hoge COP-waarde ($\text{COP}=5,0$) kunnen de hoeveelheid bruto hernieuwbare energie sterk verhogen. PV-panelen spelen een cruciale rol in de methode om aan de BENG-wetgeving te doen. In de cases was het niet mogelijk om te voldoen aan de BENG-eisen voor het primair energiegebruik en het aandeel duurzame energie zonder gebruik te maken van PV-panelen. Tenslotte is het ook mogelijk om de hoeveelheid bruto hernieuwbare energie te verhogen door gebiedsmaatregelen toe te passen. Gebouwen met andere afmetingen, vormen of oriëntatie reageren verschillend op maatregelen.

Inhoudsopgave

Voorwoord	iii
Samenvatting.....	iv
Hoofdstuk 1: Inleiding	1
1.1 Achtergrond.....	1
1.2 Aanleiding.....	2
1.3 Probleemstelling.....	3
1.4 Doelstelling.....	3
1.5 Onderzoeksvragen en methoden	3
1.6 Leeswijzer	5
Hoofdstuk 2: Energieprestatie van onderwijsgebouwen	6
2.1 Energieprestatie in gebouwen	6
2.2 Bijna Energie Neutrale Gebouwen	7
2.3 Energieprestatie karakteristieken van onderwijsgebouwen.....	10
2.4 Conclusie	11
Hoofdstuk 3: Beschikbare maatregelen	12
3.1 Introductie.....	12
3.2 Maatregelen om de energiebehoefte van een onderwijsgebouw te beperken	12
3.3 Maatregelen om het primaire energiegebruik van een onderwijsgebouw te beperken.....	17
3.4 Maatregelen om het aandeel duurzame energie te verhogen	20
3.5 Conclusie	21
Hoofdstuk 4: Invloed van de maatregelen	23
4.1 Introductie.....	23
4.2 Eisen en wensen aan onderwijsgebouwen	23
4.3 Invloed van individuele maatregelen	24
4.4 Invloed van combinaties van maatregelen	27
4.5 Conclusie	33
Hoofdstuk 5: Discussie, conclusies en aanbevelingen	34
5.1 Discussie	34
5.2 Conclusies.....	35
5.3 Aanbevelingen.....	36
Bronnen	38
Bijlagen	41

Hoofdstuk 1: Inleiding

In deze introductie wordt eerst de achtergrond van dit onderzoek geschetst. In de achtergrond wordt het brede probleem van klimaatverandering in beeld gebracht. Daarna wordt het internationale, Europese en Nederlandse beleid ten opzichte van klimaatverandering vermeld. Vervolgens wordt er gekeken naar de invloed van dit beleid op de gebouwde omgeving. Deze achtergrond is nodig, om de aanleiding van dit onderzoek in een bredere context te kunnen zien. Vervolgens zal de probleemstelling worden vermeld en tenslotte zullen de doelstelling en de methode worden gedefinieerd.

1.1 Achtergrond

Het klimaatbeleid van Nederland is gebaseerd op de rapporten van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Het IPCC is de internationale organisatie voor de beoordeling van klimaatverandering. De organisatie is in het leven geroepen door de Verenigde Naties om een duidelijke wetenschappelijke kijk op de huidige staat van de klimaatverandering te geven en de gevolgen hiervan te bepalen (IPCC, 2014). Volgens het IPCC is wereldwijd, sinds 1750, de concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer gestegen door menselijk toedoen. Broeikasgassen versterken het broeikaseffect. Om het probleem van klimaatverandering aan te pakken is er een internationaal, Europees en Nederlands beleid opgesteld.

Internationaal beleid

Door middel van het verhogen van het gebruik van duurzame opwekkers en het beperken van de energieconsumptie probeert de Nederlandse overheid te voldoen aan het Klimaatakkoord van Parijs van de Verenigde Naties. De klimaatconferentie van 2015 in Parijs verplicht alle lidstaten van de VN om hun steentje bij te dragen door middel van een verplicht aandeel in de reductie van broeikasgassen (European Union, 2010). Het Parijs akkoord belooft dat de gemiddelde temperatuur op de lange termijn niet meer dan 2 °C zal stijgen t.o.v. 1990. Rond 2050 moet er een evenwicht zijn tussen de uitstoot van broeikasgassen en de opname van CO₂ door de natuur (European Union, 2010).

EU beleid

De Europese Unie heeft ook een beleid opgesteld met betrekking tot klimaatverandering. Het doel van de EU is om de totale uitstoot van broeikasgassen met 20% te verlagen t.o.v. 1990. Naast de afname van de uitstoot van broeikasgassen, heeft het reduceren van het energiegebruik en het bevorderen van het gebruik van duurzame energie ook voordelen voor de energieleveringszekerheid, promotie van innovatieve ontwikkelingen, creatie van banen en mogelijkheden voor regionale ontwikkelingen (European Union, 2010). Om deze doelstellingen te halen worden afspraken gemaakt met de lidstaten. Zo moeten vanaf 2021 alle nieuwe gebouwen in de EU bijna energieneutraal zijn. De lidstaten mogen zelf bepalen, welke definitie ze hiervoor gebruiken (RVO, 2015b).

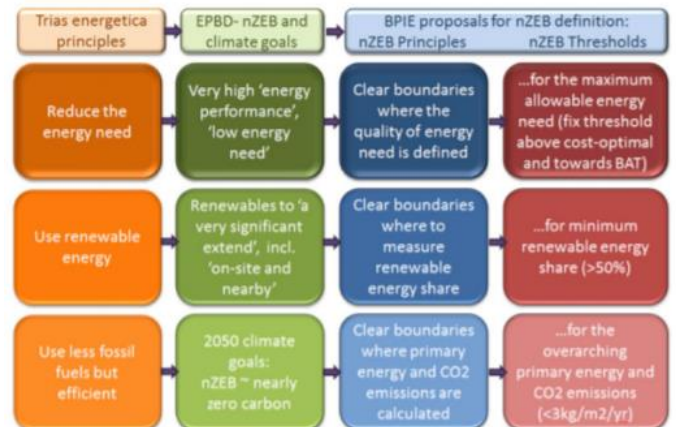
Nederland beleid

Het beleid van Nederland sluit zich aan bij de uitgangspunten van de EU om de uitstoot van broeikasgassen in 2020 met 20% te verlagen ten opzichte van 1990 (RVO, 2015). Per energiesector worden maatregelen genomen om klimaatverandering te voorkomen. Zo ook in de gebouwde omgeving. Een voorbeeld van een afspraak die geldt voor de gebouwde omgeving is dat alle nieuwe gebouwen vanaf 2021 bijna energieneutraal zijn (RVO, 2015b).

Het energiegebruik van de gebouwde omgeving in de EU is sinds 1990 gemiddeld gestegen met 1% per jaar (Allouhi, et al., 2015). In 2010 waren gebouwen verantwoordelijk voor 32% van het wereldwijde energiegebruik en 19% van de energie-gerelateerde broeikasgassenuitstoot (IPCC, 2014). Het grootste gedeelte van de broeikasgassenuitstoot door gebouwen komt op rekening van de indirecte CO₂-uitstoot voor het elektrisch energiegebruik in gebouwen. In het onderzoek is een stijgende lijn te zien in de indirecte uitstoot van broeikasgassen, terwijl de uitstoot van directe broeikasgassen is gestagneerd (IPCC, 2014).

Nearly Zero Energy Buildings is een internationaal begrip, waar op dit moment nog meerdere definities voor zijn (Sartori, Napolitano, & Voss, 2015). Naast de definitie van een Bijna Energie Neutraal Gebouw (BENG), is de bepalingmethode ook een punt van aandacht. Er is ook nog geen methode beschikbaar welke voorschrijft, hoe bepaald moet worden of een gebouw bijna energieneutraal is (Marszal, et al., 2010). Volgens de Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) heeft een BENG een erg goede energieprestatie met een laag energiegebruik, waarvan een significant deel voor rekening komt van energie uit duurzame opwekkers, inclusief duurzame opwekkers ter plekke of uit de omgeving (EPBD, 2013). Deze definitie geeft geen minimum of een maximum aan de energieprestatie. De lidstaten van de EU moeten daarom zelf bepalen wat verstaan wordt met “een erg goede energieprestatie” en “significant deel voor rekening uit duurzame opwekkers”.

De BENG-wetgeving sluit goed aan bij het principe van de Trias Energetica. De Trias Energetica bestaat uit drie onderdelen: de energiebehoefte reduceren, duurzame energie gebruiken en fossiele brandstoffen zo efficiënt mogelijk gebruiken (Zeiler, Gvozdenović, Bont, & Maassen, 2016). In Figuur 1 staat de koppeling tussen de beleidsplannen met betrekking tot de BENG van de EU en de Trias Energetica.



Figuur 1: Koppeling Trias Energetica en BENG (Zeiler, Gvozdenović, Bont, & Maassen, 2016)

1.2 Aanleiding

De energieprestatie coëfficiënt (EPC) is sinds 1995 de maatgevende indicator voor de energieprestatie van een gebouw (RVO, 2017). Wie een bouwvergunning aanvraagt, moet door middel van een EPC berekening laten zien aan de EPC-eis te voldoen. De gemeente controleert de berekening en ziet op de bouwplaats toe dat de bouw volgens de afspraken wordt uitgevoerd (SenterNovem, 2008). Hoe lager de waarde van de EPC, hoe beter de energieprestatie van een gebouw is. De EPC is gebaseerd op het primaire energiegebruik van een gebouw en enkele correctie factoren, gedeeld door een referentiewaarde. Om de energieprestatie van gebouwen constant te verbeteren, werd de maximum EPC stapsgewijs verlaagd. Zie Tabel 1.

Vanaf 1 januari 2021 (voor overheidsgebouwen geldt vanaf 1 januari 2019) is de EPC niet meer maatgevend, maar moeten alle nieuwe gebouwen in Nederland voldoen aan de BENG-wetgeving (RVO, 2015c). In Nederland moeten BENG voldoen aan drie eisen: maximum eis aan de energiebehoefte, maximum eis aan het primaire energiegebruik en een minimum eis aan het aandeel duurzame energie (RVO, 2015c). De bepaling van deze indicatoren wordt verder uitgelegd in Sectie 2.2. De eisen zijn afhankelijk van de functie van het gebouw. In dit onderzoek wordt gekeken naar drie onderwijsgebouwen. In Tabel 1 staat een tijdlijn van energieprestatie eisen van 1995 tot het heden.

Tabel 1 Maatgevende eisen energieprestatie onderwijsgebouwen vanaf 1995 (RVO, 2015c ; Ministerie van Binnenlandse Zaken, 2012)

Jaar van oprichting	Maatgevende eis
1995	Maximum EPC van 1.5
2003	Maximum EPC van 1.4
2009	Maximum EPC van 1.3
2015	Maximum EPC van 0.7
2021	Maximum energiebehoefte van 50 kWh/m ² gebruiksoppervlak per jaar Maximum primair energiegebruik 60 kWh/m ² gebruiksoppervlak per jaar Maximum aandeel van duurzame energie van 50 %

De wetgeving is nog niet definitief. In 2018 wordt getoetst of de eisen op een kostenoptimaal niveau liggen. Gestapelde bouw hoger dan vijf verdiepingen, studio's en winkels krijgen hierbij speciale aandacht (RVO, 2015c).

1.3 Probleemstelling

Alle gebouwen moeten dus vanaf 1 januari 2021 bijna energieneutraal zijn. Deze aanscherping van de energieprestatie-eis heeft gevolgen voor het ontwerpproces van gebouwen. Al in een vroeg stadium zal rekening moeten worden gehouden met de BENG-wetgeving.

De opdrachtgever van dit onderzoek is Valstar Simonis, een Nederlands advies- en ingenieursbureau op het gebied van duurzaamheid, comfort en veiligheid in gebouwen. Dit bureau kijkt met name naar de installaties binnen een gebouw. Valstar Simonis maakt op maat gemaakte ontwerpen voor installaties binnen gebouwen en werkt samen met andere partijen om een compleet ontwerp te realiseren voor een gebouw. Valstar Simonis heeft een onderzoek laten uitvoeren om te kijken of hun ontwerpen van de laatste jaren al voldoen aan de BENG-wetgeving. Resultaat van dit onderzoek was dat nog geen ontwerp voldeed aan de BENG-wetgeving. Voor Valstar Simonis is het dus van belang om te onderzoeken welke aanpassingen gedaan kunnen worden om in de toekomst wel te voldoen aan de BENG-wetgeving. Dit onderzoek is niet alleen voor Valstar Simonis van belang, maar ook voor alle andere partijen die betrokken zijn bij het ontwerpproces van een gebouw.

1.4 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is om verschillende manieren te vinden om te voldoen aan de bijna energie neutrale gebouwen- wetgeving.

Dit onderzoek richt zich op drie cases, dus er kunnen geen algemene aannames worden gemaakt voor alle gebouwen. Het kan echter wel een beter beeld geven van welke maatregelen genomen kunnen worden om te voldoen aan de BENG-wetgeving in de toekomst. Per maatregel zal gekeken worden naar de invloed op de energiebehoefte, het primaire energiegebruik en het aandeel duurzame energie. Het behalen van de BENG-eisen is slechts één van de aspecten die wordt meegenomen in de keuze van een maatregel. In dit onderzoek wordt alleen gekeken naar de invloed van de maatregel op de BENG-indicatoren, andere aspecten zoals kosten worden buiten beschouwing gelaten.

Zoals vermeld is in Sectie 1.3, heeft Valstar Simonis momenteel nog geen gebouwen ontworpen die voldoen aan de toekomstige BENG-wetgeving. Dit onderzoek kan gebruikt worden als handvat voor het ontwerpproces in de toekomst. De keuzes in het ontwerpproces worden gebaseerd op verschillende waarden, bijvoorbeeld kosten en esthetiek. In dit onderzoek wordt alleen gekeken naar de invloed van de maatregelen op de drie BENG-indicatoren. De andere eigenschappen van de maatregelen worden buiten beschouwing gelaten.

1.5 Onderzoeksvragen en methoden

In dit onderzoek wordt getracht om de volgende hoofdvraag zo goed mogelijk te beantwoorden:

Wat zijn de mogelijke manieren om aan de BENG-eisen te voldoen in onderwijsgebouwen?

Om de hoofdvraag te beantwoorden, is deze opgedeeld in drie deelvragen. Na elke deelvraag wordt vermeld hoe de deelvraag bijdraagt aan het beantwoorden van de hoofdvraag. Deze deelvraag wordt vervolgens ook weer opgedeeld en per vraag wordt vermeld welke methode wordt gehanteerd om de vraag te beantwoorden.

Deelvraag 1: Wat beïnvloedt de energieprestatie van een onderwijsgebouw?

De BENG-wetgeving is één manier om de energieprestatie van een gebouw uit te drukken. Eerst zal onderzocht hoe de BENG-wetgeving aansluit bij het begrip energieprestatie. De BENG-wetgeving zal

vervolgens geanalyseerd worden, waarbij wordt gekeken hoe de BENG-indicatoren worden opgesteld. Ten slotte zal de energieprestatie van onderwijsgebouwen worden onderzocht. Er wordt in kaart gebracht waar zich een energiebesparingspotentieel bevindt.

1.a Wat is de definitie van energieprestatie?

Voor deelvraag 1a wordt een literatuuronderzoek uitgevoerd. Er wordt gekeken naar de internationale, Europese en Nederlandse definities van energieprestatie. Voor het literatuuronderzoek worden overheidsdocumenten en wetenschappelijke literatuur bestudeerd. De overheidsdocumenten kunnen veelal gevonden worden op de website van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO). Voor de wetenschappelijke artikelen zal gekeken worden op de websites: www.sciencedirect.com en www.scopus.com

1.b Wat is de definitie van de BENG-indicatoren en hoe worden ze bepaald?

Voor deelvraag 1b zal de handreiking voor het bepalen van de BENG-indicatoren worden bekeken. Daarnaast zal ook de NEN 7120 norm worden gebruikt. Specifieke details kunnen ook in andere NEN normen worden gevonden, bijvoorbeeld in NEN 8088. In deze NEN-normen staan de bepalingsmethodes van verschillende parameters gedefinieerd.

1c. Wat karakteriseert de energieprestatie van een onderwijsgebouw?

Voor deelvraag 1c zal ook een literatuuronderzoek worden uitgevoerd. Zo worden de website van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland en de websites voor wetenschappelijke artikelen gebruikt.

Deelvraag 2: Welke maatregelen zijn / komen beschikbaar om de BENG-indicatoren positief te beïnvloeden?

Nu duidelijk is wat energieprestatie is en hoe de BENG-indicatoren bepaald worden, kan er gezocht worden naar maatregelen die de BENG-indicatoren positief beïnvloeden. Het resultaat van deze deelvraag zal een lijst met maatregelen zijn, die toegepast kunnen worden in onderwijsgebouwen. Per BENG-indicator zullen maatregelen worden gezocht.

2.a/b/c Welke maatregelen zijn beschikbaar om de energiebehoefte / het primair energiegebruik / het aandeel duurzame energie van onderwijsgebouwen te verlagen / verlagen / verhogen?

Om deze deelvragen te beantwoorden zal een literatuuronderzoek worden uitgevoerd. In dit onderzoek worden op dezelfde websites als bij deelvraag 1 naar innovatieve maatregelen gezocht. De zoektocht begint bij de lijst van factoren die invloed hebben op de BENG-indicatoren, opgesteld bij deelvraag 1b. Er wordt gezocht naar maatregelen die deze factoren veranderen en zodoende ook de BENG-indicatoren aanpassen. Naast een literatuuronderzoek zal er ook contact gezocht worden met producenten en leveranciers van installaties of producenten van bouwkundige constructies.

Deelvraag 3: Welke maatregelen zijn beschikbaar om aan de BENG-wetgeving te voldoen in de drie cases?

De maatregelen die zijn gevonden bij deelvraag 2 worden in dit onderdeel toegepast op drie cases. In een case is er altijd sprake van wensen en eisen van verschillende actoren. Deze eisen en wensen hebben invloed op de keuze van de maatregelen. Niet alle maatregelen kunnen daarom worden toegepast op een case. Deze eisen en wensen worden per case vermeld. De maatregelen, die vervolgens wel kunnen worden toegepast in een case, worden eerst individueel gemodelleerd in een programma die de energie prestatie van gebouwen (EPG) berekend. Later zullen de maatregelen gecombineerd worden. Telkens wordt de invloed op de drie BENG-indicatoren berekend. Er zal geprobeerd worden om verschillende ontwerpen op te stellen, die voldoen aan de BENG-wetgeving.

3.a Welke eisen en wensen zijn er in de cases?

Om deelvraag 3a te beantwoorden zal gekeken worden naar het Bouwbesluit 2012. Daarnaast heeft Valstar Simonis een database beschikbaar. Hierin is het bestek, het voorontwerp en het definitief

ontwerp beschikbaar. Ook hier zijn de wensen en eisen van verschillende actoren weergegeven. Verder wordt voor de comfort eisen gekeken naar het programma van eisen voor Frisse Scholen.

3.b Wat is de invloed van de potentiële individuele maatregelen op de BENG-indicatoren?

Voor deelvraag 3b zal gebruik worden gemaakt van het EPG-programma Uniec 2.0. Allereerst zal een referentiegebouw worden ingevoerd. Dit is het huidige ontwerp van het gebouw. Door slechts één maatregel per case per keer toe te voegen kan de invloed van de maatregel op de BENG-indicatoren vergeleken worden met referentiewaarde.

3.c Welke maatregelen kunnen gecombineerd worden en wat is hun invloed op de BENG-indicatoren?

Voor deelvraag 3 zullen de maatregelen worden gecombineerd en hun invloed worden onderzocht. De bedoeling is om de maatregelen zo te kiezen dat de BENG-eisen gehaald kunnen worden. Het resultaat van dit onderdeel zijn verschillende ontwerpen die voldoen aan de BENG-wetgeving.

Data en Software

Voor de berekening van de indicatoren wordt gebruik gemaakt van het EPG-programma Uniec (Uniec, 2015). Uniec berekent de energieprestatie, inclusief de BENG-indicatoren, op basis van de NEN 7120 (NNI, 2012a), NEN 8088 (NNI, 2012b) en NEN 1068 (NNI, 2014). Uniec is een door de RVO erkend EPG-programma (RVO, 2013a). Het programma wordt momenteel ook gebruikt voor EPC-berekeningen.

De input van het model zijn bouwkundige en installatietechnische gegevens van het ontwerp. De BENG-indicatoren worden door de gemeente gecontroleerd op basis van het definitieve ontwerp. Als de BENG-indicatoren niet voldoen aan de BENG-eisen dan krijgt de opdrachtgever geen bouwvergunning. Indien gegevens onbekend zijn, gebruikt het programma forfaitaire waarden, die over het algemeen minder gunstig zijn voor de energieprestatie. Uniec berekent de energieprestatie voor een standaard klimaatjaar en een standaard gebruikersgedrag. Het werkelijke energiegebruik zal afwijken van het genormeerde energiegebruik (Uniec, 2015). Het model is wel geschikt om te controleren of een gebouw voldoet aan de BENG of EPC eisen, maar niet om te berekenen hoeveel energie een gebouw daadwerkelijk gebruikt.

Uniec is oorspronkelijk een EPG-programma voor de woningbouw. Sinds een paar jaar kan de software ook gebruikt worden voor de utiliteitsbouw. Echter is het nog niet altijd mogelijk om alle maatregelen in te vullen. Zo zal de nul-situatie van het Koningsberger gebouw niet exact overeenkomen met de oorspronkelijke ontwerp.

Tenslotte wordt de invloed van een biomassaketel, warmtekrachtkoppeling (WKK) of externe warmtelevering op het aandeel duurzame energie niet meegenomen in de bepaling van de indicator. Er is namelijk nog geen informatie beschikbaar hoe de invloed van deze duurzame warmte-opwekkers meegenomen moet worden in de bepalingsmethode.

1.6 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt gekeken naar de energieprestatie van onderwijsgebouwen. Allereerst wordt de BENG-wetgeving in een kader geplaatst van verschillende energieprestatie indicatoren. Vervolgens wordt gekeken hoe de BENG-wetgeving is opgebouwd en daarna zal het energiegebruik van onderwijsgebouwen worden geanalyseerd. Hoofdstuk 3 bevat een lijst met maatregelen, die invloed hebben op de BENG factoren. In Hoofdstuk 4 worden de cases geïntroduceerd. Er wordt gekeken naar de eisen en wensen in deze cases en er zal bepaald worden wat invloed van individuele maatregelen en van combinaties van maatregelen is op de BENG-indicatoren. Tenslotte worden in Hoofdstuk 5 de discussie, conclusies en aanbevelingen weergegeven.

Hoofdstuk 2: Energieprestatie van onderwijsgebouwen

Voordat er direct wordt gekeken naar de cases, is het van belang om te onderzoeken hoe de BENG-wetgeving binnen het principe van energieprestatie past. Literatuuronderzoek zal worden gedaan naar de definitie van energieprestatie. Hierbij wordt onderzocht wat de internationale en Europese perspectieven zijn met betrekking tot energieprestatie. Vervolgens wordt de BENG-wetgeving geanalyseerd. Hoe worden de BENG-indicatoren berekend en welke factoren beïnvloeden de indicatoren? Door dit te onderzoeken, wordt duidelijk welke factoren aangepast moeten worden om de BENG-indicatoren te veranderen. Deze lijst wordt gebruikt in Hoofdstuk 3 bij het zoeken naar maatregelen. Ten slotte wordt er in dit hoofdstuk gekeken naar de energieprestatie van onderwijsgebouwen. Gebouwen gebruiken geen energie, maar mensen gebruiken energie. Gebruikersfactoren verschillen per functie van een gebouw. In dit onderzoek worden onderwijsgebouwen onderzocht. Door de energieprestatie karakteristieken van onderwijsgebouwen te bekijken, kan worden vastgesteld waar zich potentiële energiebesparingsmogelijkheden bevinden.

2.1 Energieprestatie in gebouwen

Zoals beschreven is in de introductie moeten nieuwe gebouwen vanaf 1 januari 2021 (en overheidsgebouwen vanaf 2019) bijna energieneutraal zijn. De definitie van een BENG is volgens de Europese Unie: “gebouw met een zeer hoge energieprestatie. De dichtbij nul liggende of zeer lage hoeveelheid energie die is vereist, dient in zeer aanzienlijke mate te worden geleverd uit hernieuwbare bronnen, en dient energie die ter plaatse of dichtbij uit hernieuwbare bronnen wordt geproduceerd te bevatten” (European Union, 2010, p3). De bijna energie neutrale gebouwen moeten dus een hoge energieprestatie hebben, maar wat is hier de definitie van?

Volgens de International Energy Agency (IEA) kunnen nationale overheden zelf bepalen hoe ze de energiezuinigheid van een gebouw bepalen. Een van de manieren is door eisen op te stellen voor de energieprestatie van een gebouw. Deze eisen zijn gebaseerd op de totale uitstoot van broeikasgassen, de totale energie consumptie of de primaire energie consumptie van een gebouw (Entrop, Brouwers, & Reinders, 2010). Voor de energieprestatiebepaling van een gebouw moet volgens de IEA een eis opgesteld worden voor de energielevering of voor de invloed op het milieu. Om de energieprestatie van een gebouw te bepalen moeten ontwerpers een geavanceerd computerprogramma gebruiken, dat rekening houdt met alle onderdelen van het gebouw en zijn installaties. Waarden aan de energieprestatie moeten gebaseerd worden op de energiegebruik per m² gebruiksoppervlak, afhankelijk van de functie. Duurzaam opgewekte energie in een gebouw moet positief worden beoordeeld. Ook moeten de verschillende energiebronnen verschillend beoordeeld worden, dit kan op basis van invloed op het milieu, maar ook op kosten. Een maximumwaarde voor het gebruik van fossiele energiebronnen, primair energiegebruik of een maximum CO₂-uitstoot moet worden opgesteld in de energieprestatie-berekening. Per gebouw kunnen afwegingen gemaakt worden tussen verschillende prestatie-verbeterende maatregelen. Het gebruikte model moet wel rekening houden met nieuwe technologische of economische ontwikkelingen.

De Europese Richtlijn Energieprestatie voor Gebouwen (EPBD) is de richtlijn van het Europees Parlement en Raad van Europese Unie betreffende de energieprestatie van gebouwen. Deze richtlijn is herschikt in 2010 en geldt voor alle lidstaten van de Europese Unie. De methode om de energieprestatie te berekenen mag per land of regio variëren, maar het moet passen binnen het door de EPBD opgestelde kader (European Union, 2012). Volgens het kader moet de energieprestatie worden gebaseerd op het jaarlijkse energiegebruik van een gebouw bij normaal gebruik. De energieprestatie moet op een duidelijke manier worden aangegeven en moet een energieprestatie-indicator en een numerieke indicator van het primaire energieverbruik bevatten. De methode om de energieprestatie van een gebouw te berekenen, moet volgens de Europese Unie op zijn minst de volgende elementen bevatten: de feitelijke thermische kenmerken van het gebouw (warmtecapaciteit, isolatie, passieve verwarming, koelingselementen en koudebruggen), de verwarmingsinstallatie en de

warmwatervoorziening, de airconditioningsystemen, de natuurlijke en mechanische ventilatie, ingebouwde lichtinstallatie, het ontwerp, de interne warmtelast, en tenslotte ook de omstandigheden betreffende het binnenklimaat (European Union, 2010). Voor de berekening moeten gebouwen onderverdeeld worden op basis van gebruiksfunctie.

In Nederland zijn er op dit moment twee indicatoren voor de energieprestatie van gebouwen. De Energieprestatie coëfficiënt (EPC) en de Energie Index (Entrop, Brouwers, & Reinders, 2010). Beide indicatoren zijn gebaseerd op vergelijkingen met een toelaatbaar energiegebruik. Het karakteristieke jaarlijks energiegebruik bevat de volgende elementen: energie voor verwarming, hulpenergie, energie voor warm tapwater, energie voor ventilatie, energie voor verlichting, zomercomfort, energie voor koeling, energie voor bevochtiging en energieopwekking door zonnepanelen. De indicatoren kunnen gebruikt worden om het effect van energiebesparende technieken te bekijken.

2.2 Bijna Energie Neutrale Gebouwen

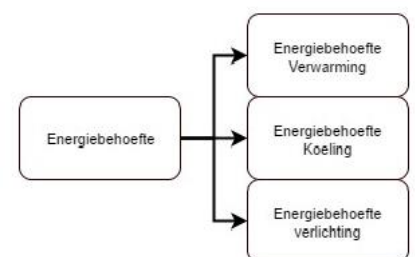
De Nederlandse overheid verplicht dat alle nieuwe gebouwen vanaf 1 januari 2021 voldoen aan de BENG-eisen. Omdat er nu nog geen bepalingmethode voor BENG beschikbaar is, worden de indicatoren vooralsnog bepaald aan de hand van (deel)resultaten van de EPC-berekening volgens NEN 7120 (NNI, 2012a). Deze bepalingmethode schrijft voor dat de gebouwen moeten voldoen aan drie eisen (RVO, 2015c):

- Een maximale energiebehoefte-eis
- een maximale primair energiegebruik-eis
- een minimaal aandeel aan duurzame energie-eis.

Hoe deze drie indicatoren bepaald worden, wordt beschreven in de volgende secties:

2.2.1 Energiebehoefte

Bij utiliteitsbouw wordt bij het bepalen van de energiebehoefte van een gebouw gekeken naar de hoeveelheid energie die nodig is voor het verwarmen, verlichten en koelen (of zomercomfort als er geen sprake is van actieve koeling) van een gebouw, zie Figuur 2. De energiebehoefte van een gebouw wordt weergegeven in een waarde in kWh/m² gebruiksoppervlak per jaar. Parasitaire energiebehoefte voor verlichting wordt in deze indicator niet meegenomen. Energiegebruik van de noodverlichting is een voorbeeld van parasitaire energiebehoefte. Bij toepassing van een luchtbehandelingskast (LBK) kan deze een deel van de warmte- en/of koudebehoefte voor haar rekening nemen. Dit wordt ook meegenomen in de berekening.



Figuur 2 Parameters energiebehoefte voor utiliteitsbouw

In Bijlage A zijn boomstructuren weergegeven, die aangeven welke factoren deze parameters beïnvloeden. Deze zijn bepaald door de vergelijkingen van de NEN 7120 te analyseren (NNI, 2012a). De berekende waarden zijn genormeerde waarden gebaseerd op een standaard klimaatjaar en een standaard gebruikersgedrag. De werkelijke energiebehoefte zal afwijken van het genormeerde energiebehoefte. Hieronder is weergegeven van welke factoren die indicatoren afhankelijk zijn. Dit is afgeleid uit de boomstructuren, die zijn weergegeven in de Figuren A.1 t/m A.8 in Bijlage A.

Warmtebehoefte van een gebouw

Warmtebehoefte bestaat uit twee onderdelen: warmtewinst en warmteverlies zie Figuur A.1 in Bijlage A. In het stookseizoen zorgt warmteverlies voor een toename van de warmtebehoefte. Warmteverlies bestaat weer uit twee onderdelen: warmteverlies door transmissie en warmteverlies door ventilatie, zie Figuur A.2 in Bijlage A. Warmte kan de thermische schil passeren door middel van transmissie. Hoe

lager de warmte- doorgangscoefficienten van de thermische schil, hoe minder warmte verloren gaat naar de buitenlucht, aangrenzende grond of aangrenzend water. In de berekeningen van de warmtebehoefte wordt gekeken naar de warmtedoorgangscoefficienten van ramen, vloeren, gevels en daken. Daarnaast wordt er rekening gehouden met het totale oppervlak van het gebouw dat grenst aan de buitenlucht, het water of aan de grond. Warmteverlies door ventilatie is inclusief het warmteverlies door infiltratie. Het is afhankelijk van de hoeveelheid lucht het gebouw binnen komt en de temperatuur van de lucht. Zie Figuur A.2 in Bijlage A.

Warmtewinst vermindert juist de warmtebehoefte van een gebouw. Warmtewinst bestaat uit interne warmteproductie en warmtewinst door zonnewarmte. Interne warmte productie ontstaat bijvoorbeeld door personen of apparatuur, die warmte produceren. Factoren die de warmtewinst door zonnewarmte beïnvloeden zijn de beschaduwingsreductiefactor, de zontoetredingsfactor, de absorptie coëfficiënt en de warmtedoorgangscoefficiënt. Zie Figuur A.3 in Bijlage A.

Koudebehoefte van een gebouw

Wanneer de temperatuur in een gebouw hoger ligt dan de instellingstemperatuur is er behoefte aan koude. Als er niet actief gekoeld wordt, wordt de koudebehoefte meegerekend bij de parameter zomercomfort. De koudebehoefte is het tegenovergestelde van de warmtebehoefte. Warmtewinst zorgt voor een hogere koudebehoefte en warmteverlies zorgt voor een lagere koudebehoefte. Zie Figuur A.4 in Bijlage A.

Elektriciteitsgebruik verlichting

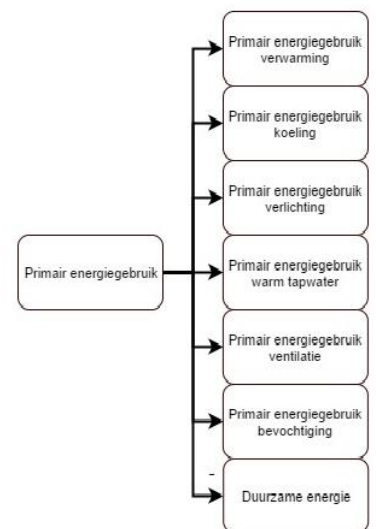
Deze parameter wordt bij de berekening van de energiebehoefte wel meegenomen in de utiliteitsbouw, maar niet in de woningbouw. Het geïnstalleerde vermogen van de verlichting heeft invloed op het energiegebruik. Hoe zuiniger de verlichting, hoe minder elektriciteit nodig is om het gebouw te verlichten. Ook het aantal branduren van de verlichting heeft invloed op het elektriciteitsgebruik van de verlichting. Verschillende verlichtingsregelingen zorgen er voor dat de lampen minder lang branden. Deze regelingen worden gewaardeerd door een reductiefactor. Het parasitair elektriciteitsgebruik van verlichting wordt niet meegenomen in de berekening van de energiebehoefte.

Luchtbehandelingskast

De luchtbehandelingskast (LBK) kan een deel van de verwarming of de koeling voor zijn rekening nemen. De inkomende lucht wordt dan door de LBK verwarmd of gekoeld. De hoeveelheid lucht die de LBK passeert, heeft invloed op de warmte- en koudebehoefte. Recirculatie zorgt ervoor dat een deel van de lucht die wordt afgevoerd, terug wordt gevoerd het gebouw in. Er moet hierbij wel rekening mee gehouden worden, dat de lucht in het gebouw "schoon" blijft. Gezondheidsklachten kunnen ontstaan door verontreinigde lucht. Daarnaast zijn er aanwijzingen dat leerlingen minder goed presteren in een slecht geventileerde klas (Versteeg, 2008). Ten slotte kan de uitgaande lucht de inkomende lucht verwarmen of koelen door middel van warmteterugwinning.

2.2.2 Primair energiegebruik

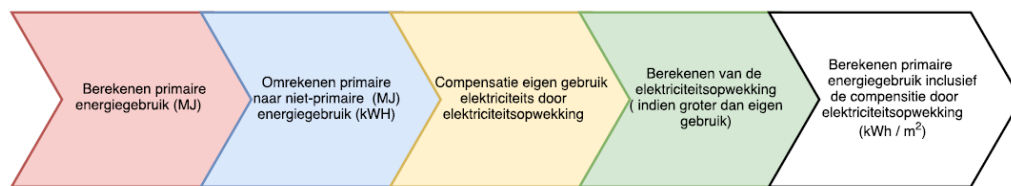
Primair energiegebruik is de hoeveelheid energie benodigd om de aan het gebouw geleverde energie te produceren (Entrop, 2013). Het primair energiegebruik bestaat uit de het primair energiegebruik voor verwarming, koeling, verlichting, warm tapwater, ventilatie en bevochtiging en kan worden gereduceerd door opgewekte duurzame energie, zie Figuur 3. De indicator wordt weergegeven in een waarde in kWh/m² gebruiksoppervlak



Figuur 3 Parameters primair energiegebruik voor utiliteitsbouw

per jaar. Voor de berekening van het primair energiegebruik moeten een aantal ‘tussenberekeningen’ worden opgesteld, die zijn weergegeven in Figuur 4. De berekening wordt uitgevoerd zodat de juiste hoeveelheid elektriciteitsopwekking wordt meegerekend in de berekening van het primaire energiegebruik. De energie die opgewekt is op het perceel wordt op verschillende manieren gewaardeerd:

- Indien elektriciteitsproductie t.b.v. compensatie van energiegebruik geldt energiefactor 2,56 (stap 3)
- Indien geproduceerde elektriciteit wordt geëxporteerd geldt energiefactor 2,0 (stap 3)
- Het deel van de geëxporteerde elektriciteit dat groter is dan het gebouw gebonden gebruik wordt gewaardeerd met een energiefactor van 1,0 (stap 4)



Figuur 4 Stappenplan berekening primair energiegebruik (Nieman, 2015)

Het primaire energiegebruik per energiepost wordt bepaald met behulp van formules uit NEN 7120 en NEN 8088-1 (NNI, 2012a) (NNI, 2012b). Deze NEN-normen zijn geanalyseerd en er is onderzocht welke factoren het primaire energiegebruik beïnvloeden. De gedetailleerde boomstructuren zijn te vinden in Figuur A.5 t/m Figuur A.7 in Bijlage A.

Primair energiegebruik voor verwarming, warm tapwater en koeling

De hoeveelheid primaire energie voor verwarming, warm tapwater en koeling is ten eerste afhankelijk van de energiebehoefte voor deze energieposten. Verder is het rendement van het verwarmings- / koelingssysteem van invloed. Dit rendement bestaat uit drie delen: het opwekkingsrendement, het distributierendement en het afgifterendement. Hoe hoger het rendement, hoe lager het primair energiegebruik. Daarnaast moet ook de hulpenergie meegerekend worden. Hulpenergie is onder andere energie voor de circulatiepompen en de regeltechniek van de systemen. Zie Figuur A.6 in Bijlage A.

Primair energiegebruik voor ventilatie

Voor het primaire energiegebruik is de te installeren ventilatiecapaciteit een belangrijke factor. Hoe meer lucht moet worden geventileerd, hoe groter het primair energiegebruik voor ventilatie. De ventilatiecapaciteit moet groot genoeg zijn om de lucht in het gebouw schoon te houden. Regelingen bepalen wanneer geventileerd wordt. Deze regelingen worden gewaardeerd met een correctiefactor. Zie Figuur A.7 in Bijlage A.

Primair energiegebruik voor verlichting

Dezelfde factoren hebben invloed op de parameter ‘elektriciteitsgebruik voor verlichting’, als in Sectie 2.2.1, maar hier wordt het parasitair energiegebruik wel meegerekend. Parasitair energiegebruik is bijvoorbeeld de noodverlichting in een gebouw. De som van het energiegebruik van verlichting en het parasitaire verlichting wordt vervolgens keer 2,56 gedaan. Dit heeft te maken met het opwekkingsrendement van elektriciteit van 39%.

Primair energiegebruik voor bevochtiging

Het primair energiegebruik voor bevochtiging is afhankelijk van de hoeveelheid te bevochtigen lucht en de hoeveelheid vocht, die moet worden toegevoegd aan de lucht. Daarnaast kan het primair energiegebruik worden verlaagd door vocht terug te winnen uit afgevoerde lucht en het opwekkingsrendement te verhogen. Zie Figuur A.7 in Bijlage A.

2.2.3 Aandeel hernieuwbare energie

Het aandeel hernieuwbare energie wordt weergegeven in een percentage:

$$\text{aandeel duurzame energie} = \frac{\text{bruto duurzame energie}}{(\text{primaire fossiele energie} + \text{bruto duurzame energie})} \times 100\% \quad (2.1)$$

Met de primaire energie wordt het resultaat van BENG-indicator 2 'primair energiegebruik' bedoeld. De bruto duurzame energie bestaat uit terplekke of dichtbij opgewekte duurzame energie. Het aandeel duurzame energie dat grote energieleveranciers leveren wordt niet meegerekend (Harmelink, 2015). Een belangrijke opwekker voor duurzame energie zijn fotonvoltaïsche panelen (PV-panelen). De bepalingmethode voor de opbrengst van PV-systemen is geanalyseerd in de NEN 7120. De factoren die deze parameter beïnvloeden zijn weergegeven in Figuur A.8 in Bijlage A (NNI, 2012a).

Opbrengst PV-systemen

De opbrengst van PV-systemen is afhankelijk van drie factoren: de opbrengstfactor, het piekvermogen en de straling die op de PV-panelen valt. De opbrengstfactor is het percentage van het maximum vermogen in relatie tot ligging van de panelen ten opzichte van het zuiden en de hellingshoek waarin de panelen worden geplaatst. Het piekvermogen hangt af van het type zonnestelsel. De hoeveelheid straling die op de PV valt, is vervolgens weer afhankelijk van de beschaduwingsfactor, het oppervlak van de PV-panelen en de hoeveelheid straling op de panelen. Zie Figuur A.8 in Bijlage A.

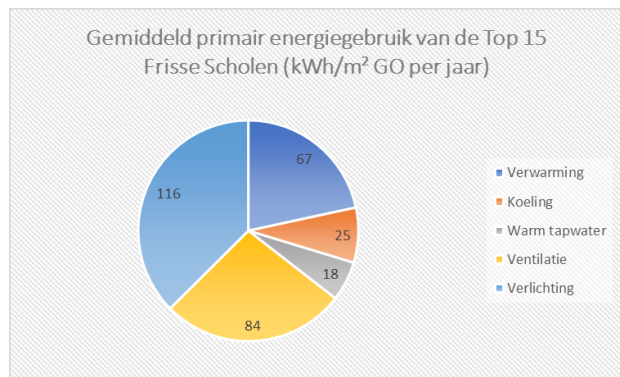
2.3 Energieprestatie karakteristieken van onderwijsgebouwen

In deze sectie zal worden geanalyseerd hoe de energieprestatie van de huidige onderwijsgebouwen eruit ziet. De nieuwe BENG-wetgeving geldt vanaf 2021 eerst alleen voor nieuwe gebouwen. Wil men de doelstellingen van het akkoord van Parijs halen, wordt verwacht dat ook de wetgeving voor bestaande gebouwen aangescherpt zal worden. Daarnaast zal gekeken worden naar duurzame onderwijsgebouwen van dit moment. Er zal gekeken worden naar potentiële energiebesparingsmogelijkheden.

De gemiddelde leeftijd van vastgoed met een onderwijsfunctie is 43 jaar. In 2013 kwam 20% van de onderwijsgebouwen uit de jaren '70 en 37% zelfs van voor 1970 (Economisch instituut voor de bouw, 2013). De energieprestatie van oude scholen is beduidend slechter dan die van de moderne scholen. Driekwart van het onderwijsvastgoed heeft een energielabel C of lager. Een kwart heeft zelfs energielabel G. Naast het verbeteren van de nieuwe ontwerpen, is het daarom ook van belang om er voor te zorgen dat de energieprestatie van bestaande onderwijsinstellingen verbeterd wordt. Voor de energieprestatie van de huidige onderwijsgebouwen zal gekeken worden naar de Top 15 Frisse Scholen. Dit zijn de scholen met een laag energiegebruik en een gezond binnenmilieu als het gaat om luchtkwaliteit, temperatuur en comfort, licht en geluid. Er is gekozen om deze scholen te analyseren, omdat nieuw te bouwen onderwijsgebouwen ook moeten voldoen aan deze eisen voor een gezond binnenmilieu.

Bij onderwijsgebouwen is de energiebehoefte voor verwarming relatief hoog ten opzichte van de andere gebruiksfuncties. De reden hiervoor is dat de lucht in een onderwijsgebouw goed geventileerd moet worden. Voor een onderwijsgebouw geldt een minimaal ventilatiedebiet van 8,5 dm³/s per persoon. Ter vergelijking voor een bijeenkomst ruimte is dit 4,0 dm³/s per persoon (Bouwbesluit, 2012). Veel warmte verdwijnt door de uitgaande lucht. Warmterugwinning kan er voor zorgen dat de energiebehoefte voor verwarming verminderd wordt. Verlichting heeft ook een grote invloed op de totale energiebehoefte van het onderwijsgebouw. Energiebehoefte voor koeling is vaak beperkt (RVO, 2016).

Van de Top 15 Frisse Scholen is het primaire energie gebruik per energiepost bekeken. In de top 15 staan basisscholen en middelbare scholen en één instituut voor beroepsonderwijs (RVO, 2016). Per energiepost is het gemiddelde berekend en weergegeven in Figuur 5. De waarden in de grafiek zijn weergegeven in kWh/m² gebruikersoppervlak per jaar. Zoals te zien is in Figuur 5 is het primaire energiegebruik van verwarming, ventilatie en verlichting het grootst. Koeling en warm tapwater hebben slechts een kleine waarde (RVO, 2016).



Figuur 5 Gemiddeld primair energiegebruik van Top 15 Frisse Scholen

2.4 Conclusie

In Nederland zijn er vanaf 1 januari 2019 drie indicatoren die tezamen de energieprestatie van een gebouw uitdrukken: de energiebehoefte, het primaire energiegebruik en het aandeel duurzame energie. Aangezien ook in andere landen het primaire energiegebruik meegenomen wordt in de bepaling van de energieprestatie, kunnen deelresultaten van dit onderzoek ook gebruikt worden in andere landen. De bepalingsmethode kan echter per land verschillen.

In Sectie 2.2 is aangegeven welke factoren invloed hebben op de parameters van de BENG-indicatoren. Deze parameters zijn weergegeven in Tabel 2. Deze factoren zullen in Hoofdstuk 3 gebruikt worden in de zoektocht naar maatregelen om de BENG-indicatoren te beïnvloeden.

Tabel 2 Parameters van de BENG-indicatoren

Energiebehoefte	Primair energiegebruik	Aandeel duurzame energie
Warmtebehoefte	Primair energiegebruik voor verwarming	Opbrengst PV-systemen
Koudebehoefte	Primair energiegebruik voor warm tapwater	Opbrengst overige duurzame bronnen
Elektriciteit verlichting	Primair energiegebruik voor koeling	
Warmtebehoefte geleverd door LBK	Primair energiegebruik voor ventilatie	
Koudebehoefte geleverd door LBK	Primair energiegebruik voor verlichting	
	Primair energiegebruik voor bevochtiging	
	Bruto hernieuwbare energie(-)	

Relatief grote posten bij de energiebehoefte van een onderwijsgebouw zijn verwarming en verlichting. Verwarming, verlichting en ventilatie zijn relatief grote posten bij het primair energiegebruik van een onderwijsgebouw. Bij de zoektocht naar maatregelen zal vooral gekeken worden naar maatregelen, die deze posten beïnvloeden, omdat hier de meeste winst valt te behalen. Warm tapwater en koeling hebben relatief een kleine waarde in de bepaling van het primaire energiegebruik. In dit onderzoek zullen verder geen maatregelen worden gezocht, die deze energieposten beïnvloeden, omdat hier absoluut gezien niet zo veel winst valt te behalen.

Hoofdstuk 3: Beschikbare maatregelen

Nu duidelijk is wat de BENG-wetgeving inhoudt en waar potentiële besparingsmogelijkheden liggen, is het tijd om maatregelen in kaart te brengen die een positieve invloed hebben op de BENG-indicatoren. In de Secties 3.2, 3.3 en 3.4 worden lijsten met verschillende maatregelen weergegeven met respectievelijk invloed op de energiebehoefte, het primaire energiegebruik en het aandeel duurzame energie. Enkele van deze maatregelen zullen toegepast worden op de cases.

3.1 Introductie

In Sectie 2.2 zijn verschillende factoren benoemd, die van invloed zijn op de parameters van de BENG-indicatoren. Op basis van de formules uit de verschillende NEN-normen is afgeleid of een factor een positieve of negatieve invloed heeft op de parameter. Hierdoor kan voorspeld worden of een verandering van een factor de BENG indicator positief of negatief beïnvloedt. Op basis van de genoemde factoren, kunnen maatregelen worden gezocht, die de BENG-indicatoren positief beïnvloeden. Maatregelen hebben niet enkel invloed op één indicator. Een lagere energiebehoefte heeft namelijk ook een lager primair energiegebruik tot gevolg. Daarnaast hebben duurzame opwekkers ook invloed op het primaire energiegebruik. De exacte invloed van de maatregelen in de cases zal vermeld worden in Hoofdstuk 4.

3.2 Maatregelen om de energiebehoefte van een onderwijsgebouw te beperken

Er zijn verschillende maatregelen beschikbaar om de energiebehoefte te reduceren. De energiebehoefte kan bijvoorbeeld beperkt worden door passief te bouwen. Een passief huis heeft een lage energiebehoefte en een laag primair energiegebruik, dit wordt bereikt door onder andere de volgende toepassingen (ISSO, 2015):

- Zeer goed geïsoleerde thermische schil
- Optimaal gebruik van passieve zonne-energie
- Goede voorzieningen voor zonwering en passieve zomernachtkoeling
- Een gebalanceerd ventilatiesysteem met warmteterugwinning

Ook de verlichting invloed op de energiebehoefte. Er zal gekeken worden naar efficiënte verlichting en verschillende verlichtingsregelingen.

Goed geïsoleerde vloeren, daken en gevels

De warmteweerstand wordt voor niet-transparante constructiedelen weergegeven in de R_c -waarde. De R_c -waarde is de warmteweerstand voor de constructie en wordt uitgedrukt in m^2K/W (ISSO, 2015). Een hoge R_c -waarde kan eenvoudig worden behaald door goede isolatie toe te passen. De dikte en de warmtegeleidingscoëfficiënt hebben invloed op de R_c -waarde. De warmtegeleidingscoëfficiënt verschilt per materiaal. Dikke isolatie is niet altijd mogelijk door bouwkundige beperkingen.

Het warmteverlies door vloeren is ten opzichte van het verlies door gevels en daken beperkt. Dit heeft er mee te maken dat de gevels en daken grenzen aan de buitenlucht en de vloer aan de grond of kruipruimte grenst. In het stookseizoen is de gemiddelde temperatuur van de grond of de kruipruimte beduidend hoger dan van de buitenlucht en het temperatuurverschil tussen binnen en de kruipruimte kleiner. Daarnaast stijgt warme lucht op. Dit zijn redenen waarom de begane grond vloer een lagere eis voor de R_c -waarde heeft (ISSO, 2015).

Er zijn verschillende isolatiematerialen beschikbaar om een hoge R_c -waarde te behalen. De dikte die nodig is om een hoge R_c -waarde te behalen kan echter wel verschillen. Traditionele isolatietypen, zoals minerale wol, geëxpandeerd polystyreen, geëxtrudeerd polystyreen, cellulose en polyurethaan hebben als nadeel dat er een dikke laag isolatie nodig is om een hoge R -waarde te bereiken (Jelle,

2011). De dikte van de isolatie kan worden verkleind door verschillende maatregelen, bijvoorbeeld de toepassing van aerogel, warmte reflecterende folies en Nano poreuze materialen (ISSO, 2015).

Ramen en deuren

Ramen hebben twee belangrijke eigenschappen die invloed hebben op de energiebehoefte, zoals bepaald in de BENG-wetgeving (NEPROM, 2014). De isolatiewaarde (U-waarde) drukt de hoeveelheid warmte uit die per seconde per m^2 en per Kelvin temperatuurverschil tussen de ene en de andere zijde van de ramen doorgelaten wordt en de zontoetredingsfactor (g-waarde), die de verhouding weergeeft tussen de binnenkomende en de opvallende zonnestralingen. Er zijn verschillende typen glas beschikbaar, zie Tabel 3. Door het verlagen van de U-waarde van de ramen kan minder thermische energie de thermische schil passeren. Een punt van aandacht hierbij is dat het kozijn meegenomen moet worden in de bepaling van de U-waarde. Een houten kozijn heeft ongeveer een U-waarde van $1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dikkere profielen hebben lagere U-waardes tot zo'n $0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$ (ISSO, 2015). Een aluminium raam heeft ongeveer een U-waarde van $1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ (ISSO, 2015).

Een hoge zontoetredingsfactor zorgt voor meer warmtewinst, dit is gunstig in de winter, maar ongunstig in de zomer. De g-waarde kan worden aangepast door zon-reflecterende coatings toe te passen.

Tabel 3 Eigenschappen verschillende typen glas (ISSO, 2015)

	U-waarde [$\text{W/m}^2\text{K}$]	g-waarde [-]
Blank enkel glas	5,8	0,90
Blank dubbel glas	2,8	0,80
HR ⁺⁺ -glas (niet zonwerend)	1,0-1,2	0,70-0,80
Drievoudige beglazing (niet zonwerend)	0,5-0,9	0,60-0,75
Viervoudige beglazing	0,25	0,4

In Scandinavische landen wordt incidenteel al viervoudig glas toegepast. Dit glas is momenteel nog niet beschikbaar in Nederland. De eigenschappen van dit glas zijn gebaseerd op het verslag van DWA en Nieman (Nieman; DWA, 2016). Viervoudig glas heeft een U-waarde van $0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$ en een g-waarde van 0.4.

Smart Windows zijn ramen, waarbij de zon- en lichttoetreding geregeld kunnen worden. In Smart Windows zitten mineralen die door middel van chemische reacties, er voor zorgen dat de g-waarde en de lichttoetredingsfactor veranderen (Allen, Karen, Rutherford, & Wu, 2017). Door het aanpassen van de g-waarde kan energie voor koeling en verwarming bespaard worden. Het is niet mogelijk om de invloed van een Smart Window te bepalen in een EPG-programma.

Window to Wall Ratio (WWR)

Naast het type glas is ook de oriëntatie en het oppervlak van het glas van belang. De eigenschappen van transparante delen van de gevel verschillen van de eigenschappen van de dichte delen. Dichte delen hebben over het algemeen een hogere R_c -waarde dan transparante delen. Daarnaast kan via transparante delen licht en zonne-energie naar binnenkomen. De hoeveelheid glas heeft invloed op de warmtewinst, warmteverlies en hoeveelheid daglicht binnen een gebouw.



Figuur 6 Situatie gevel voor lichtinval

De hoeveelheid daglicht die een gebouw binnenkomt, wordt in NEN 7120 aangegeven met de daglichtsector (NNI, 2012a). In de daglichtsector is minder verlichting nodig. De daglichtsector wordt berekend door de breedte van het raam te vermenigvuldigen met de diepte van de lichtinval. In NEN 7120 zijn drie situaties bepaald voor de waarde van de diepte van de lichtinval. Uitgaande van de situatie zoals geschetst is in Figuur 6 is de diepte van de lichtinval:

- $WWR < 30\%$: diepte lichtinval is 0m;
- $30\% < WWR \leq 35\%$: diepte lichtinval is 2m;
- $WWR \geq 35\%$: diepte lichtinval is 3m.

Ook de oriëntatie van de beglazing is van invloed op de energieprestatie. Op het noordelijk halfrond schijnt de zon het langst op het zuiden. Het oosten en westen hebben ook lange periodes van de dag te maken met lichtinval, terwijl de lichtinval op de noordkant van het gebouw beperkt is. Goia (2016) deed onderzoek naar de optimale window to wall ratio in kantoorgebouwen in verschillende Europese klimaten en verschillende breedtegraden. De optimale WWR is voor het onderzoek van Goia (2016) de ratio die het jaarlijkse energiegebruik voor verwarming, koeling en verlichting minimaliseert. Per oriëntatie is gekeken naar de optimale WWR-ratio en de uitkomst was als volgt:

Tabel 4 Optimale WWR-ratio per klimaatzone per oriëntatie voor een kantoorgebouw (Goia, 2016)

Klimaat		Aanbevolen WWR Zuid	Aanbevolen WWR Noord	Aanbevolen WWR West	Aanbevolen WWR Oost
Frankfurt, zeeklimaat	gematigd	0,37-0,45	0,40-0,45	0,37-0,43	0,37-0,43

Nederland heeft net als Frankfurt een gematigd zeeklimaat en daarvoor zullen voor de cases de waarden van Frankfurt aangehouden worden. Bij het onderzoek van Goia (2016) is ook een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Het resultaat hiervan is dat in het gematigd zeeklimaat een relatief kleine variatie zit tussen het energiegebruik bij een optimale WWR en het energiegebruik bij de minst gunstige WWR. De oriëntatie noord heeft voor het zeeklimaat de grootste variatie. Ten slotte is de U-waarde ook van invloed op de optimale WWR. Des te lager de U-waarde van het glas, des hoger de optimale WWR (Ma, Wang, & Guo, 2015). Het vergroten van het glasoppervlak heeft niet alleen invloed op het energiegebruik. Over het algemeen wordt meer daglicht in een gebouw als prettig ervaren.

Zonwering

Een manier die vaak gebruikt wordt om de g-waarde van de ramen te kunnen regelen is het gebruik van zonwering. De zonwering beïnvloedt naast de g-waarde ook de lichtinval. Lichtinval kan hinderlijk zijn voor een gebruiker van het gebouw. De beste zonwering wordt verkregen als de zonnestraling buiten het glas wordt opgevangen. Buitenzonwering levert daarom de grootste mate van zonwering op. In de wintersituatie, wanneer de zonnewarmte gunstig is, kan de zonwering omhoog gelaten of weggeschoven worden (ISSO, 2015). Er kan gekozen worden tussen automatische zonwering en handmatige zonwering. Automatische zonwering wordt geïmplementeerd met behulp van sensoren.

Ventilatieregelingen

Gebouwen kunnen op verschillende manieren geventileerd worden. Er is mechanische en natuurlijke ventilatie. Daarnaast zijn er nog verschillende regelingen beschikbaar, die bepalen wanneer geventileerd moet worden. Door het veranderen van de regeling verandert de hoeveelheid lucht die het gebouw in- / uitgaat. Des te minder lucht het gebouw binnen komt, des te minder lucht gekoeld of verwarmd hoeft te worden. Het is echter wel belangrijk dat de luchtkwaliteit in orde blijft. Er wordt onderscheid tussen vier verschillende ventilatiesystemen, zie Tabel 5 (ISSO, 2015).

Tabel 5 Ventilatiesysteem C en D met verschillende regelingen

C: Natuurlijke toevoer en mechanische afvoer	D: Mechanische toe- en afvoer
C2a: handmatig/ meerstanden- schakelaar	D2: Meerstanden- schakelaar, geen zonering
C3b: tijdsgestuurde regelingen	D3 CO ₂ sturing op afvoer geen zonering
C4c: CO ₂ sturing per zone	D5a CO ₂ sturing op afvoer per zone
	D5b CO ₂ / RV sturing per zone

Warmteterugwinning kan alleen bij mechanische afvoer. Aangezien WTW een belangrijk onderdeel is om de energiebehoefte te beperken, zal in Hoofdstuk 4 alleen ventilatiesystemen C en D worden beschouwd. Voordeel van CO₂-sturing is dat de lucht alleen wordt ververst als het CO₂-gehalte te hoog is. Hierdoor hoeft minder vaak geventileerd te worden. Zonering geeft aan dat het gebouw in twee of meer zones afzonderlijk geventileerd kan worden.

Warmteterugwinning

In het stookseizoen heeft de toevoerlucht een lagere temperatuur dan de binnentemperatuur. Deze koude lucht moet verwarmd worden om ervoor te zorgen dat de temperatuur op de gewenste temperatuur blijft. Warmteterugwinning kan een deel van de warmtebehoefte voor zijn rekening nemen. De afvoerlucht levert een gedeelte van zijn warmte aan de toevoerlucht. Dit zelfde principe kan gebruikt worden bij koeling. In dit geval geeft de toevoerlucht een gedeelte van zijn warmte aan de afvoerlucht. Er zijn verschillende systemen voor warmteterugwinning. De systemen die zijn bekeken zijn van leverancier Al-Ko (Al-Ko, 2017).

Kruisstroomsystemen(70%)

Bij warmteterugwinning met een kruisstroomsysteem bestaat de wisselaar uit platen aluminium of RVS die afwisselend vlak en gegolfd zijn uitgevoerd. Langs deze platen stroomt van elkaar gescheiden de toevoerlucht en afvoerlucht. Temperatuurrendementen van ongeveer 70% kunnen behaald worden. Dit houdt in dat slechts 30% van de toegevoerde lucht nog maar verwarmd hoeft te worden. Door de het kruisstroomsysteem op maat te maken kan een hoger rendement ook behaald worden. Rendementen zijn afhankelijk van temperatuur en luchtvochtigheid.

Warmtewiel (75%)

Warmteterugwinning met een warmtewiel is gebaseerd op het principe dat een warmte-accumulerend element in de vorm van een wiel, opgebouwd uit kleine aluminium buisjes, afwisselend door de in- en de uitgaande luchtstroom wordt gevoerd. De warmte wordt tijdelijk opgeslagen en dan geleidelijk weer afgegeven. Door het toerental van het warmtewiel in te stellen kan de temperatuur van de toevoerlucht constant worden gehouden. Het warmtewiel heeft een temperatuur rendement van ruim 75% en vochtterugwinning is mogelijk.

Kantherm (90%).

Een Kantherm systeem is opgebouwd uit een kantelklep en twee warmtebuffers, elk opgebouwd uit cassettes met platen van zeer zuiver aluminium. De warmte uit de afvoerlucht wordt met een cyclus van 50 seconden opgeslagen in aluminium warmtebuffers. Door de grote opslagcapaciteit van de cassettes wordt in het Nederlandse klimaat een temperatuurrendement van 90% gerealiseerd.

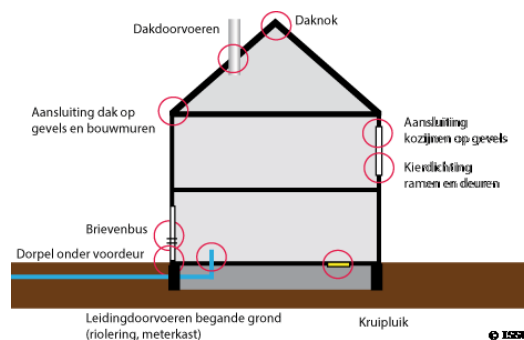
Luchtdichtheid van het gebouw

Een ander onderdeel van het passief huis concept is de luchtdichtheid van een gebouw. Door luchtdicht te bouwen, kan infiltratie in een gebouw voorkomen worden. Er is sprake van infiltratie als lucht ongewenst van buiten naar binnen komt. De luchtdichtheid van een gebouw is gekoppeld aan de ventilatie. Hoe meer luchtdicht een gebouw is, hoe belangrijker de ventilatie wordt om er voor te zorgen dat de lucht in het gebouw wel ververst wordt (Nieman, 2017). Door infiltratie te beperken komt minder koude c.q. warme lucht van buiten het gebouw binnen. Dit beïnvloedt de warmte- en koudebehoefte. De luchtdichtheid van een gebouw, uitgedrukt in de hoeveelheid luchtlekken bij 10 Pascal, is één van de invoerparameters in de EPG-berekening. In Nederland maken we voor de mate van luchtdichtheid (uitgedrukt in de q_{v10} -waarde) onderscheid in drie klassen (Nieman, 2017).

Tabel 6: Luchtdichtheid klassen (Nieman, 2017)

Klasse		$q_{v,10}$
Klasse 1	Basis	$> 0,6 \text{ dm}^3/\text{s.m}^2$ voldoet aan het bouwbesluit, geen bijzondere eisen
Klasse 2	Goed	tussen $0,3$ en $0,6 \text{ dm}^3/\text{s.m}^2$ = energiezuinig bouwen
Klasse 3	Uitstekend	$< \text{circa } 0,15 \text{ dm}^3/\text{s.m}^2$ = passief bouwen of andere vormen van zeer energiezuinig bouwen

De vraag is natuurlijk hoe het mogelijk is om luchtdichtklasse 3 te behalen. Infiltratie is mogelijk door kieren en naden. Kieren worden gevormd bij de aansluiting tussen een bewegend en een vast deel. Naden worden gevormd bij de aansluiting tussen vaste delen. In Figuur 7 zijn veel voorkomende luchtlekken te zien. Door kieren en naden zo veel mogelijk te beperken, kan een hoge luchtdichtheid worden gehaald.



Figuur 7: Veel voorkomende luchtlekken (ISSO, 2015)

Laag vermogen verlichting

Het vermogen van licht wordt in de EPG-programma's uitgedrukt in W/m^2 gebruiksoppervlak. Er zijn echter vele factoren die deze parameter beïnvloeden. Voorbeelden van factoren die invloed hebben op de totstandkoming van de parameter zijn: hoeveelheid lichtinval, vermogen lampen, soort armatuur, kleur van de muren etc. Voor het bepalen van deze parameter worden lichtplannen opgesteld, waarbij rekening moet worden gehouden met de gelijkmatigheidsfactor, verlichtingssterkte, unified glare rating (UGR) en behoudsterkte.

Enkele zuinige lampen zijn hoog frequente TL-verlichting en LED-verlichting. Op dit moment komt het rendement van LED's overeen met andere energiezuinige lichtbronnen, maar het lichtrendement van LED's groeit snel. Het aantal Lumen per Watt zal hierdoor sterk toenemen in tegenstelling tot andere lichtbronnen (Nardelli, Deuschle, Azevedo, Pessoa, & Ghisi, 2017). Voorspellingen geven weer dat LED's de meest gebruikte lichtbron zijn in 2035 (Dubois & Blomsterberg, 2011).

Om een indicatie te kunnen geven welk vermogen in W/m^2 op dit moment realistisch is, zijn lichtberekeningen gemaakt voor de cases. Voor deze lichtberekeningen is het programma Dialux

gebruikt. De hoogfrequente TL-5 verlichting is vervangen door energiezuinige LED-verlichting. Dit had een behoorlijke verlaging van het W/m^2 tot gevolg. De lichtplannen zijn weergegeven in Bijlage B.

Verlichtingsregelingen

Om er voor te zorgen dat de verlichting niet brandt als dat niet nodig is, zijn er verschillende regelingen. In de NEN 7120 worden verschillende regelingen gewaardeerd (NNI, 2012a). De reductiefactoren van de verschillende factoren zijn in Tabel 7 weergegeven. Een veegpulsschakeling in combinatie met een daglichtschakeling geeft de grootste reductiefactor.

Tabel 7 Reductiefactoren per regeling (NNI, 2012a)

Omschrijving regeling	Reductiefactor voor daglichtsector	Reductiefactor voor sectie waar kunstlicht toegepast wordt
Veegpulsschakeling i.c.m. daglichtschakeling	0,55	0,7
Daglichtschakeling of- regeling	0,6	0,8
Veegpulsschakeling	0,75	0,75
Vertrekschakeling	0,9	0,9
Centraal aan/uit	1,0	1,0
Aan- / afwezigheidsdetectie	0,8	0,8

3.3 Maatregelen om het primaire energiegebruik van een onderwijsgebouw te beperken

Het primaire energiegebruik is, zoals eerder vermeld, afhankelijk van de energiebehoefte. De maatregelen die zijn benoemd in deze sectie zijn wel van invloed op het primaire energiegebruik, maar niet op de energiebehoefte. Het gaat hier met name om maatregelen met een hoog rendement. Dit rendement kan bestaan uit het opwekkingsrendement, het distributierendement en het afgifterendement.

Lage temperatuur verwarming (LTV)

Traditionele verwarmingssystemen hebben meestal een aanvoertemperatuur van 90°C en een retourtemperatuur van 70°C. Hoge temperaturen zorgen echter voor een lager rendement. LTV heeft een hoger rendement. Er wordt van LTV gesproken als de aanvoerwatertemperatuur lager is dan 55°C. LTV wordt vaak gebruikt met afgiftesystemen die een groot oppervlakte hebben, zoals (ISSO, 2015):

- Vloerverwarming; omdat de vloer een groot oppervlakte heeft, hoeft bij vloerverwarming het temperatuurverschil tussen de lucht in de ruimte en het oppervlak van de vloer niet zo groot te zijn. Met deze systemen is de laagste aanvoertemperatuur haalbaar voor verwarming.
- Een soort vloerverwarming is betonkernactivering; bij betonkernactivering wordt gebruik gemaakt van het accumulerende vermogen van beton. De verwarmingsleidingen worden de kern van de vloer of plafond aangebracht. De koel en verwarmingsenergie wordt in de betonconstructie opgeslagen en wanneer nodig aan de ruimte afgegeven. Nadeel van betonkernactivering is dat de reactietijd heel lang is.
- Een klimaatplafond is veelal een metalen plafondconstructie, voorzien van een watervoerend systeem, waarmee d.m.v. straling en convectie kan worden gekoeld of verwarmd. Klimaatplafonds hebben t.o.v. betonkernactivering een lager actief oppervlak, maar door de korte reactietijd kan door een groot temperatuurbereik sprake zijn van hoge vermogens.

Hoge temperatuurkoeling

Hoge temperatuur koeling wordt vaak gecombineerd met een lage temperatuurverwarming. Er wordt gesproken van hoge temperatuurkoeling als de temperatuur van het water hoger is dan 16°C. Hoge temperatuur afgiftesystemen zijn onder andere vloerkoeling/wandkoeling, betonkernactivering en klimaatplafonds. (ISSO, 2015). Hoge temperatuur koeling is niet of minder geschikt voor ontvochtigen.

HR 107 ketel i.c.m. lage temperatuur verwarming

Een centrale verwarmingsketel met een HR107-label heeft een hoog rendement. De HR107-ketel verbrandt aardgas, waarbij rookgassen ontstaan met waterdamp, die warmte bevatten. Deze warmte wordt gedeeltelijk teruggewonnen door middel van condensatie van de waterdamp in de rookgassen (ISSO, 2015). Door deze terugwinning van de warmte stijgt het rendement ten opzichte van andere typen cv-ketels. Een HR107-ketel heeft een modulerende brander met een rendement van ongeveer 95% (bovenwaarde, is het rendement inclusief condensatiewarmte) en 107% (onderwaarde, is het rendement exclusief condensatiewarmte waardoor het hoger dan 100% kan zijn) (RVO, 2017). Bij een HR107-ketel moet het retourwater lager zijn dan 55 °C, anders condenseert de waterdamp in de rookgassen niet. Hoe kouder het retourwater, hoe makkelijker de condensatie en hoe hoger het rendement van de HR107-ketel is (ISSO, 2015).

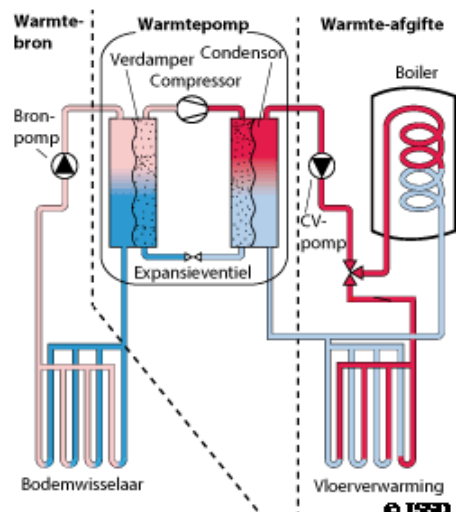
Warmtepomp systemen

Een warmtepomp is een toestel dat warmte van een laag temperatuurniveau op een hoger temperatuur-niveau brengt. Hiervoor dient een relatief kleine hoeveelheid mechanische energie te worden toegevoerd aan de compressor van de warmtepomp. Een systeem met een warmtepomp bestaat uit drie onderdelen: een bron, een warmtepomp en een warmteafgiftesysteem, zie Figuur 8 (ISSO, 2005). Er zijn verschillende soorten bronnen waar warmte aan onttrokken kon worden. Denk hierbij aan ventilatielucht, bodem, grondwater, oppervlaktewater, buitenlucht of restwarmte.

Voor de werking wordt het systeem met een bodemwarmtewisselaar als voorbeeld genomen. Dit systeem heeft samen met de bron grondwater het hoogste rendement. Het bodemwarmtewisselaar systeem bestaat uit verticale bodem-warmtewisselaars en horizontale transport- en verbinding sleiding in de bodem, bedoeld om warmte aan de grond te onttrekken of toe te voeren. Een warmtepomp kan gebruikt worden voor verwarming en koeling (ISSO, 2005):

- Bij verwarming wordt warmte uit de bodem onttrokken en wordt het verwarmde water naar de verdamper van de warmtepomp gestuurd. In de verdamper wordt het water afgekoeld. Hierdoor kan het koude water weer warmte van de omringende bodem onttrekken.
- Bij koeling wordt warmte aan de bodem toegevoerd. Het bodemsysteem is in dit geval verbonden met de condensor van de warmtepomp of direct aan het afgiftesysteem via warmtewisselaars. Het water uit het bodemsysteem wordt door de condensor of door de afgiftesystemen opgewarmd. Dit warme water wordt vervolgens afgegeven aan de omringende bodem.

Een ander soort warmtepompsysteem is een warmtekoelopslag (WKO). In een WKO-systeem zijn er twee putten, één put is voor het warme water en één put voor het koude water. Bij verwarming wordt er warmte gewonnen uit de put met het warme water. Het afgekoelde water wordt vervolgens naar de put met het koude water gevoerd.



Figuur 8 Principe van een warmtepomp met bodemwisselaar (ISSO, 2005)

Het rendement van een warmtepomp wordt uitgedrukt in de Coëfficiënt of Performance (COP). Dit is de verhouding tussen de warmte die nuttig kan worden ingezet en de benodigde elektriciteit om de warmtepomp aan te drijven (De Kleijn Energy Consultant, 2017). Dit opwekkingsrendement ligt in de ordegrrootte van 4 tot 5. De hoeveelheid opgewekte energie – het energiegebruik van de warmtepomp is het aandeel duurzame energie, dat een warmtepomp levert. Warmtepompen met een COP van 7.0 zijn reeds beschikbaar.

Externe warmtelevering

Ook gebiedsmaatregelen kunnen worden gewaardeerd in de BENG-berekeningen (TNO, 2012). Externe warmtelevering is een voorbeeld van een gebiedsmaatregel. Bij externe warmtelevering wordt elders opgewekte warmte afgegeven aan een warmtenet. Gebouwen die aangesloten zijn op het warmtenet kunnen gebruik maken van de externe warmte voor ruimteverwarming of verwarming van warm tapwater. De warmte die gebruikt wordt bij externe warmtelevering kan komen van restwarmte van elektriciteitsproductie of afvalverbrandingsinstallaties. De afgelopen jaren zijn verschillende nieuwe systemen ontwikkeld, zoals kleine warmtenetten die verwarmd worden met warmtepompen, grote warmtenetten die verwarmd worden met geothermie (TNO, 2012).

In de NEN 7120 geldt een forfaitair opwekkingsrendement van 1,0 voor externe warmtelevering (NNI, 2012a). In een kwaliteitsverklaring wordt het officiële rendement weergegeven per warmtenet (RVO, 2013b). Grote warmtenetten zijn meestal gesplitst in een primair net en een aantal daarop aangesloten secundaire netten. Individuele woningen zijn meestal aangesloten op een secundair net. Grotere gebouwen kunnen direct worden aangesloten op het primaire net. Het primaire net heeft een hoger opwekkingsrendement omdat het secundaire net extra distributieverliezen heeft.

In het geval dat er sprake is van een externe warmtelevering, dient het biogene deel van de warmte aan de bruto hernieuwbare energie worden toegevoegd. Het biogene deel van de warmte van een afvalverbrandingsinstallatie is circa 49% (RVO, 2013b). Deze waarde wordt gebruikt bij de berekeningen in Hoofdstuk 4.

Biomassa ketel

Biomassa wordt gezien als een duurzame opwekker. Zeer globaal kan gesteld worden dat biomassa voor 80% duurzaam is (ISSO, 2015). Een biomassaketel verbrandt geen gas- of olie producten, maar biomassa, zoals pellets of houtsnippers. Deze brandstoffen worden opgeslagen en langzaam getransporteerd naar de brander. Door verbranding van de biomassa in de ketel wordt er heet water geproduceerd, dat zorgt voor de verwarming van gebouwen. De benodigde biomassa kan uit de omgeving van het gebouw gehaald worden en zodoende heeft het transport slechts een kleine impact op het milieu. De investering voor een biomassa installatie is hoog, maar de bedrijfskosten meestal laag. De rookgassen zijn minder schoon dan van aardgas. Een biomassaketel vraagt meer onderhoud dan een gasinstallatie. (ISSO, 2015).

De invloed van biomassa als grondstof voor warmteopwekking op het aandeel duurzame energie, zoals bedoeld is in de BENG-wetgeving is nog niet vastgesteld. In de berekening van Hoofdstuk 4 zal 80% van het primaire energiegebruik voor verwarming toegerekend worden bij het bruto hernieuwbare energie.

3.4 Maatregelen om het aandeel duurzame energie te verhogen

Er zijn enkele manieren om de bruto hoeveelheid duurzame energie te verhogen. In Sectie 3.3 zijn echter al twee genoemd: warmtepompsystemen en biomassa-systemen. Andere duurzame opwekkers zijn verschillende systemen voor zonne-energie en windenergie. De volgende maatregelen zijn verder beschikbaar om het aandeel duurzame energie te verhogen.

Fotovoltaïsche panelen op daken (PV-panelen)

PV-panelen worden meestal op het dak van een gebouw geplaatst. Dit heeft te maken met het feit dat hier de minste beschaduwing is. Het vermogen dat een PV-paneel kan leveren hangt af van het type paneel dat wordt gebruikt. PV-panelen van Mono-crystalline silicon hebben het hoogste rendement (Tripathy, Sadhu, & Panda, 2016). De PV-panelen van vijf leveranciers van PV-panelen zijn vergeleken. Het resultaat hiervan was dat het piekvermogen uitgedrukt in Wattpiek (Wp) van de verschillende PV-panelen niet veel verschillen. Het piekvermogen ligt rond de 270 Wp per paneel. Dit geeft 163 Wp/m² (Gout, 2017). Er zijn al PV-panelen beschikbaar met een groter piekvermogen, maar de aanschafwaarde is vaak veel malen hoger.

Building Integrated photovoltaics (BIPV)

Bij hoge gebouwen met een relatief klein dakoppervlak kan het gunstig zijn om ook PV-panelen te plaatsen op de gevels van de gebouwen. Door ook PV-panelen op de gevel te plaatsen kan het oppervlakte PV-panelen sterk toenemen. Shuklaa, Sudhakar & Baredar (2017) hebben een onderzoek gedaan naar de laatste ontwikkelingen op het gebied van Building Integrated Photovoltaics (BIPV's). Volgens hen zijn er vijf verschillende soorten BIPV's: BIPV folie producten, BIPV tegel producten, BIPV module producten, BIPV zonnecel beglazing en Building Attached PhotoVoltaics (BAPV's). Folie- en tegel BIPV's worden niet veel gebruikt in de utiliteitsbouw en worden in dit onderzoek verder buiten beschouwing gelaten.

BIPV in transparante delen van de gevel

Het is ook mogelijk om om elektriciteit op te wekken met transparante delen. Transparant PV-glas laat zichtbaar licht door, terwijl ultraviolette straling wordt gereflecteerd door organische moleculen naar de zijkant van het raam. Daar bevinden zich zonnecellen die het licht omzetten in elektriciteit. De werking BIPV in transparante delen is nog in ontwikkeling. Er zijn echter al bedrijven die BIPV in transparante delen leveren. Het rendement van de PV-glas ligt ongeveer 2,5 keer zo laag als bij traditionele PV-panelen (Duurzaam MKB, 2017). Gebaseerd op het vermogen gegeven bij Sectie Photovoltaic op daken, komt het vermogen van PV in transparante delen dan uit op ongeveer 65,2 Wp/m². De prijs van dit type BIPV's is echter hoog, omdat het op maat gemaakt moet worden.

BIPV gevel producten

PV-panelen kunnen ook op de gevel van een gebouw geplaatst worden, zie Figuur 9. De PV-panelen worden verticaal tegen de gevel aan geplaatst. Het nadeel van dit systeem is dat de PV-panelen meer last hebben van beschaduwing. Er zijn verschillende leveranciers voor façade-PV's. Een piekvermogen van 120 Wp/m² kan behaald worden (Shuklaa, Sudhakar, & Baredar, 2017).

Zigzaggend PV-systeem voor gevels

Heijmans en Wallvision hebben een zigzaggend PV-systeem ontwikkeld, dat toepasbaar is voor op de gevel (Heijmans, 2017). Op de bovenkant van het systeem liggen standaard PV-cellen en aan de zijkant begeeft zich de gevelafwerking, zoals te zien is in Figuur 10. De schuine delen van het zigzaggend systeem reflecteren licht op de PV-panelen. Dit verhoogt de opbrengst tot wel 126%. Dankzij deze reflectie werkt zigzag solar ook efficiënt bij laagstaande zon. In tegenstelling tot de klassieke PV-panelen die juist dan minder energie leveren.



Figuur 9 BIPV gevel system (PolySolar, 2017)



Figuur 10 Zigzag solar system (Heijmans, 2017)

Windenergie

Naast zonne-energie is het ook mogelijk om windenergie te gebruiken. Urban wind turbines (UWT's) zijn kleine windmolens op daken. Deze windmolens zijn er in verschillende soorten en maten. Het vermogen van een UWT kan oplopen tot 3.0 kW (Cace, et al., 2007). De opbrengst is afhankelijk van de hoeveelheid wind op de locatie. De opbrengst per m² draaicirkel van een UWT is vele maler kleiner dan bij een grote windmolen. Dit wordt veroorzaakt door de bebouwing bij de UWT's. Voordeel van windenergie ten opzichte van zonne-energie is dat windenergie ook 's nachts beschikbaar is. Nadeel is echter het geluid geproduceerd door de turbine, de slagschaduw en de horizonvervuiling. De technologie bevindt zich aan het begin van de leercurve. Hierdoor is de efficiency nog te laag en zijn de kosten hoog (RenCom, 2010).

Elektriciteitsopwekking op gebiedsmaatregelen

De definitie van een BENG stelt dat de benodigde energie van een gebouw "in zeer aanzienlijke mate geleverd dient te worden uit plaatselijk of dichtbij gelegen hernieuwbare bronnen". Gebiedsmaatregelen sluiten aan bij het onderdeel "dichtbij gelegen". Voor elektriciteitsopwekking op gebiedsniveau mag de afstand tussen de collectieve elektriciteitsopwekking en het aangesloten perceel vooralsnog niet meer dan 10 km bedragen (Harmelink, 2015). Voorbeelden van elektriciteitsopwekking op gebiedsmaatregelen zijn PV-panelen of windmolens.

3.5 Conclusie

In dit hoofdstuk zijn enkele maatregelen weergegeven die invloed hebben op de BENG-indicatoren, zie Tabel 8. Zoals eerder vermeld kan een maatregel invloed hebben op meerdere indicatoren. Niet alle mogelijke maatregelen zijn onderzocht. Daarnaast zijn er enkele maatregelen die niet gemodelleerd kunnen worden. De exacte energieopwekking bij windenergie is niet beschikbaar en het is niet duidelijk wat de invloed is van BIPV in glas op de warmtewinst in het gebouw. Derhalve zullen deze maatregelen niet bekeken worden in Hoofdstuk 4.

Tabel 8 Invloed maatregelen op BENG-indicatoren

	Energiebehoefte	Primair energiegebruik	Aandeel duurzaam energie
Sectie 3.2			
Goed geïsoleerde begane grond vloer, daken en gevel	X	X	
Ramen en deuren met lage U-waarde	X	X	
Zonwering	X	X	
Window to wall ratio	X	X	
Laag vermogen verlichting	X	X	
Verlichtingsregelingen	X	X	
Warmteterugwinning	X	X	
Luchtdicht bouwen	X	X	
Ventilatieregelingen	X	X	
Sectie 3.3			
Lage temperatuur verwarming		X	
Hoge temperatuur koeling		X	
Externe warmtelevering		X	X
Biomassa ketel		X	X
Sectie 3.4			
PV-panelen op daken		X	X
BIPV in transparante delen van de gevel		X	X
BIPV in dichte delen van de gevel		X	X
BIPV in dichte delen van de gevel		X	X
Zigzaggend PV systeem voor gevels		X	X
Windenergie		X	X
Elektriciteitsopwekking op gebiedsniveau		X	X

Hoofdstuk 4: Invloed van de maatregelen

In Hoofdstuk 3 zijn lijsten met maatregelen geïntroduceerd om de BENG-indicatoren te beïnvloeden. De invloed van deze maatregelen zal bekeken worden in verschillende cases. In Sectie 4.1 worden deze cases beschreven. In Sectie 4.2 worden de eisen en wensen voor de cases bepaald. Het ontwerp van een gebouw moet voldoen aan verschillende wetten en normen. Daarnaast zijn er ook specifieke eisen en wensen van de opdrachtgever. Deze factoren moeten in beschouwing worden genomen bij de keuze van de maatregelen per case. In Sectie 4.3 wordt de invloed voor individuele maatregelen weergegeven. De invloed zal worden vergeleken met de nul-situatie. In Sectie 4.4 worden verschillende maatregelen gecombineerd om ervoor te zorgen dat de gebouwen voldoen aan de BENG-wetgeving.

4.1 Introductie

Voor dit onderzoek worden drie cases onderzocht: het Montessori College, Campus het Bildt en het Koningsberger gebouw. Dit zijn twee middelbare scholen en één WO-instelling. Data voor een basisschool was niet beschikbaar. Een overzicht van de bouwkundige en installatietechnische gegevens van de gebouwen is weergegeven in Bijlage C. De cases worden hieronder summier beschreven.

Montessori college

Dit project is geleverd voor het Montessori College in Nijmegen. Het college bestaat uit twee gebouwen, gebouw A en gebouw BC. Het project is afgerond in 2015. Valstar Simonis heeft voor dit college het installatietechnische ontwerp gemaakt. Het ontwerp is gemaakt voor twee gebouwen, die ruimte moeten bieden voor 1300 studenten en 130 docenten

In gebouw A is er ruimte voor klaslokalen en een sportzaal. Het gebouw bestaat uit drie bouwlagen. Gebouw BC heeft klaslokalen, enkele bijeenkomstruimten en een sporthal. Het gebouw bevat vier split level bouwlagen. Onder dit gebouw is een parkeergarage gevestigd. Gebouwen A en BC hebben dezelfde bouwtechnische en installatietechnische eigenschappen, alleen de afmetingen, vorm en oriëntatie verschillen. Gebouw A en gebouw BC hebben respectievelijk een gebruiksoppervlak van 3487 m² en 8192 m². Zie Tabel C.1 in Bijlage C.

Het Bildt

In 2014 heeft Valstar Simonis voor Campus het Bildt een installatietechnisch ontwerp opgesteld. Het Bildt is een middelbare school in Sint Annaparochie. De onderwijscampus biedt ruimte voor leerlingen van het middelbaar onderwijs (VMBO, HAVO en onderbouw Atheneum). Het gebouw omvat twee bouwlagen en heeft een totaal gebruiksoppervlak van 5333 m². Zie Tabel C.2 in Bijlage C.

Het Koningsberger gebouw

Het Koningsberger gebouw is een gebouw van de Universiteit Utrecht. Het definitieve ontwerp was klaar in 2012 en het gebouw is in 2015 opgeleverd. Het gebouw wordt gebruikt voor de faculteiten bewegingswetenschappen en geowetenschappen. Het ontwerp bestaat uit twee gedeelten, een toren van zeven verdiepingen met boven in practicumruimten en onderin studiemogelijkheden. Aangrenzend is nog een gedeelte van twee verdiepingen, hierin bevinden zich bijeenkomstruimten, collegezalen en leslokalen. Het totale gebruiksoppervlak is 10.436 m². Het Koningsberger gebouw is aangesloten op het naastgelegen Minnaert gebouw. Op de campus van de universiteit Utrecht is een warmte- en koudenet beschikbaar. Zie Tabel C.3 in Bijlage C.

4.2 Eisen en wensen aan onderwijsgebouwen

Bij het ontwerpen van gebouwen moet rekening gehouden worden met eisen en wensen van verschillende stakeholders. Dit onderzoek is een casestudie en er wordt naar maatregelen gezocht om in toekomstige projecten te voldoen aan de BENG-wetgeving. De specifieke eisen en wensen

verschillen per case. Dit is de reden waarom er niet gekeken wordt naar specifieke eisen of wensen, maar meer naar eisen en wensen die gelden voor (bijna) alle onderwijsgebouwen. Voor de eisen met betrekking tot bouwtechnische aspecten zal gekeken worden naar het Bouwbesluit (Bouwbesluit, 2012). Voor de eisen en wensen met betrekking tot comfort zal worden gekeken naar het programma van eisen van Frisse Scholen (RVO, 2008). Verder zijn er ook nog praktische eisen en wensen die in beschouwing moeten worden genomen.

Bouwbesluit

In het bouwbesluit staan bouwtechnische voorschriften waar alle bouwwerken in Nederland aan moeten voldoen. Het Nederlands Bouwbesluit bevat voorschriften met betrekking tot het bouwen van bouwwerken uit het oogpunt van veiligheid, gezondheid, bruikbaarheid, energiezuinigheid en milieu (Bouwbesluit, 2012). Voor dit onderzoek wordt vooral gekeken naar de eisen met betrekking tot energiezuinigheid. Zo voldoet in alle cases de warmteweerstand nog niet aan de nieuwe eisen van het Bouwbesluit. Bij het toepassen van nieuwe maatregelen in de cases zal altijd rekening moeten worden gehouden met de eisen van het Bouwbesluit. De eisen van het Bouwbesluit zijn weergegeven in Tabel D.1 in Bijlage D. In deze tabel worden alleen de onderdelen benoemd die invloed hebben op de keuze van maatregelen, genoemd in Hoofdstuk 3.

Eisen Frisse scholen

Montessori College heeft als doel om Frisse scholen klasse C (acceptabel) te halen. Campus het Bildt en het Koningsberger gebouw willen zelfs Frisse scholen klasse B (goed) halen. Een Frisse School is een onderwijsgebouw met een goed binnenmilieu en een lage energierekening. Hierbij wordt gekeken naar vijf aspecten: energie, binnen luchtkwaliteit, thermisch comfort, visueel comfort en akoestisch comfort (RVO, 2008). Zo moet de verlichting voldoen aan enkele comfort eisen. Deze eisen zijn meegenomen in de lichtplannen die zijn weergegeven in Bijlage B. De eisen van Frisse Scholen Klasse C zijn soms beneden de wettelijke eis. In dat geval moet de wettelijke eis aangehouden worden. De eisen voor Frisse Scholen zijn te vinden in Tabel D.2 in Bijlage D.

Overige eisen en wensen

Tenslotte zijn er ook nog praktische eisen en wensen. Zo is het niet wenselijk om beschaduwing op de PV-panelen te hebben. Het is daarom niet mogelijk om het hele platte dak vol te leggen met PV-panelen. De rijen PV-panelen zorgen voor een schaduw. Als de PV-panelen een hoogte hebben van 1,0 meter is de afstand tussen twee rijen PV-panelen is 3,07 meter (Zonnepanelen.net, 2017). Dit betekent dat de maximale hoeveelheid PV-panelen op het dak 32,5% van het dakoppervlak is. De maximale hoeveelheid PV-panelen op het dak is voor:

- Montessori A: 549 m²
- Montessori BC: 855 m²
- Het Bildt: 974 m²
- Koningsberger: 701 m²

PV-panelen op het geveloppervlak kunnen ook hinder ondervinden van beschaduwing. Deze beschaduwing kan ontstaan door omliggende gebouwen of objecten. Hiervoor wordt aangenomen dat het mogelijk is om 70% van het geveloppervlak te bedekken met PV-panelen zonder last te hebben van beschaduwing.

4.3 Invloed van individuele maatregelen

Om de invloed van individuele maatregelen te bepalen is allereerst een nul-situatie gemodelleerd in het EPG-programma Uniec. Deze nul-situatie bestaat uit het huidige ontwerp van het gebouw. Gegevens van dit ontwerp zijn weergegeven in Bijlage C. Bij gebrek aan data zijn er enkele aannames gemaakt. De aannames zijn gemaakt in overleg met een expert. Het vermogen van de ventilatoren was

bijvoorbeeld niet bekend voor het Bildt en het Montessori College. Uitgaande van een standaard druk en rendement kon uit de benodigde hoeveelheid luchttoevoer het vermogen worden berekend. Bij andere onbekende data is gekozen voor het toepassen van een forfaitaire waarde. Deze forfaitaire waarde is vaak ongunstig voor de berekening van de energieprestatie indicatoren.

Nu de nul-situatie is ingevoerd, zal er worden gekeken naar de individuele invloed van de maatregelen. Eén voor één worden de maatregelen toegevoegd aan de vier gebouwen uit de cases. Per case en per maatregel wordt er gekeken naar de invloed van de maatregel op de BENG-indicatoren, door ze te vergelijken met de BENG-indicatoren van de nul-situatie. De maatregelen worden gevarieerd om de gevoeligheid van de maatregel te analyseren. Het resultaat is weergegeven in grafieken in Bijlage E. De volgende maatregelen worden bekeken:

- Luchtdicht bouwen
- R_c -waarde niet transparante delen verhogen
- U -waarde transparante delen verlagen
- Vermogen van de verlichting verlagen
- Verschillende lichtregelingen
- Warmteterugwinning toepassen
- Zonwering toepassen
- Window to wall ratio aanpassen voor alle oriëntaties
- Sturing van de ventilatie veranderen
- Warmteopwekker veranderen
- PV-panelen op het dakoppervlak toepassen
- PV-panelen op het geveloppervlak toepassen

Resultaat

De luchtdichtheid van een gebouw heeft grote invloed op de energiebehoefte en het primair energiegebruik. Hoe lager de q_{v10} -waarde, des te lager de energiebehoefte en het primaire energiegebruik. Beide Montessori gebouwen en Campus het Bildt hebben al een lage q_{v10} -waarde, de besparing was daarom niet significant. Bij het Koningsberger gebouw was echter wel een forse daling te zien door het verlagen van de q_{v10} -waarde. Zie Figuur E.1 en E.2 in Bijlage E.

Warmteterugwinning is één van de belangrijkste maatregelen om de energiebehoefte en het primaire energiegebruik te verlagen. In alle gebouwen was al WTW van ongeveer 70% toegepast. Een verhoging van de WTW naar 90% leidt tot een significante daling van de energiebehoefte en het primaire energiegebruik. Zie Figuur E.3 en E.4 in Bijlage E.

Transmissieverlies kan voorkomen worden door het verhogen van de R_c -waarden van de niet-transparante gevel delen en het verlagen van de U -waarde van de transparante delen. Het verhogen van de R_c -waarde naar $10 \text{ m}^2\text{K/W}$ had een sterke daling van de energiebehoefte en het primaire energiegebruik tot gevolg. Ook de toepassing van beter geïsoleerd glas zorgt voor een daling van de energiebehoefte en het primaire energiegebruik. Zie Figuur E.5 E.6, E.7 en E.8 in Bijlage E.

Voor de g -waarde is niet een éénduidige trend te zien. De invloed van de verandering van de g -waarde op de energiebehoefte en primair energiegebruik was niet significant. Zie Figuur E.9 en E.10 in Bijlage E.

De warmtewinst kan geregeld worden door middel van zonwering. Automatische zonwering heeft een grotere invloed op de energiebehoefte en het primair energiegebruik dan handmatige zonwering. Het toepassen van automatische zonwering heeft een verlaging van de energiebehoefte en het primaire energiegebruik tot gevolg. Zie Figuur E.11 en E.12 in Bijlage E.

Voor vier oriëntaties is de invloed van het glasoppervlak bepaald. Over het algemeen geldt dat des te lager de WWR, des te lager de energiebehoefte en het primaire energieverbruik. In enkele gevallen was een hogere WWR gewenst. De invloed van de hoeveelheid glasoppervlak is niet significant. Opvallend was dat niet de zuidgevel het meest gevoelig was voor de hoeveelheid glas, maar de noordgevel. Zie Figuur E.13 t/m E.20 in Bijlage E.

Het vermogen van de verlichting kan ook sterk verlaagd worden door het toepassen van LED-verlichting. Er is gekozen om te rekenen met een vermogen lager dan het berekende lichtvermogen om twee redenen: in de lichtplannen van Bijlage B is er gerekend met de lux-eisen van klaslokalen en gymzalen. Overige ruimten, zoals gangen en technische ruimten, hebben lagere eisen voor de verlichtingssterkte. Daarnaast maakt LED-verlichting een sterke ontwikkeling door. Deze verlaging van het vermogen zorgt voor een daling van de energiebehoefte en het primaire energieverbruik. Met name het primaire energieverbruik neemt sterk af door deze maatregel. Zie Figuur E.21 en E.22 in Bijlage E.

Een veegpulsschakeling in combinatie met een daglichtschakeling en aanwezigheidsdetectie levert van de verlichtingsregelingen de grootste besparing op. Het Bildt en Het Koningsberger gebouw hadden deze combinatie al. Bij de Montessori gebouwen was alleen daglichtschakeling en aanwezigheidsdetectie. Toevoeging van de veegpulsschakeling leverde nog een kleine reductie op van de energiebehoefte en de het primair energieverbruik van verlichting. Zie Figuur E.23 en E.24 in Bijlage E.

De sturing van de ventilatie bepaalt wanneer geventileerd moet worden. Verandering van sturing heeft significante gevolgen voor de energiebehoefte en het primaire energieverbruik. Ventilatiesturing D5a, gebalanceerde ventilatie met CO₂-sturing en zonering in 2 of meer ruimten, heeft de beste invloed op de energiebehoefte en het primair energieverbruik. Het Bildt en beide Montessori gebouwen hebben al sturing D5a. Verandering van sturing zorgt in die cases voor een sterke stijging van de energiebehoefte en het primair energieverbruik. Het Koningsberger gebouw heeft ventilatiesturing D3: CO₂ sturing alleen afvoer. Hier was een sterke daling van de energiebehoefte en het primaire energieverbruik te zien bij het toepassen van sturing D5a. Het toepassen van sturing D1 zorgt voor een grote verhoging van de energiebehoefte en het primair energieverbruik. Dit heeft er mee te maken dat hier geen WTW mogelijk is. Zie Figuur E.25 en E.26 in Bijlage E.

Er zijn vier verschillende warmte-opwekkers vergeleken: een HR107-ketel, een warmtepomp met een COP van 5,0, een biomassa ketel met een duurzaam aandeel van 80% en externe warmtelevering, waarvan 49% duurzaam geleverd. Externe warmtelevering is alleen toepasbaar bij het Koningsberger gebouw. De HR107-ketel scoorde het slechtst van deze vier. De HR107-ketel levert geen bijdrage aan de bruto hoeveelheid duurzame energie en zorgt voor een hoger primair energieverbruik in vergelijking met de andere drie warmte-opwekkers. De warmtepomp scoorde het beste. Het zorgde voor de grootste reductie van het primaire energieverbruik en de grootste stijging van het aandeel duurzame energie. Hoe hoger het rendement van de warmtepomp, hoe lager het primaire energieverbruik en hoger het aandeel duurzame energie. Zie Figuur E.27 E.28, E.29 en E.30 in Bijlage E.

Ook het type warmte-afgiftesysteem heeft invloed op de energiebehoefte en het primair energieverbruik. Vloerverwarming en de stralingspanelen scoren hetzelfde voor energiebehoefte en primair energieverbruik. Het toepassen van betonkernactivering heeft de beste invloed op de energiebehoefte en het primair energieverbruik. Dit heeft te maken met het feit dat de vloer zwaarder is dan in de andere situaties. Zie Figuur E.31 en E.32 in Bijlage E.

Het toepassen van PV-panelen heeft een grote invloed op het primaire energieverbruik en het aandeel duurzame energie. Er is gekeken naar het toepassen van PV-panelen op het dak en PV-panelen op de gevel. Bij het toepassen van PV-panelen op 30% van het dakoppervlak neemt het primaire energieverbruik sterk af en het aandeel duurzame energie sterk toe. Hoe lager de

gebruiksoppervlak/dakoppervlak-ratio, hoe groter de invloed van de PV panelen. Ook de toepassing van PV-panelen op de gevel zorgt voor een sterkte daling van het primair energiegebruik en een stijging van het aandeel duurzame energie. Het rendement van de gevelpanelen is lager dan het rendement van de PV-panelen die op het dak zijn geplaatst. Dit heeft te maken met de oriëntatie, lager vermogen en de mindere ventilatie van de panelen. Zie Figuur E.33, E.34, E.35 en E.36 in Bijlage E.

4.4 Invloed van combinaties van maatregelen

Om te voldoen aan de BENG-eisen zullen de maatregelen gecombineerd worden. Hiervoor worden de volgende stappen genomen:

- De maatregelen worden gecombineerd tot maatregelpakketten per BENG-indicator. De opbouw van de maatregelpakketten zijn weergegeven in Sectie 4.4.1, 4.4.3 en 4.4.5 voor respectievelijk de energiebehoefte, het primair energiegebruik en het aandeel duurzame energie.
- Vervolgens worden de maatregelpakketten zo gecombineerd dat per gebouw voldaan wordt aan een specifieke BENG-eis (maximale energiebehoefte, maximaal primair energiegebruik en minimaal aandeel duurzame energie). Deze combinaties van maatregelpakketten zijn weergegeven in Sectie 4.4.2, 4.4.4 en 4.4.6 voor respectievelijk de eis voor energiebehoefte, eis voor primair energiegebruik en eis voor aandeel van duurzame energie. Dit zijn deeloplossingen.
- Ten slotte worden de deeloplossingen gecombineerd, zodat het gebouw voldoet aan alle drie de BENG-eisen. Deze eindoplossingen worden weergegeven in Sectie 4.4.7.

4.4.1. Maatregel-pakketten om de energiebehoefte te beperken

Zoals bepaald is in Hoofdstuk 2 zijn voor onderwijsgebouwen de verwarmingsbehoefte en energiegebruik voor verlichting de grootste posten van de energiebehoefte. Warmtebehoefte is van twee onderdelen afhankelijk: warmtewinst en warmteverlies. Warmteverlies geschiedt op drie manieren: door transmissie, infiltratie en ventilatie. Warmtewinst bestaat uit de interne warmteproductie en de zonnewarmtewinst. Het energiegebruik voor verlichting wordt bepaald door het vermogen van de verlichting, het aantal branduren en de verlichtingsregelingen. Er worden vier maatregel pakketten opgesteld.

Maatregelpakket Energiebehoefte 1 (EB1) : Voorkomen van warmteverlies door ventilatie en infiltratie

Dit pakket zorgt er voor dat zo min mogelijk lucht gekoeld of verwarmd hoeft te worden. Er komt op twee manieren lucht binnen bij een gebouw, ventilatie en infiltratie. Infiltratie zal worden beperkt door het verhogen van de luchtdichtheid van het gebouw. Bij ventilatie zal alleen lucht worden toegevoerd wanneer het nodig is en als lucht wordt toegevoerd, wordt zoveel mogelijk warmte uitgewisseld met de afvoerlucht. De onderdelen van dit pakket zijn weergegeven in Tabel 9.

Maatregelpakket Energiebehoefte 2 (EB2): Voorkomen van warmteverlies door transmissie

Transmissie is één van de manieren om warmte te verliezen. Ook de koelingsbehoefte is afhankelijk van de mate van transmissie. Door het verhogen van de warmteweerstand van de thermische schil kunnen transmissieverliezen tegengegaan worden. De thermische schil bestaat uit de begane grond vloer, de gevel, het dak en de transparante delen. De warmteweerstand van de dichte delen kan verhoogd worden door meer of betere isolatie toe te passen. Voor de transparante delen kan de warmteweerstand worden verhoogd door glas te kiezen met een lagere U-waarde. Aangezien vierdubbelglas nog nauwelijks wordt gebruikt, wordt er in dit pakket gekozen voor driedubbel glas. De onderdelen van dit pakket zijn weergegeven in Tabel 9.

Maatregelpakket Energiebehoefte 3 (EB3): Efficiënte verlichting i.c.m. regeling

Het energiegebruik voor verlichting is ook een grote post in de energiebehoefte van een onderwijsgebouw. Om de post te verlagen zal energiezuinige verlichting worden toegepast met een efficiënte verlichtingsregeling. In Bijlage B zijn lichtplannen weergegeven voor referentie lokalen, collegezalen en sporthallen. Hierin is LED-verlichting toegepast. Verwacht wordt dat het vermogen per vierkante meter nog verder naar beneden kan in. Dit heeft er mee te maken dat andere ruimten, zoals gangen en technische ruimten lagere eisen hebben voor de verlichting. Daarnaast maakt de LED-verlichting een stormachtige ontwikkeling door. Het vermogen van de LED-verlichting is $4,0 \text{ W/m}^2$ voor onderwijsruimten, $6,0 \text{ W/m}^2$ voor sporthallen, $5,0 \text{ W/m}^2$ voor collegezalen en $9,0 \text{ W/m}^2$ voor practicumlokalen. De onderdelen van dit pakket zijn weergegeven in Tabel 9.

Maatregelpakket Energiebehoefte 4 (EB4): Regelen warmtewinst

Warmtewinst is in de zomer nadelig, maar voordelig in het stookseizoen. Door middel van automatische zonwering kan warmte worden toegelaten indien nodig en tegen worden gehouden indien dit niet gewenst is. De onderdelen van dit pakket zijn weergegeven in Tabel 9.

Tabel 9 Onderdelen pakketten energiebehoefte

Pakket Energiebehoefte 1 (EB1)	Pakket Energiebehoefte 2 (EB2)	Pakket Energiebehoefte 3 (EB3)	Pakket Energiebehoefte 4 (EB4)
D5a ventilatiesturing: CO ₂ sturing voor twee of meer zones	R _c -waarden van 10 m ² K/W voor gevel, begane grond vloer en dak	LED-verlichting	Automatische zonwering
Hoge luchtdichtheid: q _{v10} waarde van 0,15 dm ³ /s.m ²	Driedubbel glas U-waarde van 0,7 W/m ² K incl. kozijn	Veegpulsschakeling, daglichtschakeling en aanwezigheidsdetectie	
WTW van 90%			

De invloed van de individuele pakketten op de energiebehoefte is weergegeven in Figuur F.1 van Bijlage F.

4.4.2 Deeloplossingen energiebehoefte

De gebouwen in de cases voldoen allemaal nog niet aan de eis voor de energiebehoefte. De gebouwen hebben de volgende reducties nodig om te voldoen:

- Montessori A: 15,1 kWh/m² GO per jaar
- Montessori BC: 4,4 kWh/m² GO per jaar
- Het Bildt: 1,9 kWh/m² GO per jaar
- Koningsberger: 51,1 kWh/m² GO per jaar

De pakketten zijn gecombineerd om te kijken welke combinaties van pakketten mogelijk zijn om de te voldoen aan de BENG-eis voor energiebehoefte ($\leq 50 \text{ kWh/m}^2 \text{ GO per jaar}$). In Tabel 10 zijn de benodigde combinaties van pakketten weergegeven om te voldoen aan de BENG-eis voor energiebehoefte. Dit zijn de minimaal benodigde maatregelpakketten. Het toevoegen van een extra pakket zorgt voor een nog grotere reductie van de energiebehoefte.

Tabel 9 Benodigde combinaties aan pakketten om te voldoen aan de BENG-eis voor energiebehoefte

Gebouw	Deeloplossing energiebehoefte 1 (EB 1)	Deeloplossing energiebehoefte 2 (EB 2)	Deeloplossing energiebehoefte 3 (EB 3)	Deeloplossing energiebehoefte 4 (EB 4)
Montessori A	Pakket EB 2 Pakket EB 3 Pakket EB 4			
Montessori BC	Pakket EB 1 (+ Voldoen eisen thermische schil)	Pakket EB 2 Pakket EB 4	Pakket EB 3 (+ Voldoen eisen thermische schil)	
Het Bildt	Pakket EB 1 (+ Voldoen eisen thermische schil)	Pakket EB 2	Pakket EB 3 (+ Voldoen eisen thermische schil)	Pakket EB 4 (+ Voldoen eisen thermische schil)
Koningsberger	Pakket EB 1 Pakket EB 2 Pakket EB 3 Pakket EB 4			

In Tabel F.1 t/m F.4 in Bijlage F zijn de BENG-indicatoren weergegeven bij deze deeloplossingen. Deze deeloplossingen zorgen er niet voor dat de BENG-eisen voor het primair energiegebruik en het aandeel duurzame energie ook worden gehaald.

4.4.3 Maatregel-pakketten om het primaire energiegebruik te beperken

Zoals bepaald is in Hoofdstuk 2 zijn voor onderwijsgebouwen het primaire energiegebruik van verlichting, ventilatie en verwarming de grootste posten voor het totale primaire energiegebruik. Het primair energiegebruik voor verwarming afhankelijk is van de warmtebehoefte, hulpenergie, duurzaam opgewekte energie voor verwarming en het opwekkings-, het distributie- en het afgifterendement. Het primair energiegebruik voor ventilatie is afhankelijk van de hoeveel te verplaatsen lucht en het geïnstalleerde vermogen. Daarnaast kan de opwekking van duurzame energie het primaire energiegebruik reduceren. In dit onderzoek is niet gekeken naar een ventilatiesysteem met een hoger rendement. De volgende pakketten zijn opgesteld:

Pakket primair energiegebruik 1 (PE1): Warmtebehoefte beperken

In dit pakket wordt de totale warmtebehoefte beperkt. Warmteverlies door infiltratie, ventilatie en transmissie wordt tegen gegaan. Ook wordt de zontoetreding geregeld. De onderdelen van dit pakket zijn weergegeven in Tabel 10.

Pakket primair energiegebruik 2 (PE2): Efficiënte verlichting i.c.m. regelingen

Dit pakket komt overeen met pakket energiebehoefte 3. Dit pakket zal een grotere invloed hebben op het primair energiegebruik dan op de energiebehoefte. Dit heeft te maken met de energiefactor 2,56 waar mee gerekend moet worden. Deze factor wordt gebruikt om rekening te houden met het opwekkingsrendement van elektriciteit van 39%. De onderdelen van dit pakket zijn weergegeven in Tabel 10.

Pakket primair energiegebruik 3 (PE3): Efficiënte warmteopwekking

Dit pakket verhoogt het rendement van de warmte-opwekking. Uit Sectie 4.2 volgt dat een warmtepomp met een COP van 5,0 voor de grootste reductie zorgt van het primair energiegebruik. Betonkernactivering scoorde het best van de warmteafgiftesystemen. Hier zal gebruik van gemaakt worden in combinatie met LTV en HTK. %. De onderdelen van dit pakket zijn weergegeven in Tabel 10.

Pakket primair energiegebruik 4 (PE4): PV-panelen op 30% van dakoppervlak

Hernieuwbare energie verlaagt het primaire energiegebruik. Uit Sectie 4.2 volgt dat PV-panelen op daken een hogere opbrengst hebben dan PV-panelen op de gevel. Door schaduwen is het mogelijk om maximaal 32% van het dakoppervlak te bedekken met PV-panelen. Aangezien nog meer onderdelen zich op het dak begeven, wordt er in dit pakket uitgegaan van 30%.

Pakket primaire energiegebruik 5 (PE5): PV-panelen op 70% van het gesloten geveloppervlak op het zuiden, oosten en westen.

Mocht er niet genoeg ruimte zijn op het dakoppervlak is het ook mogelijk om PV-panelen op het geveloppervlak te plaatsen. Niet elke plek op de gevel is geschikt voor PV-panelen. Op laag gelegen gebieden kan beschaduwing de opbrengst van de PV-panelen reduceren. In dit pakket wordt uitgegaan dat op 70% van het geveloppervlak op het zuiden, oosten en westen PV-panelen kunnen worden geplaatst.

Pakket primair energiegebruik 6 (PE6): Gebiedsmaatregelen

Zoals vermeld is in Hoofdstuk 3 is het ook mogelijk om gebiedsmaatregelen te treffen. Het primair energiegebruik kan verlaagd worden door hernieuwbare energie binnen 10 km van het gebouw op te wekken. Dit pakket wordt alleen gebruikt, indien het niet mogelijk is om aan de eis te voldoen met de overige pakketten. Het is niet mogelijk om de BENG-indicatoren te bepalen als dit pakket gebruikt wordt, omdat de hoeveelheid energie die opgewekt wordt, sterk kan variëren.

Tabel 10 Onderdelen pakketten primair energiegebruik

Pakket Primair energie gebruik 1 (PE1)	Pakket Primair energie gebruik 2 (PE2)	Pakket Primair energie gebruik 3 (PE3)	Pakket Primair energie gebruik 4 (PE4)	Pakket Primair energie gebruik 5 (PE5)	Pakket Primair energie gebruik 6 (PE6)
Pakket EB 1	Pakket EB 3	Warmtepomp bodem water/water met een COP van 5.0	PV-panelen op 30% van het dakoppervlak	PV-panelen op 70% van het dakoppervlak	Energie opwekking door gebiedsmaatregelen
Pakket EB 2		HTK en LTV			
Pakket EB 4		Betonkern-activering			

De invloed van de individuele pakketten op het primair energiegebruik is weergegeven in Figuur F.2 van Bijlage F.

4.4.4 Resultaten van de maatregel-pakketten primair energiegebruik

De gebouwen in de cases voldoen allemaal nog niet aan de eis voor het primair energiegebruik. De gebouwen hebben de volgende reducties nodig om te voldoen:

- Montessori A: 80,2 kWh/m² GO per jaar
- Montessori BC: 67,8 kWh/m² GO per jaar
- Het Bildt: 77,0 kWh/m² GO per jaar
- Koningsberger: 91,9 kWh/m² GO per jaar

De pakketten zijn gecombineerd om te kijken welke combinaties van pakketten mogelijk zijn om de te voldoen aan de BENG-eis voor energiebehoefte (≤ 60 kWh/m² GO per jaar). In Tabel 11 zijn de benodigde combinaties van pakketten weergegeven om te voldoen aan de BENG-eis voor het primair

energie gebruik. Dit zijn de minimaal benodigde maatregelpakketten om te voldoen aan de BENG-eis voor het primair energiegebruik.

Tabel 11 Benodigde combinaties aan pakketten om te voldoen aan de BENG-eis voor het primair energiegebruik

Gebouw	Deeloplossing Primair energiegebruik 1	Deeloplossing Primair energiegebruik 2	Deeloplossing Primair energiegebruik 3	Deeloplossing Primair energiegebruik 4
Montessori A	Pakket PE 1 Pakket PE 2 Pakket PE 3 Pakket PE 5	Pakket PE 2 Pakket PE 4 (+ Voldoen eisen thermische schil)	Pakket PE 4 Pakket PE 5 (+ Voldoen eisen thermische schil)	
Montessori BC	Pakket PE 1 Pakket PE 2 Pakket PE 3 Pakket PE 5	Pakket PE 1 Pakket PE 4	Pakket PE2 Pakket PE 4 (+ Voldoen eisen thermische schil)	Pakket PE 4 Pakket PE 5
Het Bildt	Pakket PE 1 Pakket PE 4	Pakket PE 2 Pakket PE4 (+ Voldoen eisen thermische schil)	Pakket PE 4 Pakket PE 5 (+ Voldoen eisen thermische schil)	
Koningsberger	Pakket 6 is benodigd om de eis te halen			

In Tabel F.5 t/m F.7 in Bijlage F zijn de BENG-indicatoren weergegeven bij deze deeloplossingen. Voor het Koningsberger gebouw is het niet mogelijk om de BENG-indicatoren te bepalen, omdat voor deze deeloplossing gebiedsmaatregelen nodig zijn.

4.4.5 Maatregelpakketten om het aandeel duurzame energie te verhogen

De pakketten voor duurzame energie komen overeen met de pakketten voor het primair energie gebruik. Het aandeel duurzame energie bestaat uit twee onderdelen: bruto hernieuwbare energie en het primaire energie gebruik. Een afname van het primair energiegebruik zorgt voor een toename van het aandeel energie. De hoeveelheid bruto hernieuwbare energie heeft een positieve invloed op het aandeel duurzame energie en stijgt door het gebruik van duurzame bronnen. In Figuur F.3 in Bijlage F is de invloed van de individuele pakketten weergegeven op het aandeel duurzame energie.

4.4.6 Resultaten van de maatregel-pakketten voor het aandeel duurzame energie

Het pakket primair energiegebruik 1 reduceert de warmtebehoefte en daardoor ook het primaire energiegebruik voor verwarming. Echter kan het toepassen van dit pakket toch een negatieve invloed hebben op het aandeel duurzame energie. Door de afname van de warmtebehoefte hoeft de warmteopwekker minder energie te leveren. In het geval van een duurzame opwekker neemt de hoeveelheid duurzaam opgewekte energie ook af. De gebouwen in de cases voldoen allemaal nog niet aan de eis voor het aandeel duurzame energie. De gebouwen hebben de volgende toename nodig om te voldoen:

- Montessori A: 31%
- Montessori BC: 32%
- Het Bildt: 47%
- Koningsberger: 21%

De pakketten zijn vervolgens gecombineerd om te kijken welke combinaties van pakketten mogelijk zijn om de te voldoen aan de BENG-eis voor het aandeel duurzame energie($\geq 50\%$). In Tabel 12 zijn de

benodigde combinaties van pakketten weergegeven om te voldoen aan de BENG-eis voor het aandeel duurzame energie. Dit zijn de minimaal benodigde maatregelpakketten. Het toevoegen van een extra pakket kan natuurlijk altijd.

Tabel 12 Benodigde combinaties aan pakketten om te voldoen aan de BENG-eis voor het aandeel duurzame energie

Gebouw	Deeloplossing Aandeel Duurzame Energie 1 (AD 1)	Deeloplossing Aandeel Duurzame Energie 1 (AD 2)	Deeloplossing Aandeel Duurzame Energie 1 (AD 3)	Deeloplossing Aandeel Duurzame Energie 1 (AD 4)
Montessori A	Pakket PE 1 Pakket PE 2 Pakket PE 3 Pakket PE 5	Pakket PE 2 Pakket PE 4 (+ Voldoen eisen thermische schil)	Pakket PE 4 Pakket PE 5 (+ Voldoen eisen thermische schil)	
Montessori BC	Pakket PE 1 Pakket PE 2 Pakket PE 3 Pakket PE 4	Pakket PE 1 Pakket PE 4 Pakket PE 5	Pakket PE 2 Pakket PE 4 Pakket PE 5 (+ Voldoen eisen thermische schil)	Pakket PE 3 Pakket PE 4 Pakket PE 5 (+ Voldoen eisen thermische schil)
Het Bildt	Pakket PE 1 Pakket PE 2 Pakket PE 3 Pakket PE 4	Pakket PE 1 Pakket PE 2 Pakket PE 4 Pakket PE 5	Pakket PE 3 Pakket PE 4 Pakket PE 5 (+ Voldoen eisen thermische schil)	
Koningsberger	Pakket PE 6 benodigd om de eis te halen			

In Tabel F.10 t/m F.12 in Bijlage F zijn de BENG-indicatoren weergegeven bij deze deeloplossingen.

4.4.7 Maatregel-pakketten benodigd om te voldoen aan BENG-eisen

Om te voldoen aan de BENG-eisen zullen de resultaten van de vorige secties gecombineerd moeten worden. Alle deeloplossingen voor het aandeel duurzame energie, voldoen ook aan de eis voor het primair energiegebruik. Deeloplossing 2 en 3 voor het aandeel duurzame energie van Montessori A voldoen echter nog niet aan de eis voor de energiebehoefte. Daarvoor is deeloplossing 1 van de energiebehoefte van Montessori A toegevoegd. Hierdoor voldoet deze oplossing ook aan alle drie de BENG-eisen. De eindoplossingen staan weergegeven in Tabel 13.

Tabel 13 Oplossingen om te voldoen aan de BENG-wetgeving

	Montessori A	Montessori BC	Het Bildt	Koningsberger
Oplossing 1	Deeloplossing AD 1 Montessori A	Deeloplossing AD 1 Montessori BC	Deeloplossing AD 1 Het Bildt	Deeloplossing EB 1 Koningsberger + het toepassen van gebiedsmaatregelen
Oplossing 2	Deeloplossing AD 2 Montessori A + Deeloplossing EB 1 Montessori A	Deeloplossing AD 2 Montessori BC	Deeloplossing AD 2 Het Bildt	
Oplossing 3		Deeloplossing AD 3 Montessori BC	Deeloplossing AD 3 Het Bildt	

4.5 Conclusie

Voor de cases is gekeken naar verschillende eisen en wensen. Eisen en wensen die gelden voor (bijna) alle onderwijsgebouwen zijn het Bouwbesluit en het Programma van Eisen voor Frisse Scholen. Daarnaast zijn er ook nog praktische eisen en wensen.

Warmteterugwinning voor ventilatielucht, hoge R_c -waardes voor niet-transparante delen van de thermische schil, lage U-waardes voor de transparante delen van de thermische schil, D5a-ventilatiesturing, luchtdicht bouwen en efficiënte verlichting zijn belangrijke maatregelen om de energiebehoefte te verlagen.

Voor het verlagen van het primair energiegebruik van een gebouw zijn maatregelen om de energiebehoefte te verlagen, warmtepompen met een hoge COP waarde en betonkernactivering belangrijk. Voor alle gebouwen is het niet mogelijk om met alleen energiebesparende maatregelen de eis voor het primair energiegebruik en het aandeel duurzame energie te halen. Er moet dus altijd gebruik gemaakt worden van PV-panelen. PV panelen zorgen voor een grote reductie van het primair energiegebruik.

Voor het verhogen van het aandeel duurzame energie zijn de duurzame opwekkers belangrijk. PV-panelen op daken hebben een hoger rendement dan PV-panelen op gevels. Warmtepompen kunnen ook een aanzienlijk deel van het aandeel duurzame energie voor zijn rekening nemen. Mocht het niet lukken om te voldoen aan deze eis is het mogelijk om gebiedsmaatregelen te treffen.

Rekening gehouden met deze eisen en wensen zijn enkele oplossingen ontwikkeld om te voldoen aan de eisen van de BENG-wetgeving. In Tabel G.1 t/m G.3 in Bijlage G is zijn overzichten gegeven van de oplossingen per case. Opvallend was dat het Koningsberger gebiedsmaatregelen nodig heeft om te voldoen aan de eisen voor het primair energiegebruik en het aandeel duurzame energie. Dit heeft te maken met de ratio gebruiksoppervlak/dakoppervlak. Doordat het Koningsberger zeven verdiepingen heeft, is deze ratio klein. Hierdoor kunnen in verhouding tot het gebruiksoppervlak minder PV-panelen op het dak geplaatst worden.

Hoofdstuk 5: Discussie, conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden de discussie, conclusies en aanbevelingen weergegeven. In Sectie 5.1 wordt het onderzoek in wetenschappelijk perspectief geplaatst. In Sectie 5.2 worden antwoorden gegeven op de hoofdvraag en de deelvragen, die opgesteld zijn in Sectie 1.5. Tenslotte worden in Sectie 5.3 suggesties voor vervolgonderzoek weergegeven.

5.1 Discussie

De discussie bestaat uit drie onderdelen: beperkingen van het onderzoek, wetenschappelijke bijdrage en praktische bijdrage.

Beperkingen van het onderzoek

In dit onderzoek zijn verschillende keuzes gemaakt die van invloed zijn op de uitkomst. Zo is gekozen om gebruik te maken van het EPG-programma Uniec. Uniec is één van de officiële EPG-programma's, die geschikt is om de officiële BENG-indicatoren te bepalen. Echter heeft Uniec enkele beperkingen, die andere EPG-programma's niet hebben. Uniec is oorspronkelijk bedoeld voor de woningbouw. Dit heeft er toe geleid dat veel invoerparameters die alleen gebruikelijk zijn in de utiliteitsbouw niet ingevoerd kunnen worden in Uniec. Dit beperkt de keuzevrijheid van de te onderzoeken maatregelen.

In dit onderzoek is gekozen voor drie cases: twee middelbare scholen en één WO instelling. Gebaseerd op drie cases kan niet geconcludeerd worden dat alle onderwijsgebouwen kunnen voldoen aan de BENG-eisen door het toepassen van deze pakketten. Er zijn veel verschillende soorten gebouwen, die afwijken van de situatie van de drie gebouwen uit de cases. Zo zijn er verschillende soorten onderwijsgebouwen. Basisscholen zijn bijvoorbeeld niet onderzocht. Daarnaast is het ook mogelijk dat gebouwen met andere afmetingen, vormen of oriëntatie anders reageren op de pakketten. Tenslotte kan het ook voorkomen dat het niet mogelijk is om bepaalde pakketten toe te passen in alle situaties in verband met andere eisen of wensen.

In dit onderzoek is gekeken naar onderwijsgebouwen. De functie onderwijs heeft zijn eigen energiegebruik karakteristieken. De energiegebruik karakteristieken kunnen per functie van het gebouw variëren. Energiegebruik voor de verwarming van tapwater is bijvoorbeeld in onderwijsgebouwen een kleine energiepost, terwijl dit in andere functie een grotere post is. Dit kan er voor zorgen dat andere maatregelen nodig zijn om aan de BENG-eisen te voldoen.

De bepalingmethode van de BENG-indicatoren speelt een cruciale rol in het onderzoek. Zoals vermeld is in de inleiding mag elk land zelf bepalen hoe het invulling geeft aan de invoering van de Nearly Zero Energy Buildings wetgeving. Zo heeft elk land zijn eigen bepalingmethode van de energieprestatie indicatoren. In Sectie 2.2 is wel vermeld dat deze bepalingmethode binnen een kader moet passen. Zo moeten de energieprestatie indicatoren afhankelijk zijn van het primaire energiegebruik. De bepaling hoe dit primair energiegebruik moet worden vastgesteld is echter niet in elk land hetzelfde. In Nederland worden de BENG-indicatoren bepaald aan de hand van de NEN 7120 (NNI, 2012a), NEN 8088-1 (NNI, 2012b) en NEN 1068 (NNI, 2014). Een verandering van de bepalingmethode zorgt ervoor dat de invloed van de maatregelen ook verandert. Zo kunnen de resultaten van dit onderzoek niet één op één worden toegepast in andere landen. Wel is het mogelijk om de lijst met maatregelen te gebruiken om te testen wat de invloed is op de energieprestatie indicatoren in andere landen.

Voor dit onderzoek waren slechts tien weken beschikbaar. Dit heeft er toe geleid dat de zoektocht naar maatregelen om de BENG-indicatoren te beïnvloeden beperkt was. Meer tijd had de mogelijkheid geboden om meer markt- en literatuuronderzoek te doen naar mogelijke maatregelen om de BENG-indicatoren te verbeteren.

De invloed van een maatregel varieert per case. Dit heeft er mee te maken dat elk model tientallen parameters heeft, die onderling afhankelijk zijn. Omdat veel parameters verschillen in de nul-situaties, is de invloed van de verandering van een parameter niet in elke case hetzelfde. Zo heeft het toepassen van een efficiëntere warmteopwekker een kleinere invloed op een gebouw met een kleine warmtebehoefte dan een gebouw met een grote warmtebehoefte.

Wetenschappelijk bijdrage

Dit onderzoek sluit aan bij andere artikelen over het bereiken van Nearly Zero Energy Buildings (NZEB's). In deze artikelen gaat het over de algemene definitie van NZEB's. Sartori, Napolitano, & Voss (2015) schrijven dat er geen definitie is voor NZEB's. en Marszal, et al. (2010) gaf aan dat er nog geen bepalingsmethode was die aangeeft hoe bepaald moet worden wanneer een gebouw bijna energie neutraal is. Dit onderzoek vermeldt hoe de NZEB-wetgeving in Nederland is vormgegeven en welke eisen aan nieuwe gebouwen worden gesteld. De bepalingsmethode voor de NZEB-wetgeving in Nederland is ook weergegeven in dit rapport.

Verder is er verschillende wetenschappelijke literatuur gebruikt bij het opstellen van de lijst met potentiële maatregelen om de BENG indicatoren te verbeteren. De invloed van de maatregelen uit deze wetenschappelijk literatuur op de BENG-indicatoren is bepaald. Zo heeft Goia (2016) onderzoek gedaan naar de optimale WWR voor het energiegebruik van verlichting, koeling en verwarming. De waarden van de optimale WWR kwam niet overeen met de optimale WWR voor de BENG-indicatoren voor energiebehoefte en primair energiegebruik.

Praktische bijdrage

Er zijn in dit onderzoek enkele manieren onderzocht om te voldoen aan de BENG-wetgeving. Dit onderzoek kan gebruikt worden als handvat voor alle partijen die betrokken zijn bij het ontwerpen van een gebouw. Aangezien de BENG-wetgeving verplicht dat alle gebouwen voldoen aan de eisen voor energiebehoefte, primair energiegebruik en het aandeel duurzame energie, zal al in een vroeg stadium rekening gehouden moeten worden met maatregelen die deze BENG-indicatoren verbeteren. Het ontwerpen van een gebouw is namelijk een integraal proces. Zo hebben installatietechnische aspecten invloed op bouwkundige aspecten en vice versa. Mocht een ontwerp nog niet voldoen aan de eisen voor de BENG-wetgeving is het mogelijk om dit rapport erbij te pakken om te kijken welke maatregel pakketten nog toegepast kunnen worden om de waarde van de BENG-indicatoren te verbeteren.

Verder kan dit onderzoek ook gebruikt worden als advies voor de Nederlandse overheid. De BENG-wetgeving is nog niet definitief. In 2018 wordt getoetst of de eisen op een kostenoptimaal niveau liggen. Gestapelde bouw hoger dan vijf verdiepingen, studio's en winkels krijgen hierbij speciale aandacht (RVO, 2015c). Het Koningsberger is een gebouw van meer dan vijf verdiepingen. Voor het behalen van de BENG-wetgeving zullen gebiedsmaatregelen getroffen moeten worden. Dit heeft een grote invloed op de kosten. Verder is het de vraag, hoe de eisen gehaald moeten worden in gebieden met veel hoogbouw?

5.2 Conclusies

Vanaf 1 januari 2021 (en overheidsgebouwen vanaf 1 januari 2019) moeten alle nieuwe gebouwen voldoen aan de BENG-wetgeving. Het doel van dit onderzoek is om verschillende manieren te vinden om te voldoen aan de BENG-wetgeving. In dit onderzoek is gekeken naar drie cases: het Montessori College, Het Bildt en het Koningsberger. In elke case is het mogelijk om te voldoen aan de BENG-wetgeving.

Vanaf de invoering van de BENG-wetgeving zijn er drie energieprestatie indicatoren: de energiebehoefte, het primair energiegebruik en het aandeel duurzame energie. De energiebehoefte bestaat uit de warmtebehoefte, koudebehoefte en het energiegebruik voor verlichting. Een

luchtbehandelingskast kan een gedeelte van de warmte- / koudebehoefte voor zijn rekening nemen. Het primair energiegebruik bestaat uit de som van het primair energiegebruik voor verwarming, koeling, verwarming van warm tapwater, ventilatie, bevochtiging en verlichting. Deze som wordt verminderd met de hoeveelheid bruto hernieuwbare energie. Het aandeel duurzame energie is de verhouding tussen de hoeveelheid bruto hernieuwbare energie en het totale energiegebruik.

Elke gebruiksfunctie heeft zijn eigen karakteristieken met betrekking tot het energiegebruik. Voor onderwijsgebouwen zijn verwarming en verlichting grote posten voor de energiebehoefte en voor het primair energiegebruik zijn verwarming, verlichting en koeling grote posten.

In Hoofdstuk 3 zijn maatregelen weergegeven die de BENG indicatoren beïnvloeden. Deze maatregelen zijn gecombineerd in pakketten. Per case en per BENG-eis is gekeken welke pakketten benodigd zijn om te voldoen aan de BENG wetgeving. Hierbij wordt rekening gehouden met algemene eisen en wensen. De volgende maatregelen hadden een sterk positieve invloed op de BENG-indicatoren

- Goede maatregelen om de energiebehoefte te beperken zijn efficiënte warmteterugwinning (90%), hoge luchtdichtheid van het gebouw ($0,15 \text{ dm}^3/\text{s.m}^2$), gebalanceerde ventilatie met CO₂-sturing met twee of meer zones, een goed geïsoleerde thermische schil ($R_c = 10 \text{ m}^2\text{K/W}$ en U waarde = $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$) en efficiënte verlichting.
- Lage warmtebehoefte, efficiënte verlichting, betonkernactivering met LTV en HTK en een warmtepomp als warmte-opwekker zijn maatregelen die het primair fossiel energiegebruik kunnen verlagen.
- PV-panelen op het dakoppervlak, PV panelen op de het geveloppervlak en een warmtepomp met een hoge COP-waarde ($\text{COP}=5,0$) kunnen de hoeveelheid bruto hernieuwbare energie sterk verhogen. PV-panelen spelen een cruciale rol in de methode om aan de BENG-wetgeving te doen. In de cases was het niet mogelijk om te voldoen aan de BENG-eisen voor het primair energiegebruik en het aandeel duurzame energie zonder gebruik te maken van PV-panelen. Tenslotte is het ook mogelijk om de hoeveelheid bruto hernieuwbare energie te verhogen door gebiedsmaatregelen toe te passen.

De indicatoren voor het primair energiegebruik en het aandeel duurzame energie zijn sterk aan elkaar gelinkt. De hoeveelheid bruto hernieuwbare energie vermindert de indicator primair energiegebruik. Daarnaast zorgt een daling van het primair fossiel energiegebruik voor een stijging van het aandeel duurzame energie. In de cases was de BENG-eis voor het aandeel duurzame energie moeilijker te halen dan de BENG-eis voor het primair energiegebruik. De BENG-eis voor het primair energiegebruik werd gehaald door te voldoen aan de BENG-eis voor het aandeel duurzame energie.

Gebouwen met andere afmetingen, vormen of oriëntatie reageren verschillend op maatregelen. Dit heeft er mee te maken dat veel factoren afhankelijk zijn van elkaar. Bij gebouwen met een laag gebruiksoppervlak/dakoppervlak ratio kunnen relatief gezien meer PV-panelen op het dak geplaatst worden. Hierdoor wordt hebben PV-panelen op daken een positievere invloed op gebouwen met een lage gebruiksoppervlak/dakoppervlak-ratio dan op gebouwen met een hoge gebruiksoppervlak/dakoppervlak.

5.3 Aanbevelingen

De volgende aanbevelingen worden gedaan met betrekking tot vervolgstudies voor Bijna Energie Neutrale Gebouwen:

Allereerst wordt aanbevolen om de gevonden eindoplossingen te analyseren op andere criteria dan alleen de invloed op de BENG-indicatoren. De keuze voor het toepassen van maatregelen wordt niet alleen gebaseerd op de energieprestatie, maar ook op andere criteria, bijvoorbeeld de kosten, de invloed op het comfort en op andere praktische criteria. Uit deze analyse kan blijken dat er omwille van andere criteria niet gekozen kan worden uit de in dit onderzoek voorgestelde maatregelen.

Ten tweede wordt er aanbevolen om meer literatuur- en marktonderzoek te doen naar nieuwe maatregelen. Er zijn nog meer maatregelen beschikbaar om te voldoen aan de eisen van de BENG-wetgeving. Hierbij zal vooral aandacht besteedt moeten worden aan het primair energiegebruik voor ventilatie. In de ontwerpen met de toegepaste maatregelpakketten is ventilatie de grootste post voor het primair energiegebruik.

Ten derde kunnen gebiedsmaatregelen er voor zorgen dat de BENG-eisen voor het primair energiegebruik en het aandeel duurzame energie gehaald worden. Vooral voor hoogbouw wordt het lastig om te voldoen aan de BENG-eisen zonder gebruik te maken van gebiedsmaatregelen. Er moet echter wel meer onderzoek gedaan worden naar de mogelijkheid van gebiedsmaatregelen. De vraag is in welke mate gebiedsmaatregelen toegepast kunnen worden. Dichtbevolkte gebieden met veel hoogbouw kunnen problemen ondervinden bij het vinden van beschikbare ruimte voor het toepassen van deze gebiedsmaatregelen. Daarnaast brengen gebiedsmaatregelen grote kosten met zich mee.

Tenslotte wordt aanbevolen om voor de bepaling van de BENG-indicatoren gebruik te maken van een EPG-programma waarbij de invoerparameters gedetailleerd ingevoerd kunnen worden. Op deze manier kunnen zo veel mogelijk maatregelen ingevoerd worden. Zoals vermeld is in Sectie 5.1 is de keuze voor het EPG-programma Uniec één van de beperkingen van dit onderzoek. Niet alle mogelijke maatregelen kunnen ingevoerd worden in Uniec. Dit zorgt ervoor dat de ingevoerde waarden soms niet overeenkomen met het werkelijke ontwerp. Dit kan er toe leiden dat de energieprestatie-indicatoren negatiever uitvallen, dan daadwerkelijk het geval is.

Bronnen

- Aditya, L., Mahlia, T., Rismanchi, B., Ng, H., Hasan, M., Metselaar, H., Aditiya, H. (2017). *A review on insulation materials for energy conservation in buildings*. Renewable and sustainable energy reviews, volume 73, pages 1352-1365. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.034>
- Al-Ko. (2017). *Alko products*. Retrieved from Alko.nl: <http://www.alkonl.com/producten/producten>, 14 mei 2017
- Allen, K., K. C., Rutherford, P., & Wu, Y. (2017). *Smart windows—Dynamic control of building energy performance*, *Energy and Buildings*, volume 139, pages 535-546. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.093>
- Allouhi, A., Fouih, Y. E., Kousksou, T., Jamil, A., Zeraouli, Y., & Mourad, Y. (2015). *Energy consumption and efficiency in buildings: current status and future trends*. Journal of Cleaner Production, Volume 109, pages 118-130. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.139>
- BlueDec. (2017). *Wat is aerogel*. Retrieved from BlueDec.nl: <http://www.bluedec.nl/wat-is-aerogel>, 29 Mei 2017
- Bouwbesluit. (2012). *Integrale nota van toelichting van Bouwbesluit 2012*, Retrieved from <http://wetten.overheid.nl/BWBR0030461/2017-01-01#Hoofdstuk5>
- Cace, J., Horst, E. t., Syngellakis, K., Maïte Niel, A., Clement, P., Heppener, A. R., & Peirano, E. (2007). *Urban Wind Tubines*. Retrieved from Urbanwind: http://www.urbanwind.net/pdf/SMALL_WIND_TURBINES_GUIDE_final.pdf, 14 Mei 2017
- D'Agustino, D. (2015). *Assessment of the progress towards the establishment of definitions of Nearly Zero Energy Buildings (nZEBs) in European Member States*. Journal of Building Engineering, Volume 1, Pages 20-32. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.01.002>
- De Kleijn Energy Consultant. (2017). *Techniek*. Retrieved from Industrial heatpumps: <http://www.industrialheatpumps.nl/nl/techniek/>, 08 Mei 2017
- Dubois, M.-C., & Blomsterberg, Å. (2011). *Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: A literature review*. Volume 43, Issue 10, October 2011, Pages 2572-2582. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.001>
- Duurzaam MKB. (2017). *PV glas*. Retrieved from Duurzaam MKB: <http://duurzaammkb.nl/media/tips/61/pv-glas.pdf>, 06 Mei 2017
- Economisch instituut voor de bouw. (2013). *Bouwen voor het onderwijs*. Retrieved from EIB: http://www.eib.nl/pdf/bouwen_voor_het_onderwijs.pdf, 26 April 2017
- Entrop, A. (2013). *ASSESSING ENERGY TECHNIQUES AND MEASURES IN RESIDENTIAL BUILDINGS: A MULTIDISCIPLINARY PERSPECTIVE*. Retrieved from RVO: <https://www.rvo.nl/sites/default/files/Beoordeling%20van%20energietechnieken%20en%20maatregelen%20in%20de%20woningbouw.pdf>, 25 April 2017
- Entrop, A., Brouwers, H., & Reinders, A. (2010). *Evaluation of energy performance indicators and financial aspects of energy in residential real estate.*, *Energy and Buildings*, Volume 42, Issue 5, pages 618-629. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.032>

- EPBD. (2013). *Towards nearly zero energy buildings*. Retrieved from EC:
https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/nzeb_executive_summary.pdf, 25 April 2017
- European Union. (2010). *RICHTLIJN 2010/31/EU VAN HET EUROPEES PARLEMENT EN DE RAAD betreffende de energieprestatie van gebouwen*. Retrieved from RVO:
<https://www.rvo.nl/sites/default/files/bijlagen/Herziening%20EPBD%20richtlijn%202010%2031%20EU.pdf>. 10 Mei 2017
- Goia, F. (2016). *Search for the optimal window-to-wall ratio in office buildings in different European climates and the implications on total energy saving potential*. , Solar Energy, volume 132, pages 467-492. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.031>
- Gout, R. (2017). *Beoordeling offertes PV-panelen*. Email from R. Gout, r.gout@valstar-simonis.nl 20 Juni 2017
- Harmelink, M. (2015). *Hernieuwbare energie in Bijna Energie Neutrale GEbouwen*. Retrieved from RVO:
<https://www.rvo.nl/sites/default/files/2015/07/Hernieuwbare%20Energie%20in%20Bijna%20Energie neutrale%20Gebouwen%20-%20BENG.pdf>, 20 Juni 2017
- Heijmans. (2017). *Het idee*. Retrieved from Zigzag solar: <https://www.heijmans.nl/nl/verhalen/het-idee-zigzagsolar/>, 15 Juni 2017
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Retrieved from IPCC.ch:
https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_chapter9.pdf, 10 April 2017
- ISSO. (2005). *Ontwerp en uitvoering van verticale bodemwarmtewisselaars*.
- ISSO. (2015). *EnergieVademecum Energiebewust ontwerpen van nieuwbouwwoningen*.
- Jelle, B. P. (2011). *Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities*. , Energy and Buildings, Volume 43, Issue 10, pages 2548-2563. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.015>
- Ma, P., Wang, L.-S., & Guo, N. (2015). *Maximum window-to-wall ratio of a thermally autonomous building as a function of envelope U-value and ambient temperature amplitude*. Applied Energy, Volume 146, pages 84-91. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.103>
- Marszal, A., Heiselberg, P., Bourrelle, J., Musall, E., Voss, K., Sartori, I., & Napolitano, A. (2010). *Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies*. , Energy and Buildings, Volume 43, Issue 4, pages 971-979.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.022>
- Nardelli, A., Deuschle, E., Azevedo, L. D., Pessoa, J. L., & Ghisi, E. (2017). *Assessment of Light Emitting Diodes technology for general lighting: A critical review*. , Renewable and Sustainable Energy reviews, Volume 75, pages 368-379
- Nederlands Instituut voor Internationale Betrekkigen. (2005). *Nederland en de totstandkoming van EU milieurichtlijnen*. Den Haag. Retrieved from Clingendael:
https://www.clingendael.nl/sites/default/files/20060000_rapport_vrom.pdf, 25 April 2017

- NEPROM. (2014). *Drievoudig glas en bijpassende kozijnen* . Retrieved from Lente Akkoord: <https://www.lente-akkoord.nl/wp-content/uploads/2014/11/Lente-akkoord-factsheet-drievoudig-glas-november-2014.pdf>, 05 Juni 2017
- Nieman. (2015). *Handreiking BENG*. Retrieved from RVO: <http://www.rvo.nl/sites/default/files/2015/10/Handreiking%20BENG.pdf>, 11 April 2017
- Nieman. (2017). *eisen luchtdicht bouwen*. Retrieved from www.nieman.nl: <http://www.nieman.nl/vakgebieden/luchtdicht-bouwen/eisen-luchtdicht-bouwen/>, 06 Juni 2017
- Nieman; DWA. (2016). *Onderzoek innovatieve opties BENG*. Retrieved from RVO: <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2017/03/Onderzoek%20innovatieve%20opties%20BENG.pdf>, 10 Juni 2017
- NNI. (2012a). *NEN 7120: Energieprestatie van gebouwen - Bepalingsmethode*.
- NNI. (2012b). *NEN 8088: Ventilatie en luchtdoorlatendheid van gebouwen*.
- NNI. (2014). *NEN 1068: Thermische isolatie van gebouwen - Rekenmethoden*.
- PolySolar. (2017, 06 17). *BIPV solutions*. Retrieved from PolySolar: <http://www.polysolar.co.uk/BIPV-Solutions/Solar-Building-Fa%C3%A7ades>, 21 Juni 2017
- Royal Haskoning DHV. (2013). *EPC aanscherpingsmethodiek woningbouw en utiliteitsbouw*. Retrieved from RVO: <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2014/01/EPC%20aanscherpingsmethodiek%20woningbouw%20en%20utiliteitsbouw.pdf>, 20 April 2017
- RVO. (2008). *Programma van Eisen Frisse Scholen*. Ministerie van Binnenlandse zaken en Koninkrijksrelaties. Retrieved from RVO: <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2014/12/Programma%20van%20Eisen%20Frisse%20Scholen%202015..pdf>, 19 Juni 2017
- RVO. (2013a). *Bepalingsmethode EPC*. Retrieved from Rijksdienst voor Ondernemend Nederland: <http://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/gebouwen/wetten-en-regels-gebouwen/energieprestatie-epc/bepalingsmethode>
- RVO. (2013b). *Energiemaatregelen op gebiedsniveau*. Retrieved from Rijksdienst voor Ondernemend Nederland: <http://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/gebouwen/wetten-en-regels-gebouwen/energieprestatie-epc/gebiedsmaatregelen>, 14 Juni 2017
- RVO. (2015a). *klimaatbeleid Nederland*. Retrieved from [rijksoverheid.nl](http://www.rijksoverheid.nl): <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/klimaatverandering/inhoud/klimaatbeleid>, 20 April 2017
- RVO. (2015b). *Nederland stemt in met historisch Klimaatakkoord*. Retrieved from Rijksdienst voor ondernemend Nederland: <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/klimaatverandering/nieuws/2015/12/12/nederland-stemt-in-met-historisch-klimaatakkoord>, 22 April 2017
- RVO. (2015c). *Wettelijke eisen BENG*. Retrieved from Rijksdienst voor Ondernemend Nederland: <http://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/gebouwen/wetten-en-regels-gebouwen/energieprestatie-beng/wettelijke-eisen>, 10 Mei 2017

- RVO. (2016). *Top 15 energiezuinige scholen onderzoeksrapport 2016*. Retrieved from RVO:
http://www.mobiusconsult.nl/images/categorie/publicaties/2016_RVO_TOP_15_scholen_web.pdf, 17 mei 2017
- RVO. (2017). *kennisbank energie*. Retrieved from infomil.nl:
<http://www.infomil.nl/onderwerpen/duurzame/energie/kennisbank-energie/@163929/9a/>, 12 Juni 2017
- Sartori, I., Napolitano, A., & Voss, K. (2015). *Net zero energy buildings: A consistent definition framework*. , Energy and Buildings, volume 48, pages 220-232.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.032>
- SenterNovem. (2008). *De EPC: toetsen en toezichthouden*. Retrieved from RVO:
<https://www.rijksoverheid.nl/.../de-epc-toetsen-en-toezicht-houden/39br2008g021.pdf>, 25 April 2017
- SER. (2013). *Energieakkoord, informatie voor belanghebbende*. Retrieved from Energieakkoord:
<http://www.energieakkoordser.nl/~media/files/energieakkoord/overzicht-belangrijkste-maatregelen-energieakkoord.ashx>, 17 Juni 2017
- Shuklaa, A. K., Sudhakar, K., & Baredar, P. (2017). *Recent advancement in BIPV product technologies: A review*. , Energy and Buildings, Volume 140, pages 188-195.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.015>
- TNO. (2012). *Gebiedsmaatregelen voor het eerst gewaardeerd in de EPC berekeningen*. Retrieved from RVO:
https://www.rvo.nl/sites/default/files/Gebiedsmaatregelen%20voor%20het%20eerst%20ge-waardeerd%20in%20de%20EPC_bepaling_0.pdf, 20 juni 2017
- Tripathy, M., Sadhu, P., & Panda, S. (2016). *A critical review on building integrated photovoltaic products and their applications*. Renewable and Sustainable energy reviews, volume 61, pages 451-465. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.008>
- Uniec. (2015). *Handleiding Uniec 2.0*. Retrieved from www.uniec2.nl, 11 April 2017
- Versteeg, H. (2008). *Onderzoek naar de kwaliteit van binnenmilieu scholen*. Retrieved from RVO:
<https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/rapporten/2008/02/01/onderzoek-kwaliteit-binnenmilieu-basisscholen-samenvating-samenvattende-rapportage/8047.pdf+&cd=2&hl=nl&ct=clnk&gl=nl>, 07 Mei 2017
- Zeiler, W., Gvozdenović, K., Bont, K. d., & Maassen, W. (2016). *Toward cost-effective nearly zero energy buildings: science and technology for the built environment*, volume 22, issue 7, pages 911-927. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.159>
- Zonnepanelen.net. (2017, 06 26). *afstand zonnepanelen berekenen platdak* . Retrieved from Zonnepanelen.net: <https://www.zonnepanelen.net/afstand-zonnepanelen-berekenen-platdak/>. 20 Juni 2017

Bijlagen

Bijlage A: Boomstructuren parameters

Bijlage B: Lichtberekeningen

Bijlage C: Nul-situatie cases

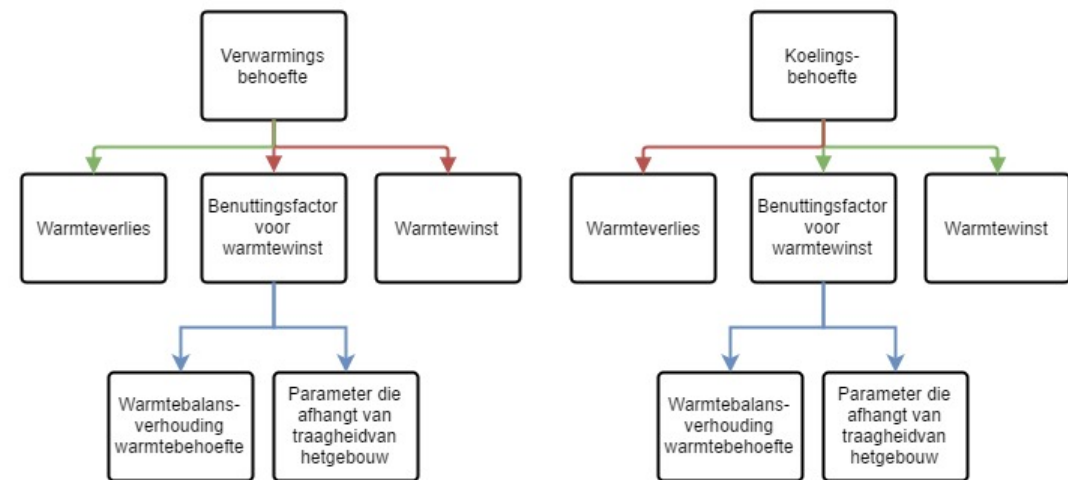
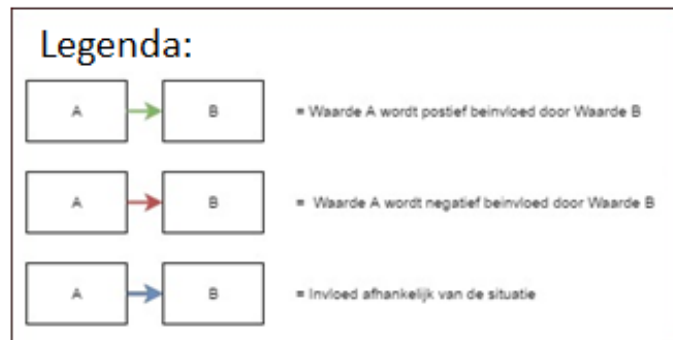
Bijlage D: Eisen en wensen

Bijlage E: Invloed van individuele maatregelen

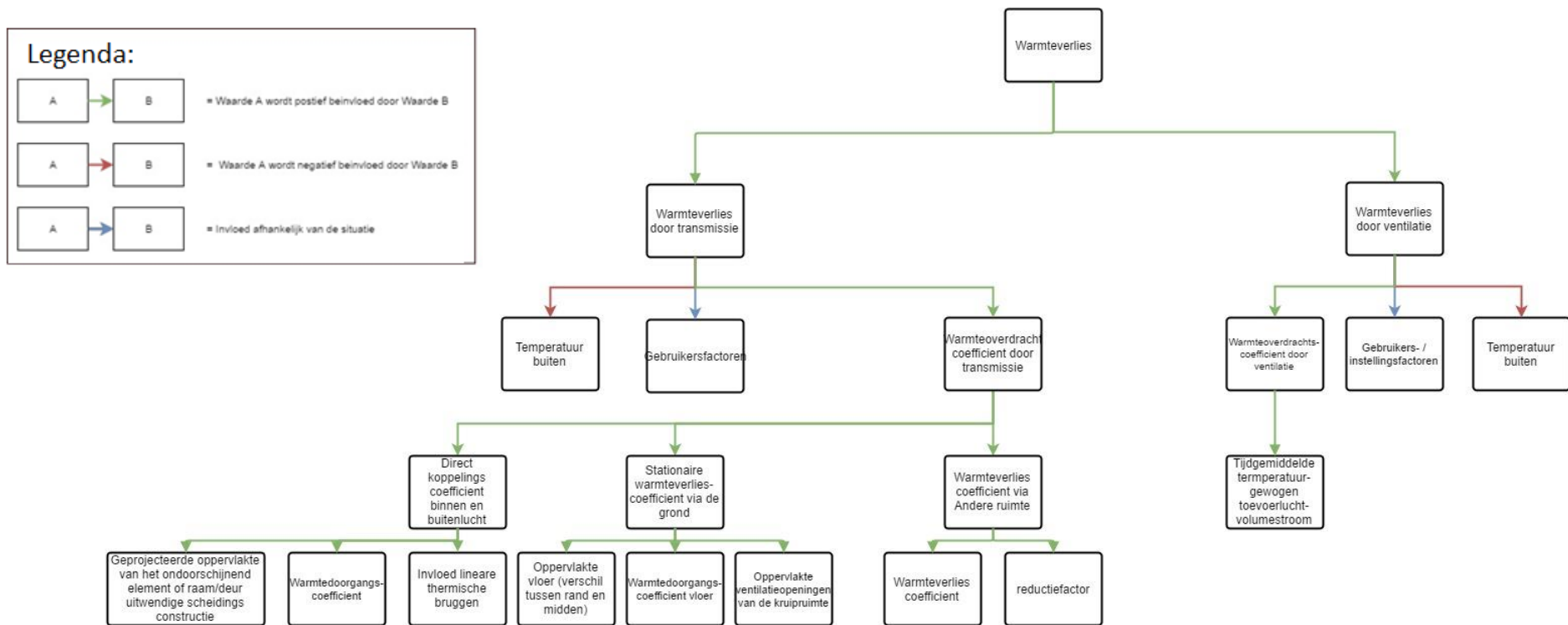
Bijlage F: Deeloplossingen

Bijlage G: Oplossingen

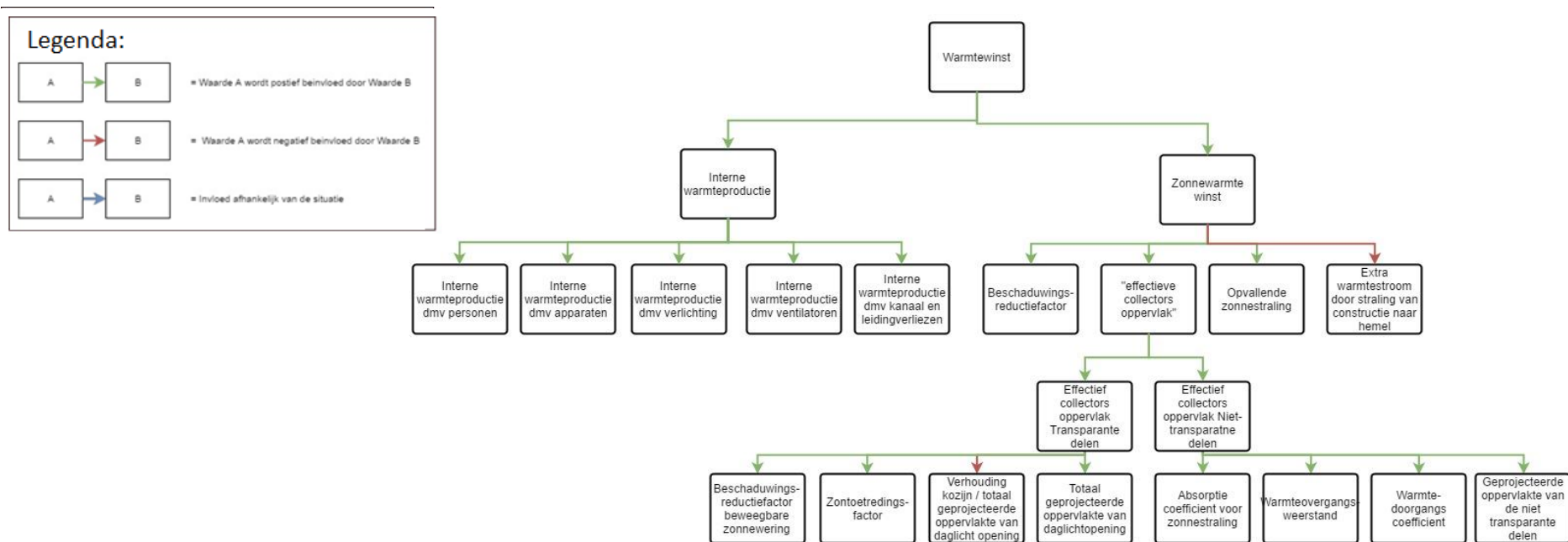
Bijlage A: Boomstructuren parameters



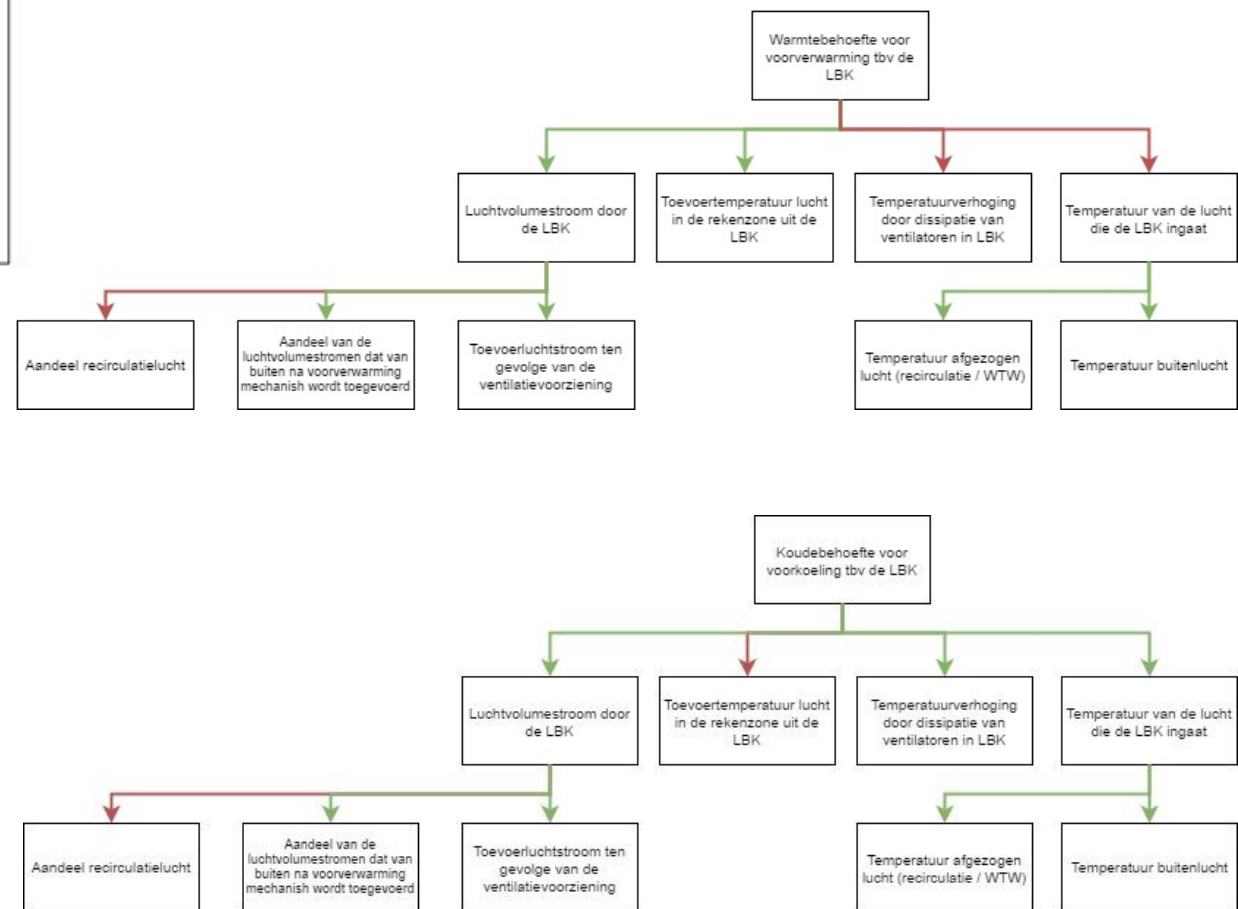
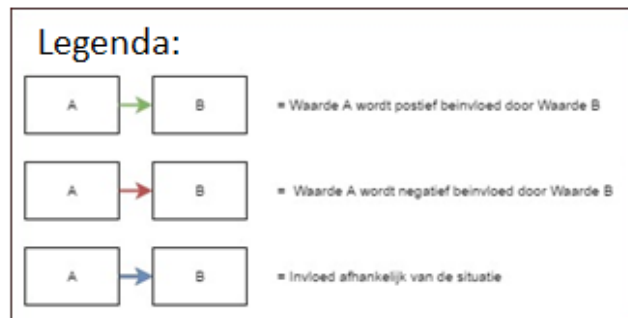
Figuur A.1 Boomstructuur verwarmingsbehoefte en koelingsbehoefte



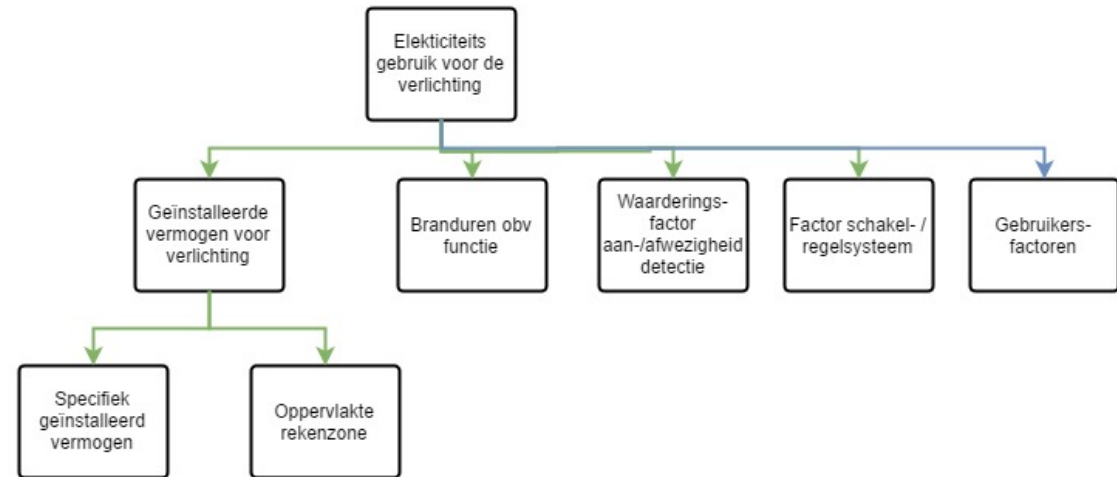
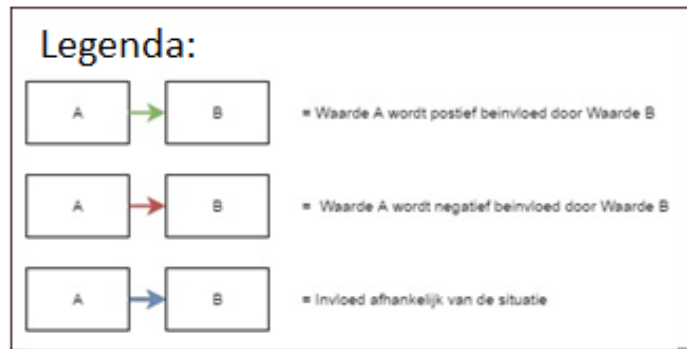
Figuur A.2 Boomstructuur warmteverlies



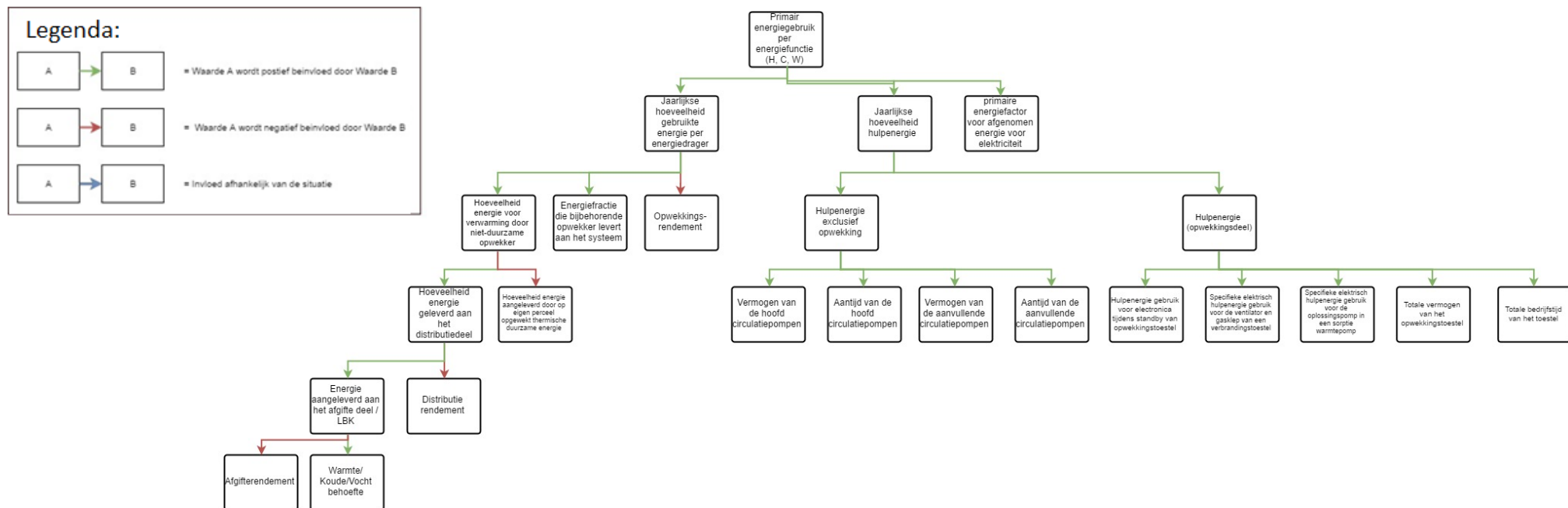
Figuur A.3 Boomstructuur warmtewinst



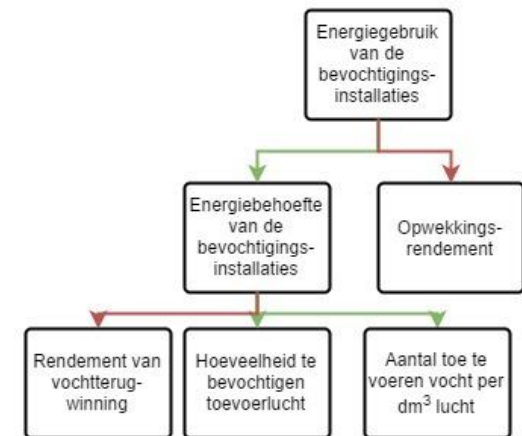
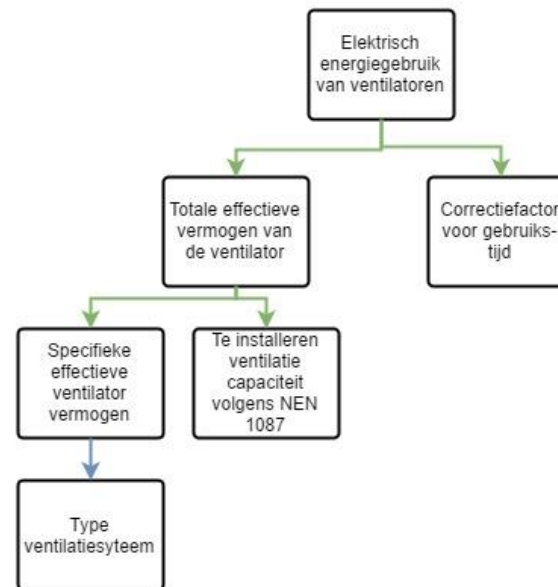
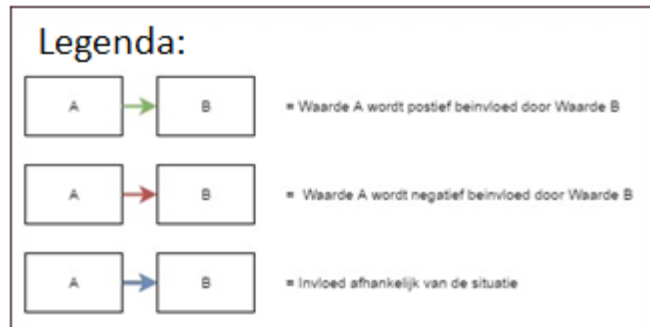
Figuur A.4 Boomstructuur warmte- en koudebehoefte LBK



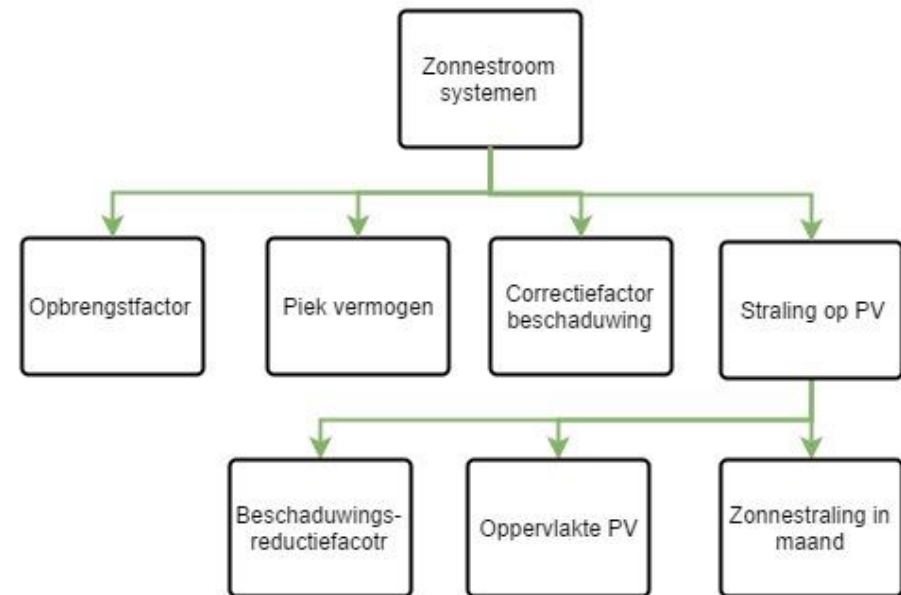
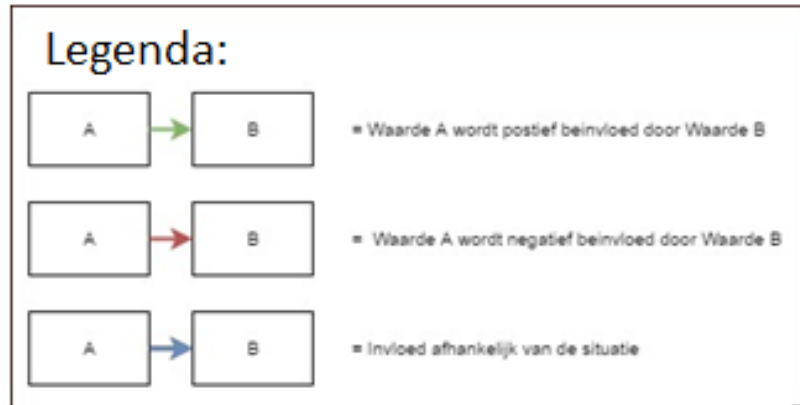
Figuur A.5 Boomstructuur elektriciteitsgebruik voor verlichting



Figuur A.6 Boomstructuur primair energiegebruik voor verwarming, koeling en warm tapwater



Figuur A.7 Boomstructuur voor primair energiegebruik voor ventilatie en bevochtiging



Figuur A.8 Boomstructuur voor opbrengst zonnestroomsystemen

Bijlage B: Lichtplannen

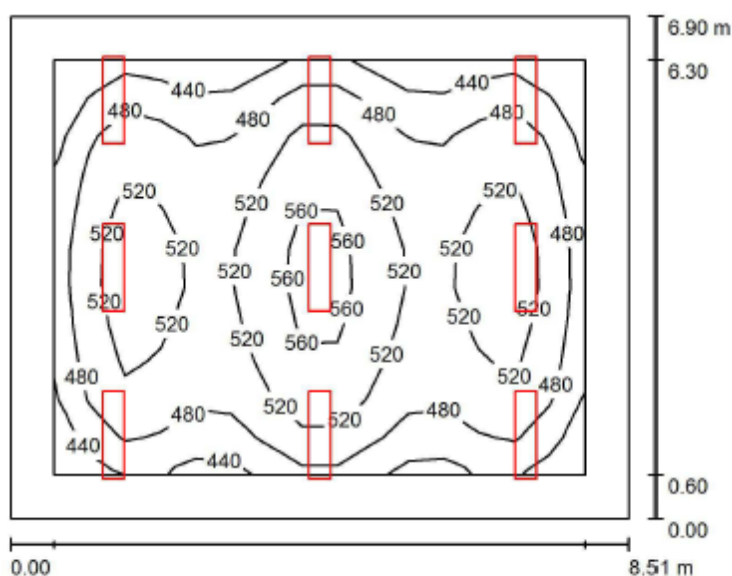
Campus Het Bildt 1e verdieping

\\vsarchief\Archief\DIGITAAL-ARCHIEF\43k-44k\43039 HetBildt\ONTWERP\7_technelek-E\Berekeningen\Bestek lichtberekeningen\Campus Het I 13.06.2017

DIALux

Operator
Telefoon
Fax
e-Mail

Ruimte C01-005 standaard leslokaal LED / Samenvatting



Hoogte van de ruimte: 3.200 m, Montagehoogte: 3.200 m, Behoudfactor: 0.85

Waarden in Lux, Schaal 1:89

Vlak	ρ [%]	E_{gem} [lx]	E_s [lx]	E_{max} [lx]	E_s / E_{gem}
Werkvlak	/	502	415	585	0.826
Vloer	30	413	202	518	0.490
Plafond	80	100	58	121	0.580
Muren (4)	44	209	61	361	/

Werkvlak:

Hoogte: 0.750 m
Raster: 15 x 11 Punten
Randzone: 0.600 m

UGR

In de lengte-
Linkermuur 18
Ondermuur 18
(CIE, SHR = 0.25.)

Loodrecht

18
18

t.o.v. armatuuras

Armaturen stuklijst

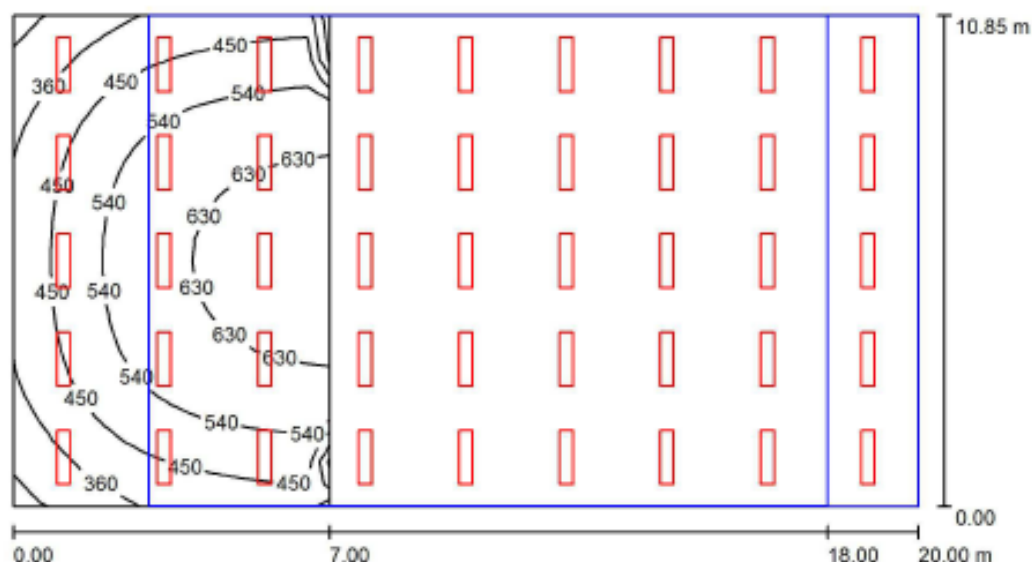
Nr.	Stuk	Type (Correctiefactor)	Φ (Armatuur) [lm]	Φ (Lampen) [lm]	P [W]
1	9	ETAP U25M1/LEDN40S (1.000)	3939	4050	30.3
Totaal:			35449	36450	272.7

Specifiek vermogen: $4.64 \text{ W/m}^2 = 0.93 \text{ W/m}^2/100 \text{ lx}$ (Oppervlakte: 58.72 m^2)

Figuur B.1 Lichtplan standaard leslokaal Het Bildt met LED verlichting

Operator
Telefoon
Fax
e-Mail

Collegezaal 1.20 Plan EHA LED / Samenvatting



Hoogte van de ruimte: 5.700 m, Montagehoogte: 5.700 m, Behoudfactor: 0.85

Waarden in Lux, Schaal 1:143

Vlak	ρ [%]	E_{gem} [lx]	E_s [lx]	E_{max} [lx]	E_s / E_{gem}
Werkvlak	/	514	256	668	0.498
Vloer	10	61	0.12	520	0.002
Plafond	70	118	50	177	0.423
Muren (4)	30	199	0.53	442	/

Werkvlak:

Hoogte: 0.800 m
Raster: 40 x 22 Punten
Randzone: 0.000 m

Armaturen stuklijst

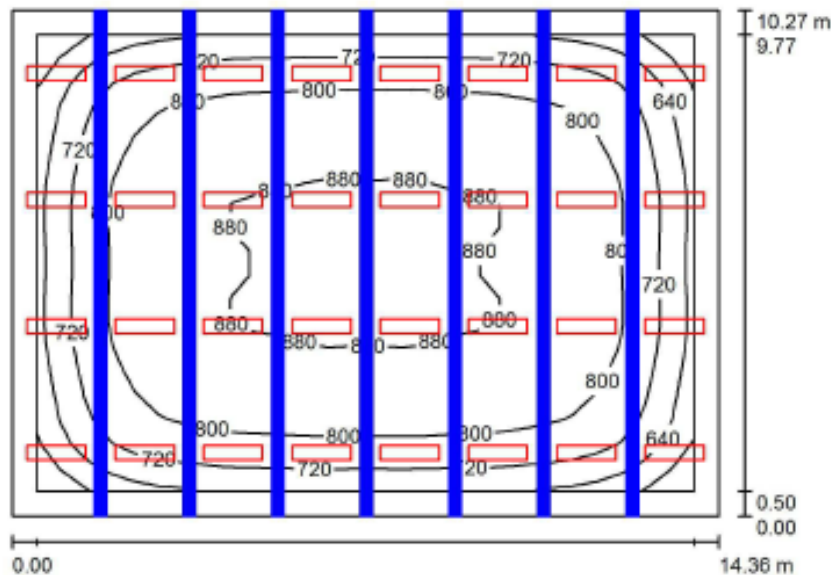
Nr.	Stuk	Type (Correctiefactor)	Φ (Armatuur) [lm]	Φ (Lampen) [lm]	P [W]
1	45	ETAP U25M1/LEDN40S (1.000)	3939	4050	30.3
Totaal:			177247	182250	1363.5

Specifiek vermogen: $6.28 \text{ W/m}^2 = 1.22 \text{ W/m}^2/100 \text{ lx}$ (Oppervlakte: 217.00 m^2)

Figuur B.2 Lichtplan collegezaal Koningsberger gebouw met LED verlichting

Operator
Telefoon
Fax
e-Mail

Practicumzaal type 501 FE middelste LED / Samenvatting



Hoogte van de ruimte: 3.600 m, Montagehoogte: 3.684 m, Behoudfactor: 0.83

Waarden in Lux, Schaal 1:132

Vlak	ρ [%]	E_{gem} [lx]	E_s [lx]	E_{max} [lx]	E_s / E_{gem}
Werkvlak	/	789	506	892	0.642
Vloer	10	692	315	860	0.455
Plafond	70	51	40	78	0.792
Muren (4)	30	277	55	651	/

Werkvlak:

Hoogte: 0.800 m
Raster: 27 x 19 Punten
Randzone: 0.500 m

Armaturen stuklijst

Nr.	Stuk	Type (Correctiefactor)	Φ (Armatuur) [lm]	Φ (Lampen) [lm]	P [W]
1	32	ETAP U25M1/LEDW50S (1.000)	5057	5200	41.8
Totaal:			161832	166400	1337.6

Specifiek vermogen: $9.07 \text{ W/m}^2 = 1.15 \text{ W/m}^2/100 \text{ lx}$ (Oppervlakte: 147.48 m^2)

Figuur B.3 Lichtplan practicumzaal Koningsberger gebouw met LED

Valstar Simonis

Laan van Westenank 731A
7334 DL Apeldoorn

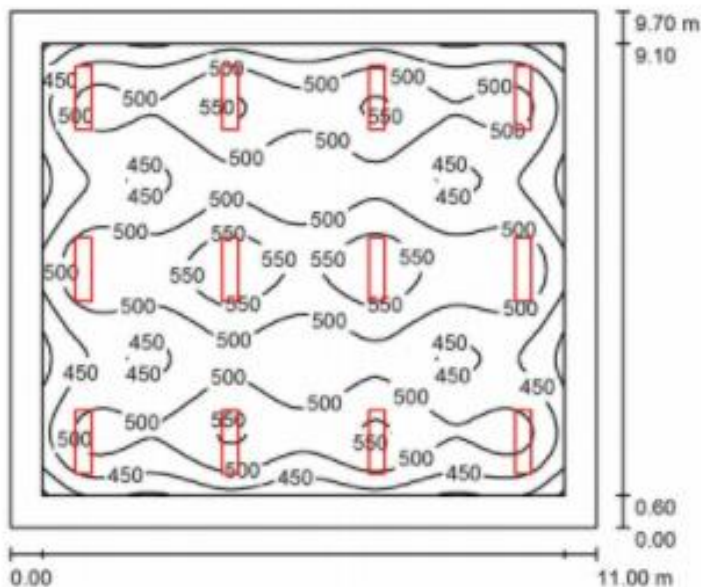
Operator Frank Egelle

Telefoon 055 526 37 80

Fax 055 526 37 70

e-Mail f.egelle@valstar0simonis.nl

A 0.01 Praktijk zorg & Welzijn atelier LED / Samenvatting



Hoogte van de ruimte: 3.200 m, Montagehoogte: 3.292 m, Behoudfactor: 0.85

Waarden in Lux, Schaal 1:125

Vlak	ρ [%]	E_{gem} [lx]	E_s [lx]	E_{max} [lx]	E_s / E_{gem}
Werkvlak	/	489	346	588	0.708
Vloer	20	422	198	512	0.470
Plafond	70	88	54	95	0.613
Muren (4)	50	190	59	283	/

Werkvlak:

Hoogte: 0.750 m
Raster: 64 x 64 Punten
Randzone: 0.600 m

UGR

In de lengte-
Linkermuur 19
Ondermuur 18
(CIE, SHR = 0.25.)

Loodrecht

19
18

t.o.v. armatuuras

Armaturen stuklijst

Nr.	Stuk	Type (Correctiefactor)	Φ (Armatuur) [lm]	Φ (Lampen) [lm]	P [W]
1	12	ETAP U25M1/LEDN50S (1.000)	5057	5200	39.8
Totaal:			60687	62400	477.6

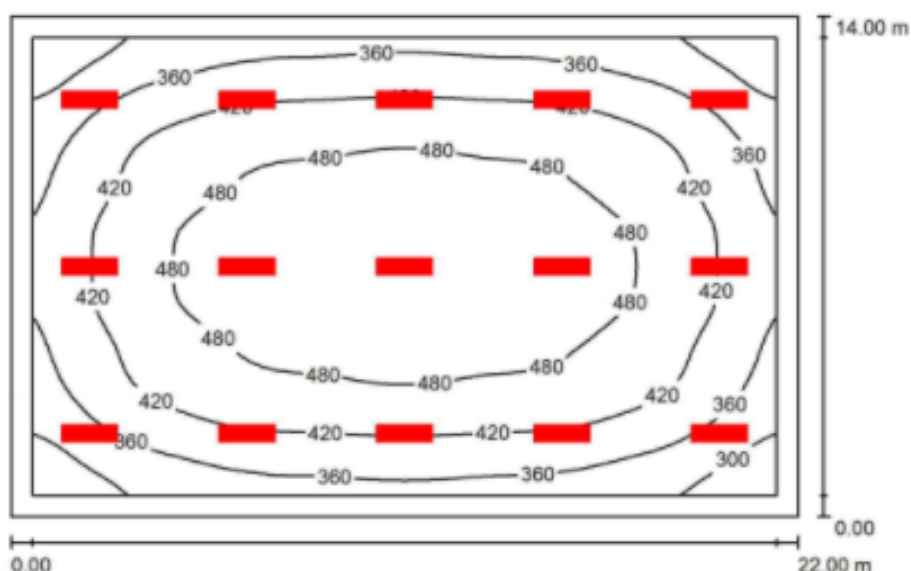
Specifiek vermogen: $4.48 \text{ W/m}^2 = 0.92 \text{ W/m}^2/100 \text{ lx}$ (Oppervlakte: 106.70 m^2)

Figuur B.4 Lichtplan praktijklokaal Montessori College met LED

Valstar Simonis

Laan van Westenenk 731A
7334 DL Apeldoorn

Operator Frank Egelle
Telefoon 055 526 37 80
Fax 055 526 37 70
e-Mail f.egelle@valstar0simonis.nl

A 1.11 Sportzaal LED 12000 / Samenvatting


Hoogte van de ruimte: 7.000 m, Montagehoogte: 7.000 m, Behoudfactor: 0.85

Waarden in Lux, Schaal 1:180

Viak	ρ [%]	E_{gem} [lx]	E_s [lx]	E_{max} [lx]	E_s / E_{gem}
Werkviak	/	424	245	526	0.579
Vloer	20	388	192	514	0.493
Plafond	70	82	49	97	0.592
Muren (4)	50	188	60	307	/

Werkviak:

Hoogte: 0.750 m
Raster: 64 x 64 Punten
Randzone: 0.600 m

UGR

In de lengte-
Linkermuur 16
Ondermuur 17
(CIE, SHR = 0.25.)

Loodrecht

19
18

t.o.v. armatuuras
Armaturen stuklijst

Nr.	Stuk	Type (Correctiefactor)	Φ (Armatuur) [lm]	Φ (Lampen) [lm]	P [W]
1	15	TRILUX Actison RSX3 12000-840 ET Actison (1.000)	11988	12000	125.0
Totaal:			179816	180000	1875.0

Specifiek vermogen: $6.09 \text{ W/m}^2 = 1.44 \text{ W/m}^2/100 \text{ lx}$ (Oppervlakte: 308.00 m^2)

Figuur B.5 Lichtplan sportzaal Montessori College met LED

Bijlage C: Nul situatie cases

Tabel C.2 Gegevens Montessori College

Montessori College (A / BC)		
Projectkenmerken Bouwjaar: 2015 Bestaat uit twee gebouwen Gebruiksoppervlak: Gebouw A: 3.487 m² Gebouw BC: 8192 m² EPC Gebouw A: 1,35 Gebouw BC 1,24		
Bouwkundige maatregelen	Rc waarde dak: 4,0 m²K/W Rc waarde vloer: 4,0 m²K/W Rc waarde gevel: 3,27 m²K/W U waarde raam: 1,00 W/m²K g-waarde raam: 0,35 Luchtdichtheid: 0,200 dm³/s per m²	
Installaties		
Verwarming	Opwekking: WKO met warmtepomp Afgifte: Betonkernactivering Niet preferente opwekker: HR 107 ketel	
Koeling	Opwekking: WKO met warmtepomp Afgifte: Betonkernactivering	
Warm tapwater	Elektrische boiler	
Verlichting	Hoog frequente TL-5 verlichting 10 W/m² Daglichtschakeling	
Ventilatie	Ventilatiesysteem D5a CO2 sturing met 2 of meer zones Warmteterugwinning 70%	
Elektriciteitsopwekking	-	
	Rekenresultaat	BENG-eis
Energiebehoefte (A / BC)	65,1 / 52,2 kWh/m ² GO per jaar	≤ 50 kWh / m ² GO per jaar
Primair energiegebruik (A / BC)	130,2/ 112,5 kWh/m ² GO per jaar	≤ 60 kWh / m ² GO per jaar
Aandeel duurzame energie (A / BC)	20 / 19 %	≥ 50 %

Tabel C.3 Gegevens het Bildt

Campus Het Bildt		
Projectkenmerken Sint Annaparochie Bouwjaar: 2014 Gebruiksoppervlak: 5333m² EPC: 0,929		
Bouwkundige maatregelen	Rc waarde dak: 5,0 m ² K/W Rc waarde vloer: 3,5 m ² K/W Rc waarde gevel: 3,5 m ² K/W U waarde raam: 1,00 W/m ² K g-waarde raam: 0,35 Luchtdichtheid: 0,200 dm ³ /s per m ²	
Installaties		
Verwarming	HR 107 Ketel Betonkernactivering	
Koeling	n.v.t.	
Warm tapwater	Elektrische boiler	
Verlichting	Hoog frequente TL-5 verlichting 10 W/m ² Daglichtschakeling	
Ventilatie	Ventilatiesysteem D5a CO2 sturing met 2 of meer zones Warmteterugwinning 75%	
Elektriciteitsopwekking	160 m ² PV panelen 150 Wp	
	Rekenresultaat	BENG-eis
Energiebehoefte (A / BC)	51,9 kWh/m ² GO per jaar	≤ 50 kWh/m ² GO per jaar
Primair energiegebruik (A / BC)	127 kWh/m ² GO per jaar	≤ 60 kWh/m ² GO per jaar
Aandeel duurzame energie (A / BC)	3 %	≥ 50 %

Tabel C.4 Gegevens Koningsberger gebouw

Koningsberger		
Projectkenmerken Bouwjaar: 2012 Gebruiksoppervlak = 10.436m² EPC = 1,694		
Bouwkundige maatregelen	Rc waarde dak: 5,0 m²K/W Rc waarde vloer: 5,0 m²K/W Rc waarde gevel: 3,5 m²K/W U waarde raam: 1,71 W/m²K g-waarde raam: 0,4 Luchtdichtheid: 0,420 dm³/s per m²	
Installaties		
Verwarming	Opwekking: WKO met warmtepomp Afgifte: Betonkernactivering	
Koeling	Opwekking: WKO met warmtepomp Afgifte: Betonkernactivering	
Warm tapwater	Externe warmtelevering	
Verlichting	Hoog frequente TL verlichting Variërend van 7,9 W/m² tot 13,8 W/m² Daglichtschakeling Veegpulsschakeling	
Ventilatie	Ventilatiesysteem D3 CO2 sturing alleen afvoer Warmteterugwinning 70%	
Elektriciteitsopwekking	-	
	Rekenresultaat	BENG-eis
Energiebehoefte	101,1 kWh/m² GO per jaar	≤ 50 kWh/m² GO per jaar
Primair energiegebruik	151,9 kWh/m² GO per jaar	≤ 60 kWh/m² GO per jaar
Aandeel duurzame energie	29 %	≥ 50 %

Bijlage D: Eisen bouwbesluit en Frisse Scholen

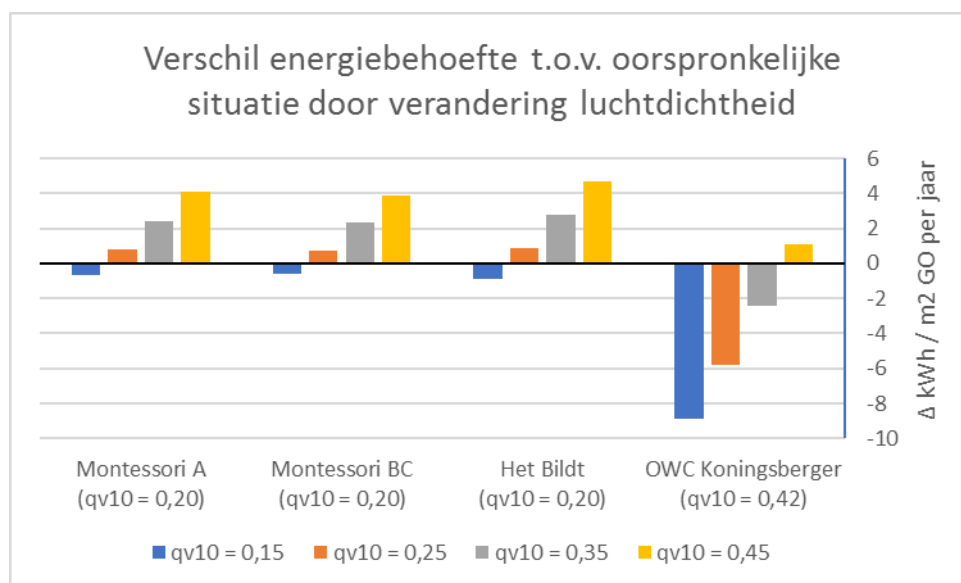
Tabel D.1 Eisen Bouwbesluit 2012 (Bouwbesluit, 2012)

Onderwerp	Eis
Ventilatie	Een te bouwen bouwwerk heeft een zodanige voorziening van luchtverversing dat het ontstaan van een voor de gezondheid nadelige kwaliteit van de binnenlucht wordt voorkomen
Ventilatie capaciteit	Minimaal 8,5 dm ³ /s per persoon
Spui ventilatie	Een te bouwen bouwwerk heeft een voorziening voor het zo nodig snel kunnen afvoeren van sterk verontreinigde lucht
Daglichtfactor	Minimaal 5% van het vloeroppervlak
Energiezuinigheid	Een te bouwen bouwwerk is energiezuinig
Energiezuinigheid	Een te bouwen bouwwerk is energiezuinig
EPC	Maximale EPC van 0,7
Warmteweerstand gevel	Een verticale uitwendige scheidingsconstructie van een verblijfsgebied, een toiletruimte of een badruimte heeft volgens NEN 1068 ten minste 4,5 m ² K/W
Warmteweerstand daken	Een uitwendige scheidingsconstructie die de scheiding vormt tussen een verblijfsgebied, een toiletruimte of een badruimte en de grond of water heeft een volgens NEN 1068 bepaalde warmteweerstand van ten minst 6,0 m ² K/W
Warmteweerstand begane grond vloer	Een uitwendige scheidingsconstructie die de scheiding vormt tussen een verblijfsgebied, een toiletruimte of een badruimte en de grond of het water heeft een volgens NEN 1068 bepaalde warmteweerstand van ten minste 3,5 m ² K/W
Warmtedoorgangscoefficiënt	Ramen, deuren en kozijnen hebben een volgens NEN 1068 bepaalde warmtedoorgangscoefficiënt van ten hoogste 1,65 W/m ² K
Verlichting	Een bouwwerk heeft een zodanige verlichtingsinstallatie dat het bouwwerk veilig kan worden gebruikt en verlaten
Verlichtingssterkte	Een verblijfsruimte heeft een verlichtingsinstallatie die een vloer, een tredevlak of een hellingbaan gemeten verlichtingssterkte kan geven van ten minst 1 lux

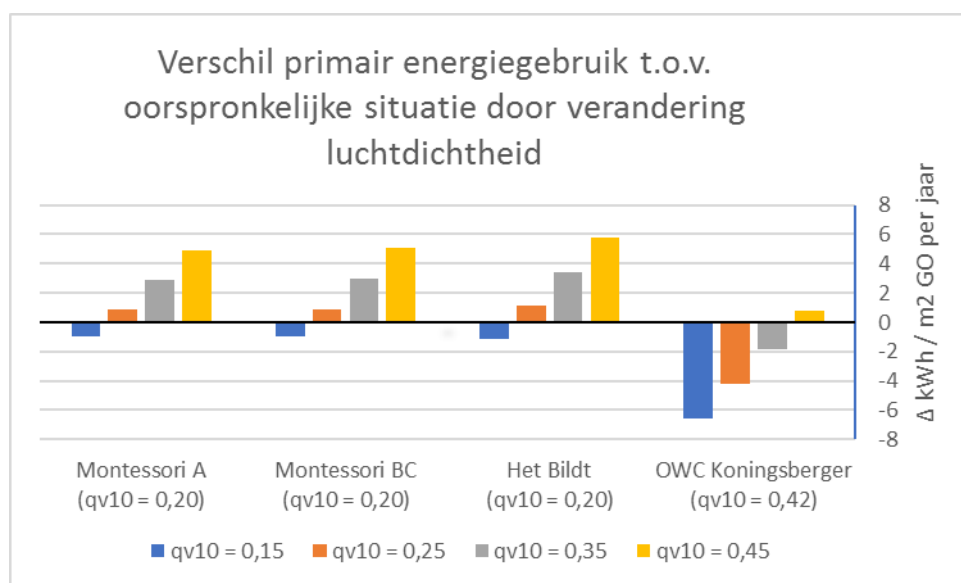
Tabel D2 Eisen Frisse Scholen (RVO,2008)

Eis	Frisse scholen Klasse C	Frisse Scholen Klasse B
Energieprestatie	Energielabel is minstens A++	Energielabel is minsten A+++
Binnen luchtkwaliteit	De CO ₂ -concentratie in groepsruimten (in de ademzone) is tijdens gebruikstijd maximaal 1.200 ppm (parts per million).	De CO ₂ -concentratie in groepsruimten (in de ademzone) is tijdens gebruikstijd maximaal 950 ppm.
Ventilatiecapaciteit	Om aan de Klasse C-eis te voldoen is normaliter een ventilatiecapaciteit vereist van minimaal 6 dm ³ /s (21,6 m ³ /uur) per persoon	Om aan de Klasse B-eis te voldoen is normaliter een ventilatiecapaciteit vereist van minimaal 8,5 dm ³ /s (30,6 m ³ /uur) per persoon.
Capaciteit spuiventilatie	De capaciteit van de spuiventilatievoorzieningen is minimaal 6 dm ³ /s per m ² vloeroppervlak.	De capaciteit van de spuiventilatievoorzieningen is minimaal 6 dm ³ /s per m ² vloeroppervlak.
Te openen ramen	Groepsruimten hebben ten minste 4 te openen ramen	Groepsruimten hebben ten minste 4 te openen ramen
Recirculatie	Er wordt geen gebruik gemaakt van recirculatie, behalve in all-airsystemen omwille van aanwarming van het gebouw buiten gebruikstijd.	Er wordt geen gebruik gemaakt van recirculatie, behalve in all-airsystemen omwille van aanwarming van het gebouw buiten gebruikstijd.
Operatieve temperatuur	De operatieve temperatuur ligt in het stookseizoen (beneden een gemiddelde buitentemperatuur van 10°C) tussen 19 en 25°C.	De operatieve temperatuur ligt in het stookseizoen tussen 20 en 24°C.
Verlichting	Kunstverlichting in de groepsruimten voldoet aan de eisen uit NEN-EN 12464-1:	Het verlichtingssterkte door kunstlicht is op werkvlakniveau minimaal 500 lux met een gelijkmatigheidsindex van minimaal 0,7.
Verlichtingssterkte	Het verlichtingssterkte door kunstlicht is op werkvlakniveau minimaal 300 lux met een gelijkmatigheidsindex van minimaal 0,7.	Het verlichtingssterkte door kunstlicht is op werkvlakniveau minimaal 300 lux met een gelijkmatigheidsindex van minimaal 0,7.
UGRL waarde verlichting	De UGRL (waarde voor de beperking van de 'verblindingshinder') van de in de groepsruimten toegepaste armaturen is ≤19	De UGRL (waarde voor de beperking van de 'verblindingshinder') van de in de groepsruimten toegepaste armaturen is ≤19
Kleurweergave index	De kleurweergave-index (Ra) van de verlichting is minimaal 80 of vergelijkbaar.	De kleurweergave-index (Ra) van de verlichting is minimaal 80 of vergelijkbaar.
Daglichtfactor	De daglichtfactor op het werkvlak in de groepsruimten is gemiddeld over de ruimte minimaal 3%.	De daglichtfactor op het werkvlak in de groepsruimten is gemiddeld over de ruimte minimaal 5%.

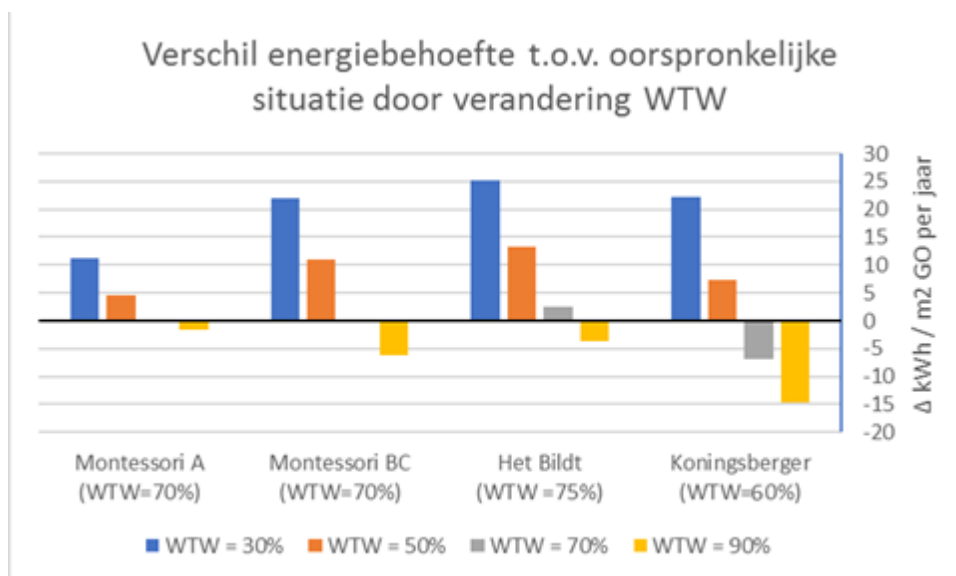
Bijlage E: Invloed individuele maatregelen



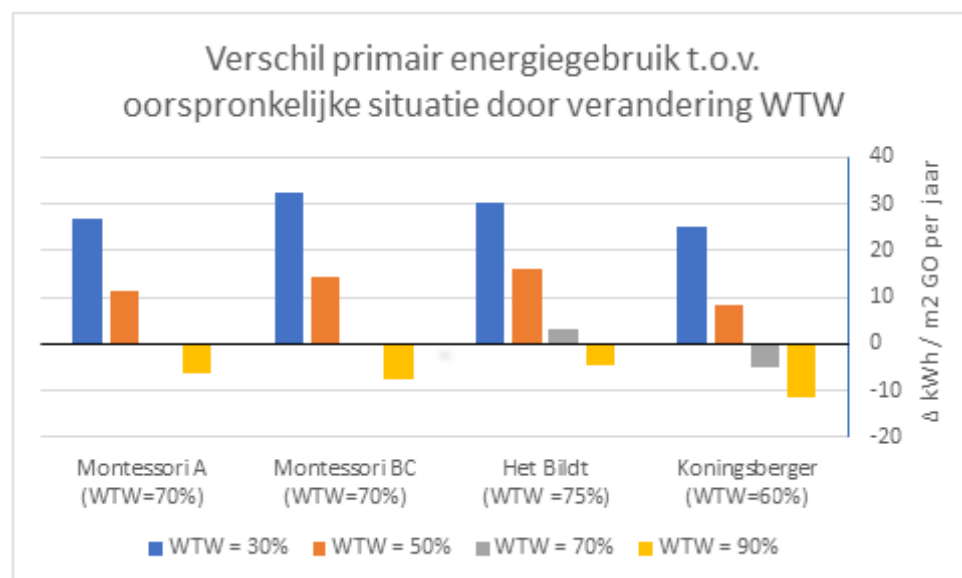
Figuur E.1 Invloed luchtdichtheid op energiebehoefte



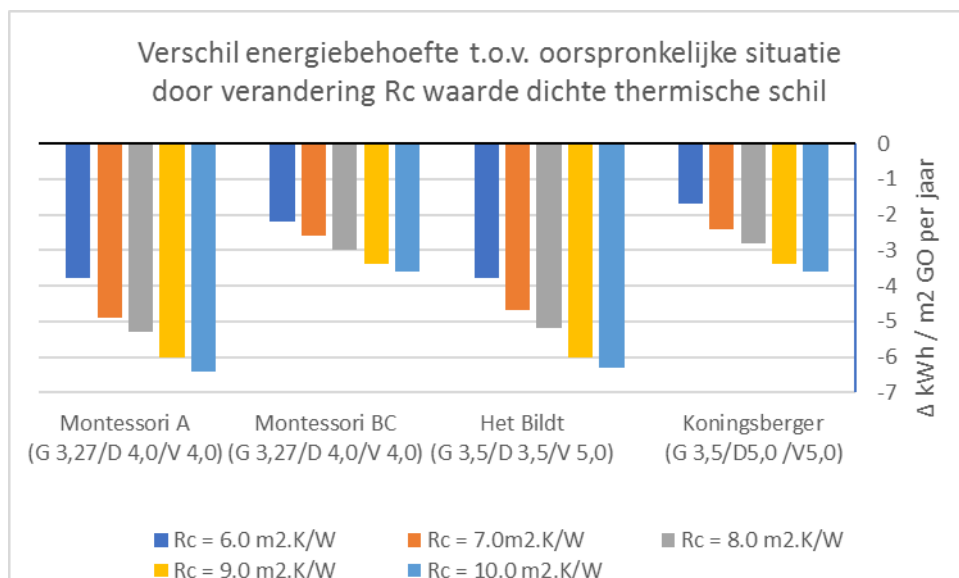
Figuur E.2 Invloed luchtdichtheid op primair energiegebruik



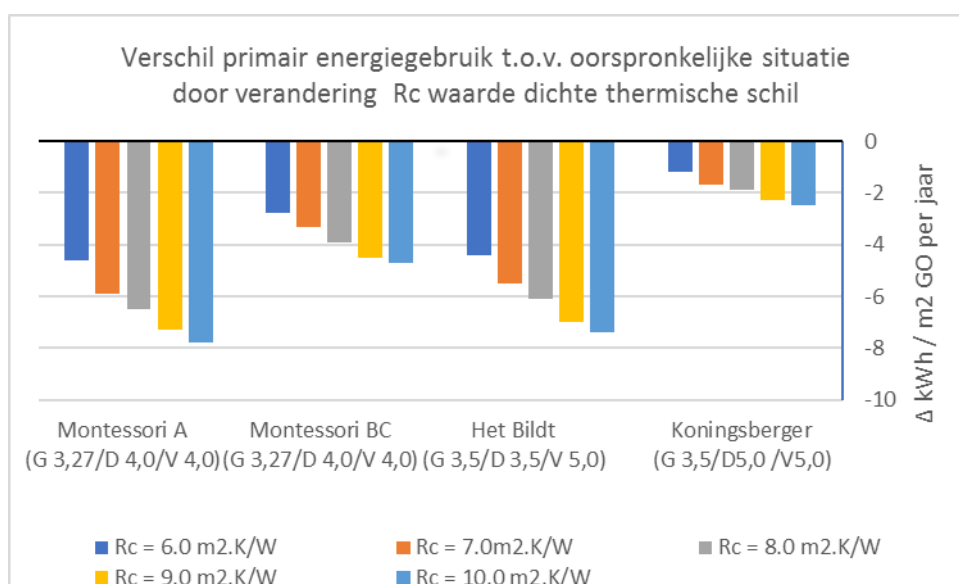
Figuur E.3 Invloed WTW op energiebehoefte



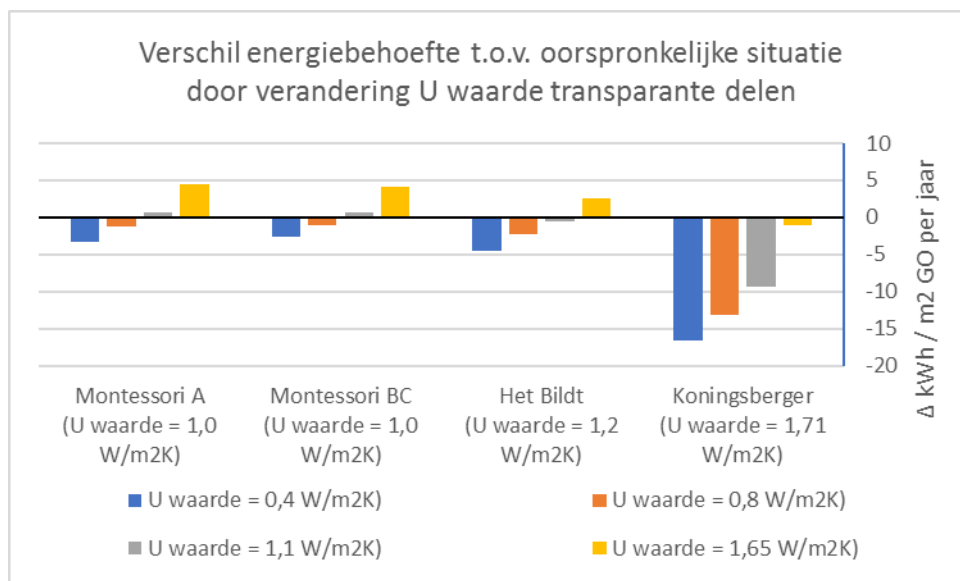
Figuur E.4 Invloed WTW op primair energieverbruik



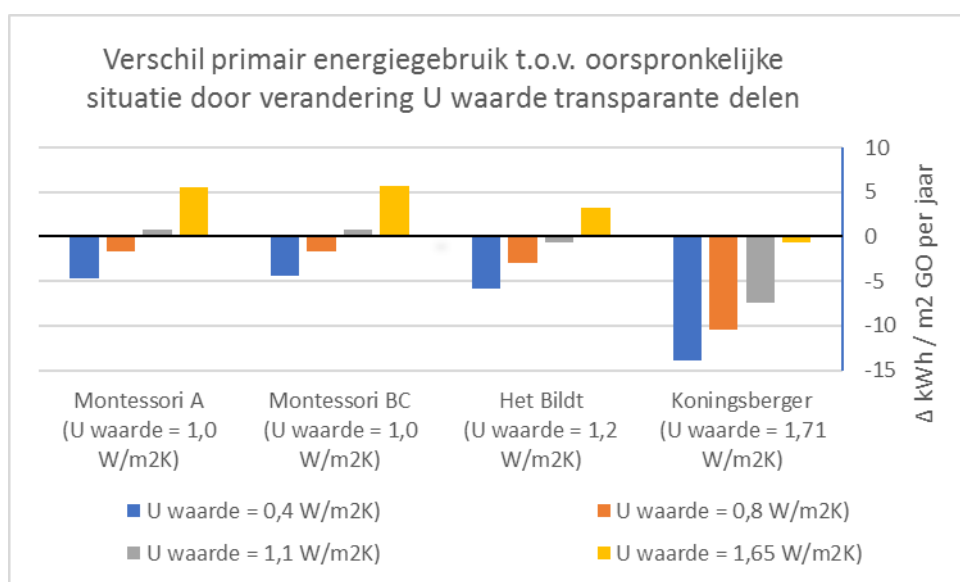
Figuur E.5 Invloed Rc waarde op energiebehoefte (G / D / V = Gevel / Dak / Vloer)



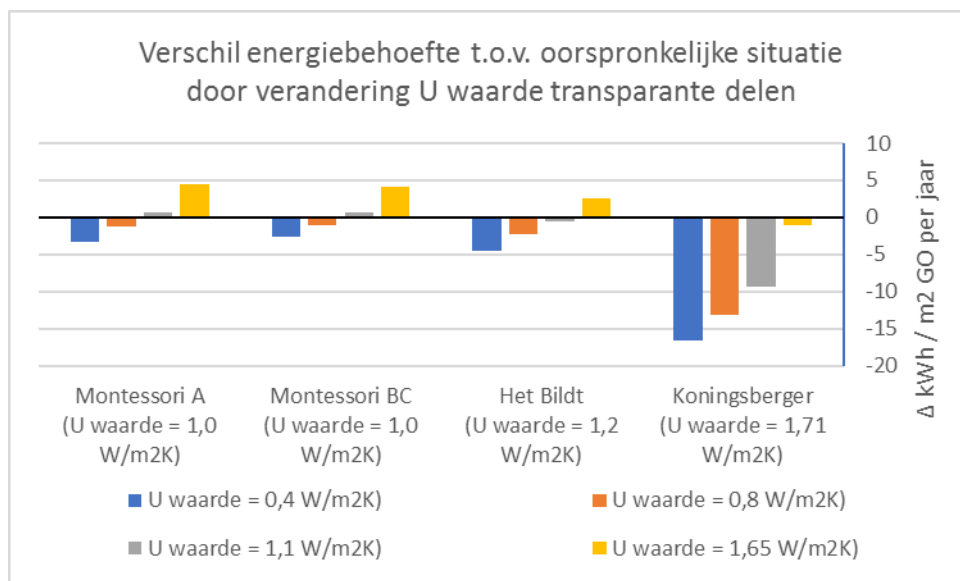
Figuur E.6 Invloed Rc waarde op primair energieverbruik (G / D / V = Gevel / Dak / Vloer)



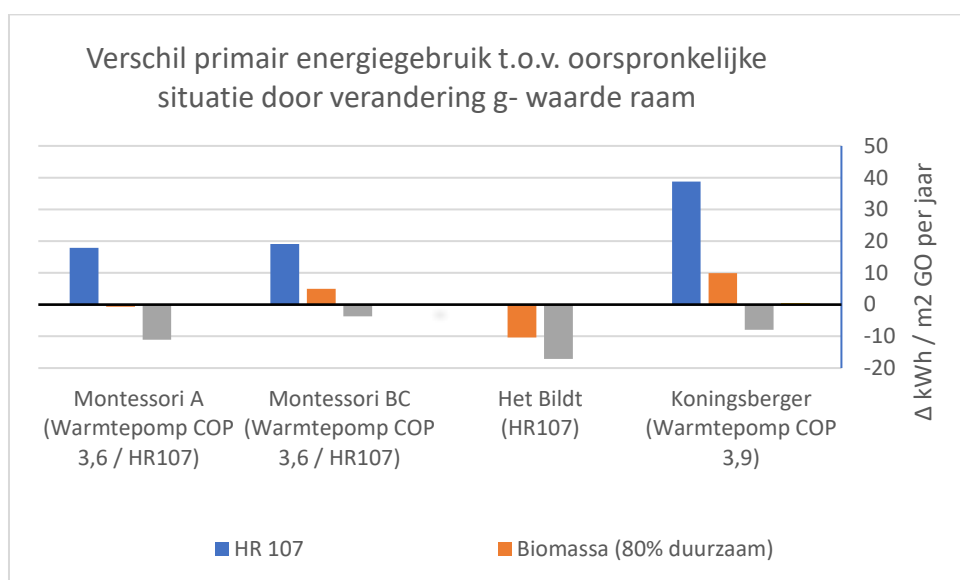
Figuur E.7 Invloed U waarde transparante delen op energiebehoefte



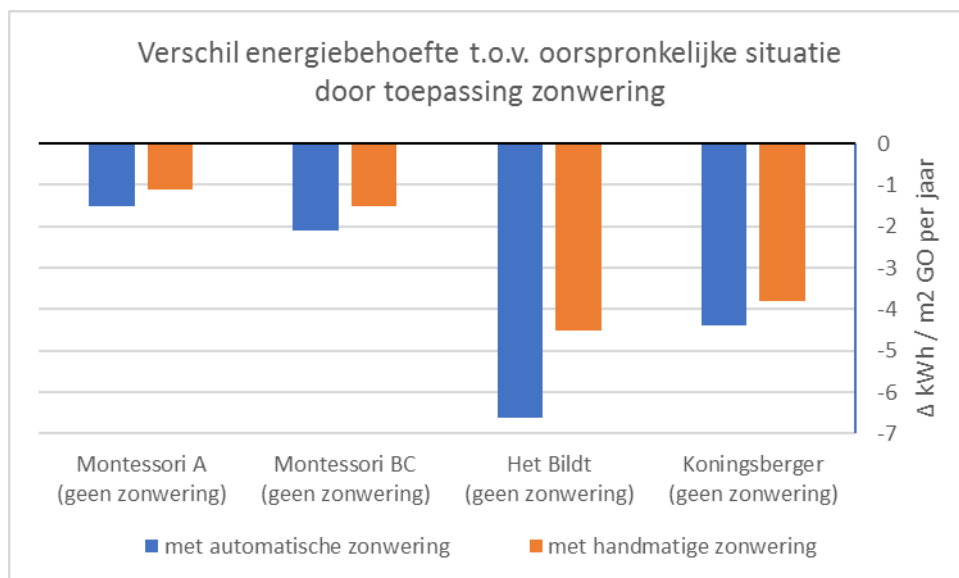
Figuur E.8 Invloed U waarde transparante delen op primair energiegebruik



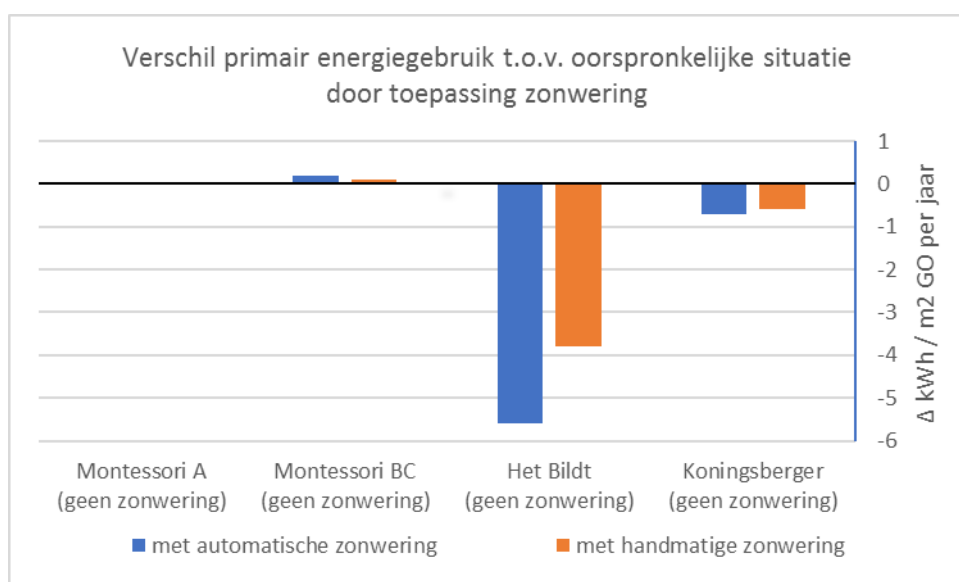
Figuur E.9 Invloed g-waarde transparante delen op energiebehoefte



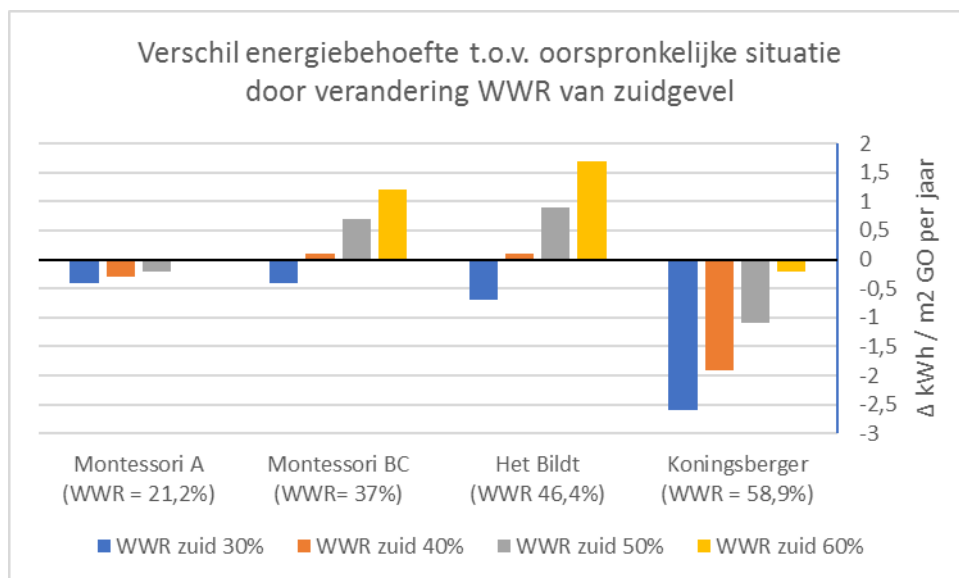
Figuur E.10 Invloed g-waarde transparante delen op primair energiegebruik



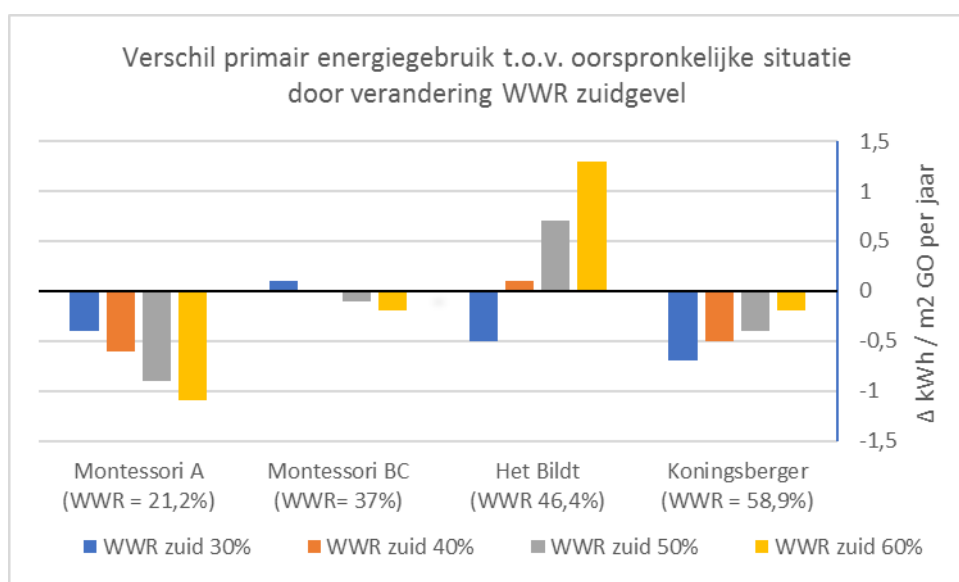
Figuur E.11 Invloed zonwering op energiebehoefte



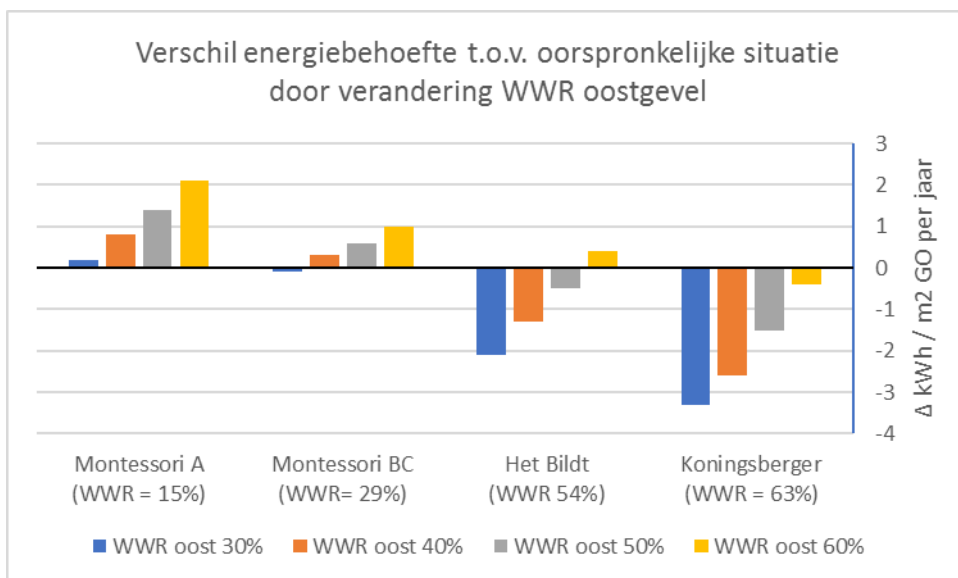
Figuur E.12 Invloed zonwering op primair energiegebruik



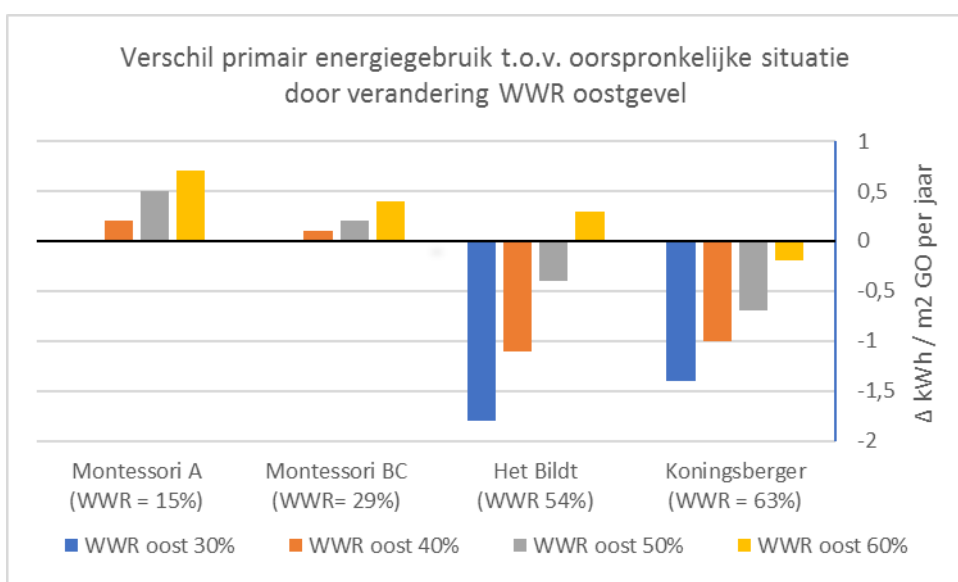
Figuur E.13 Invloed WWR zuid op energiebehoefte



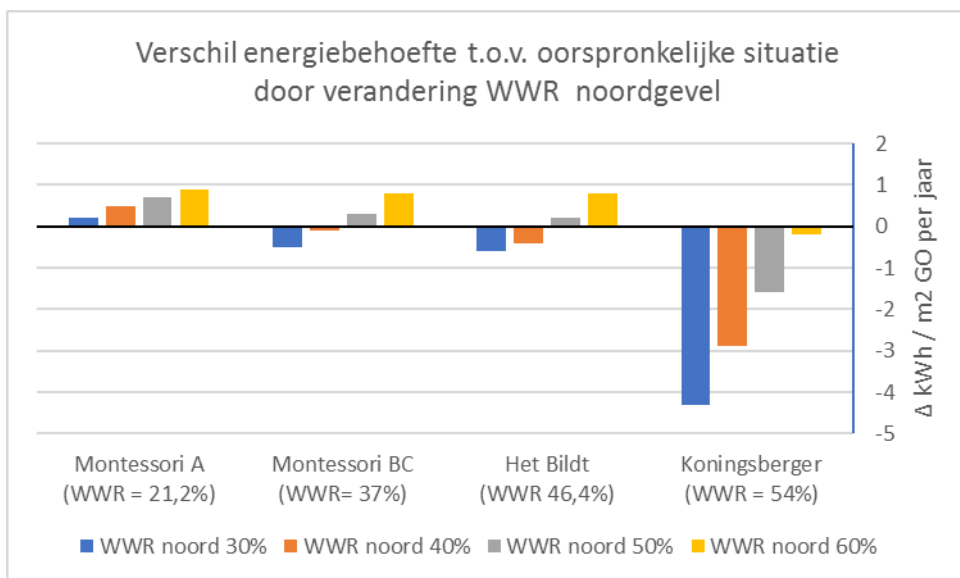
Figuur E.14 Invloed WWR zuid op primair energiegebruik



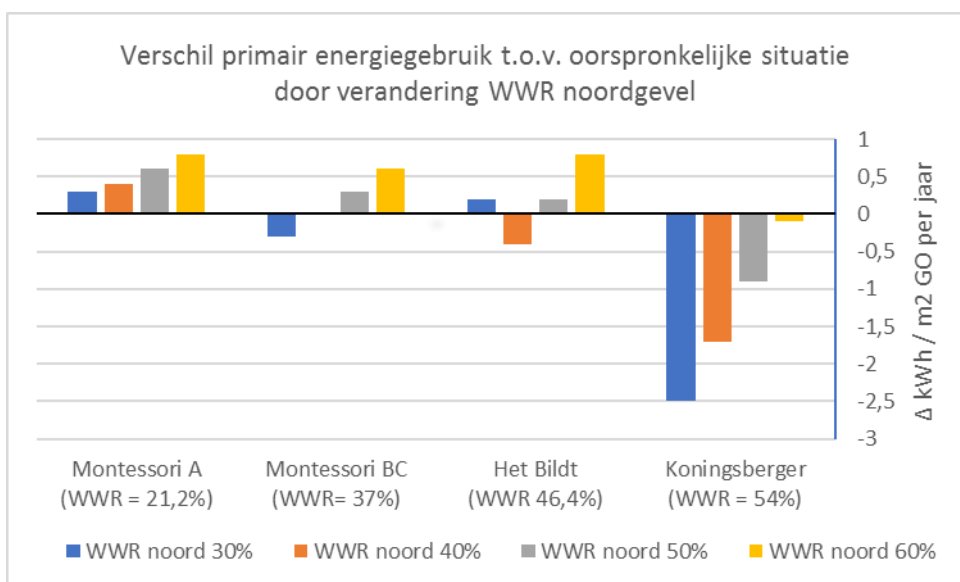
Figuur E.15 Invloed WWR oost op energiebehoefte



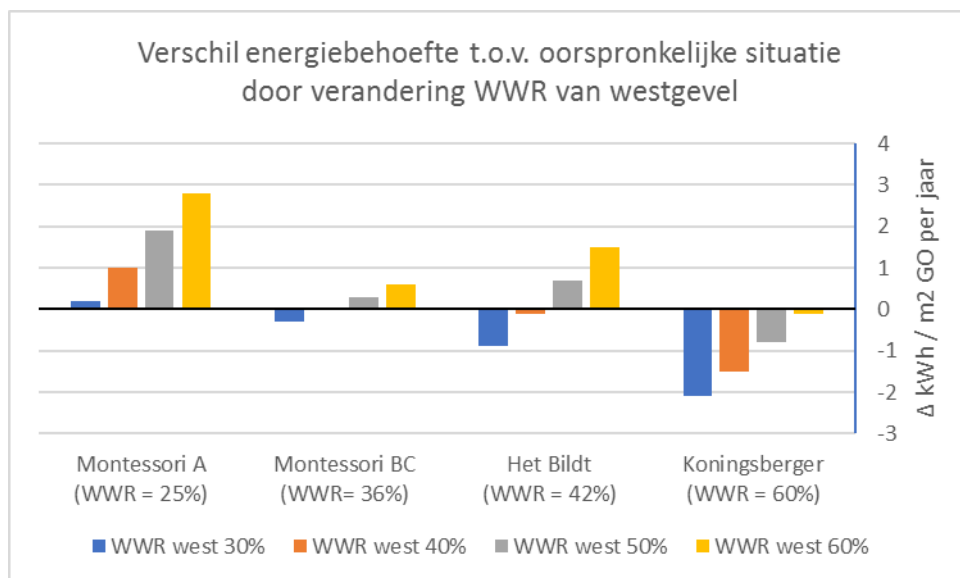
Figuur E.16 Invloed WWR oost op primair energieverbruik



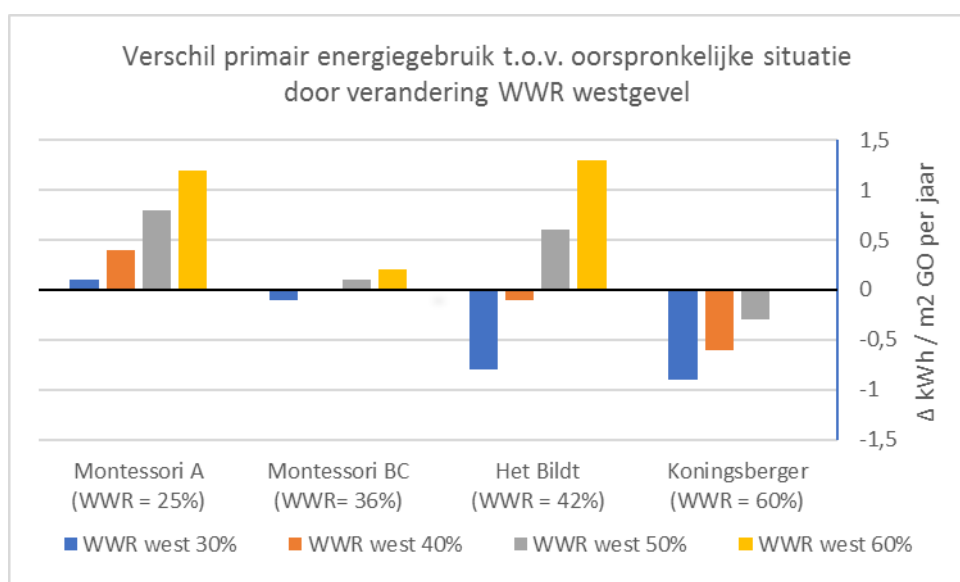
Figuur E.17 Invloed WWR noord op energiebehoefte



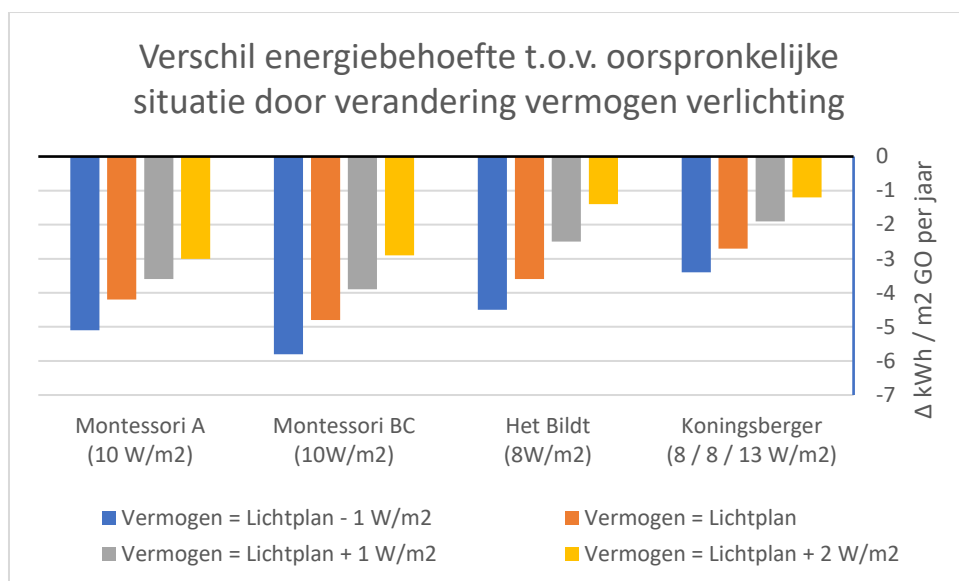
Figuur E.18 Invloed WWR noord op primair energiegebruik



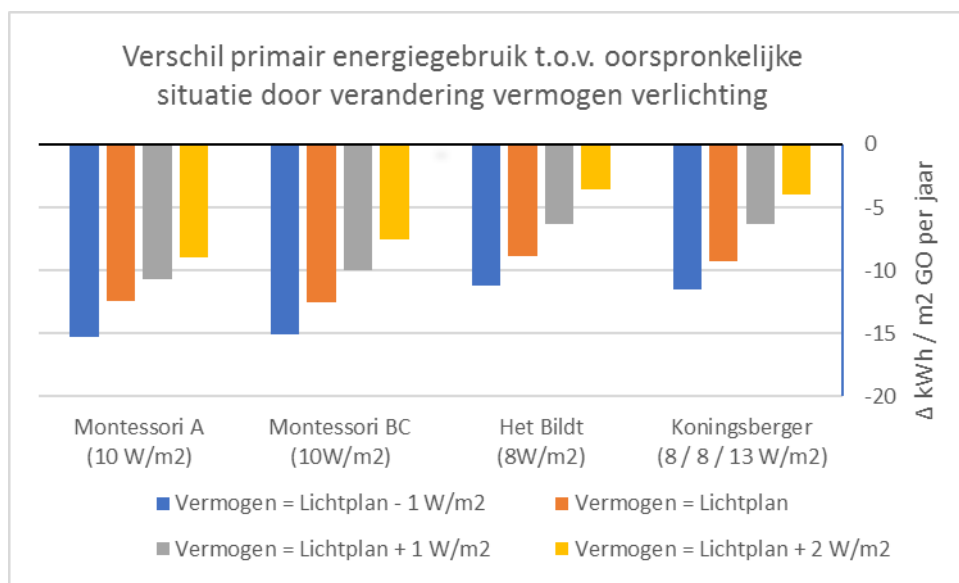
Figuur E.19 Invloed WWR west op energiebehoefte



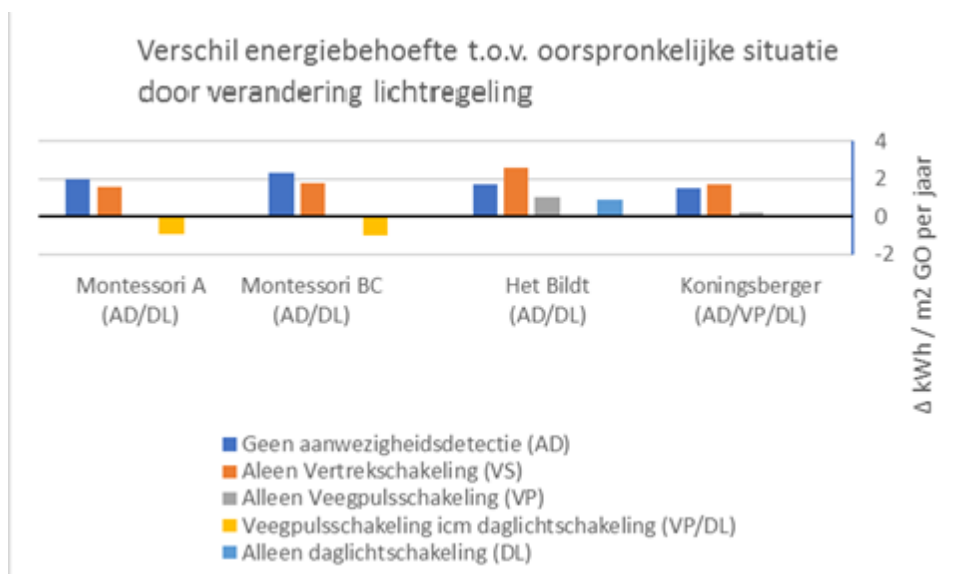
Figuur E.20 Invloed WWR west op primair energieverbruik



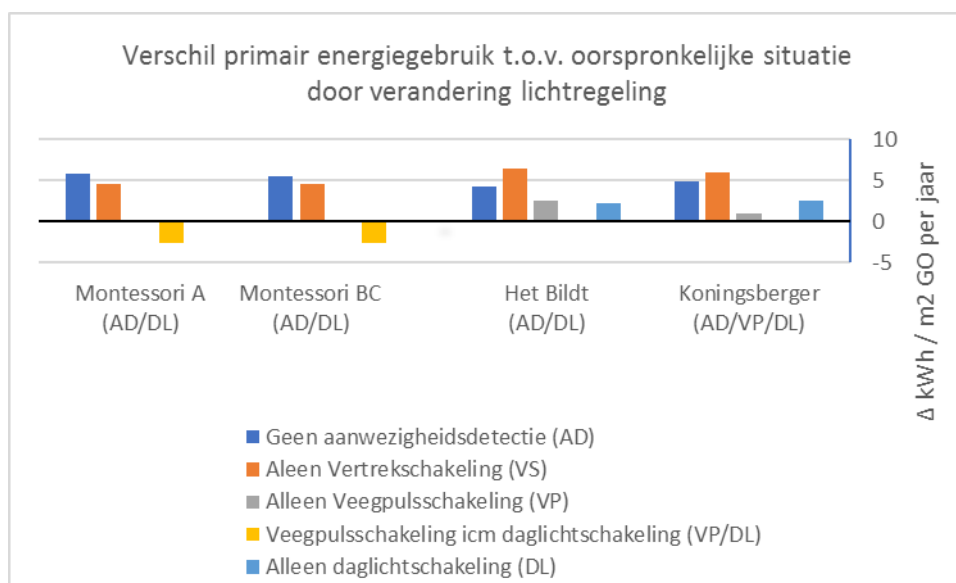
Figuur E.21 Invloed vermogen verlichting op energiebehoefte



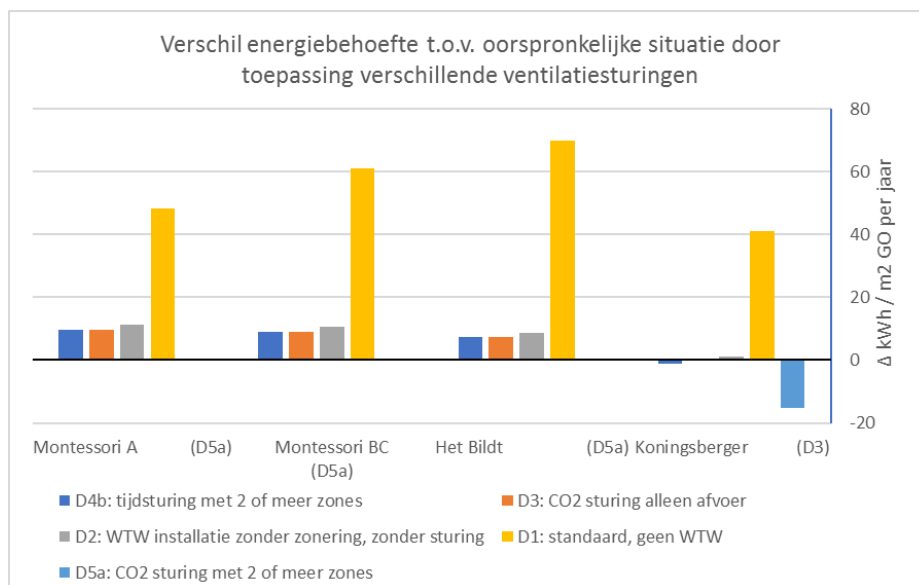
Figuur E.22 Invloed vermogen verlichting op primair energiegebruik



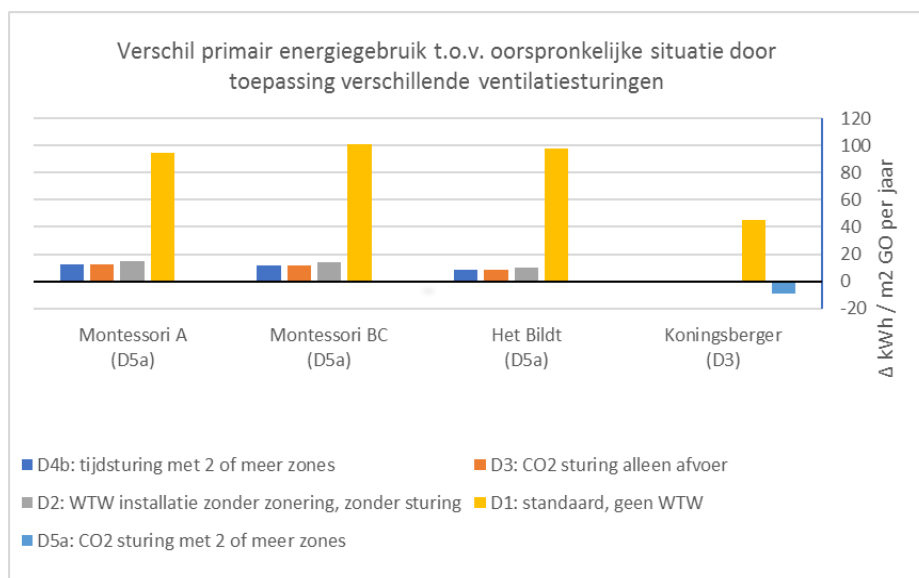
Figuur E.23 Invloed lichtregelingen op energiebehoefte



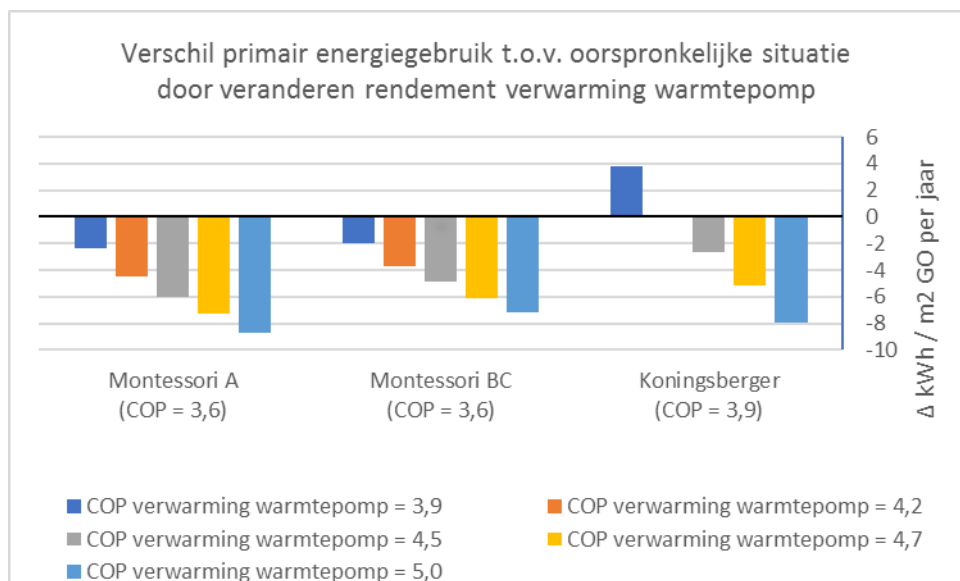
Figuur E.24 Invloed lichtregelingen op primair energiegebruik



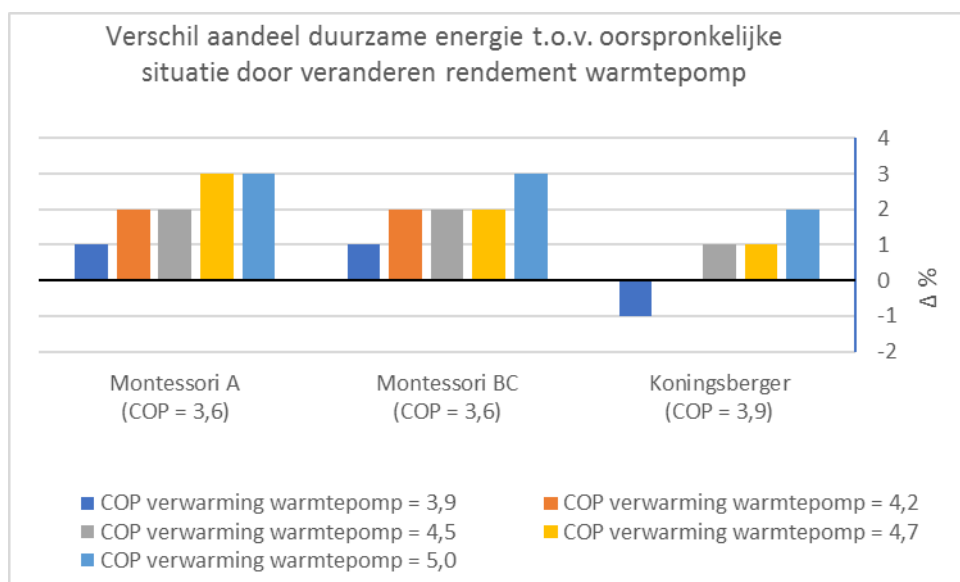
Figuur E.25 Invloed ventilatiesturing op energiebehoefte



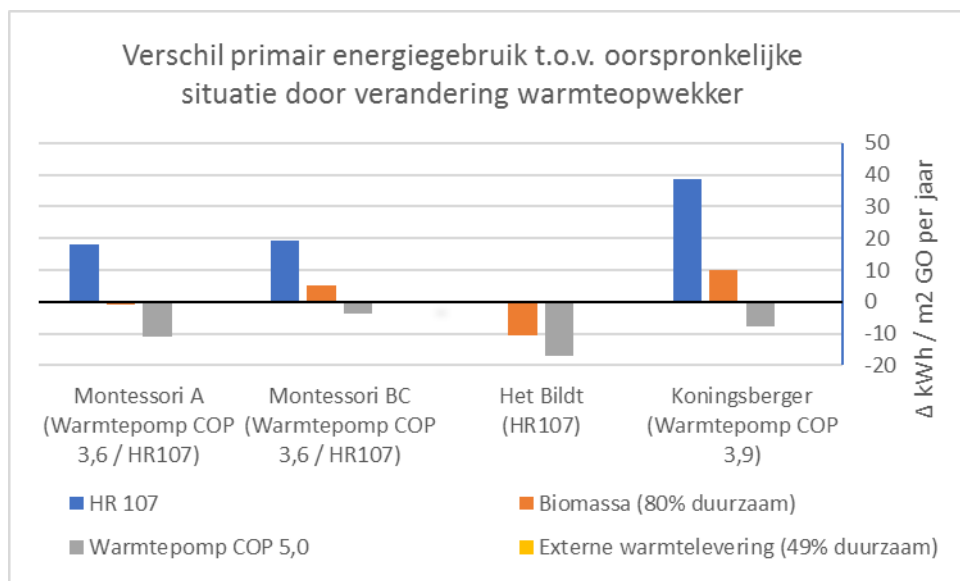
Figuur E.26 Invloed ventilatiesturing op primair energieverbruik



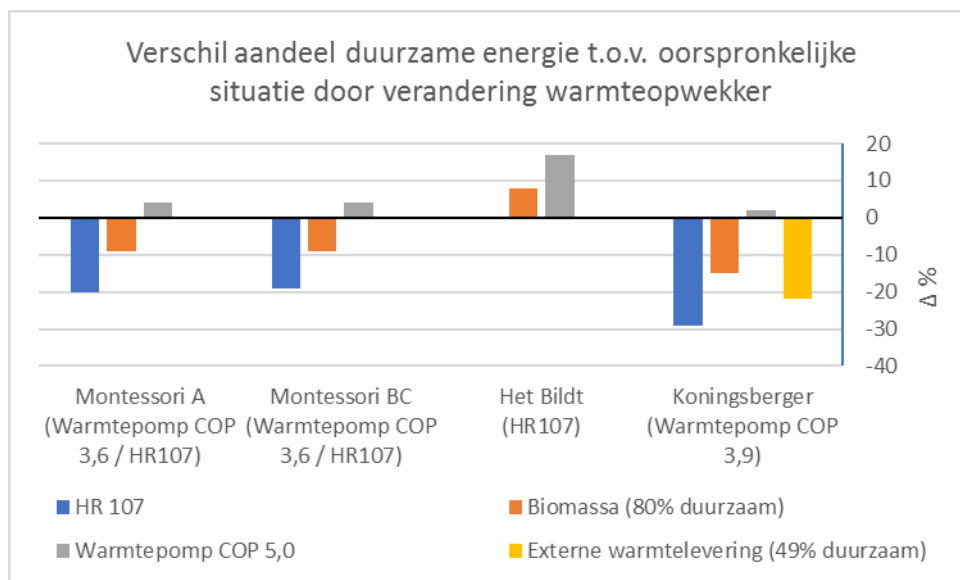
Figuur E.27 Invloed COP waarde warmtepomp op primair energiegebruik



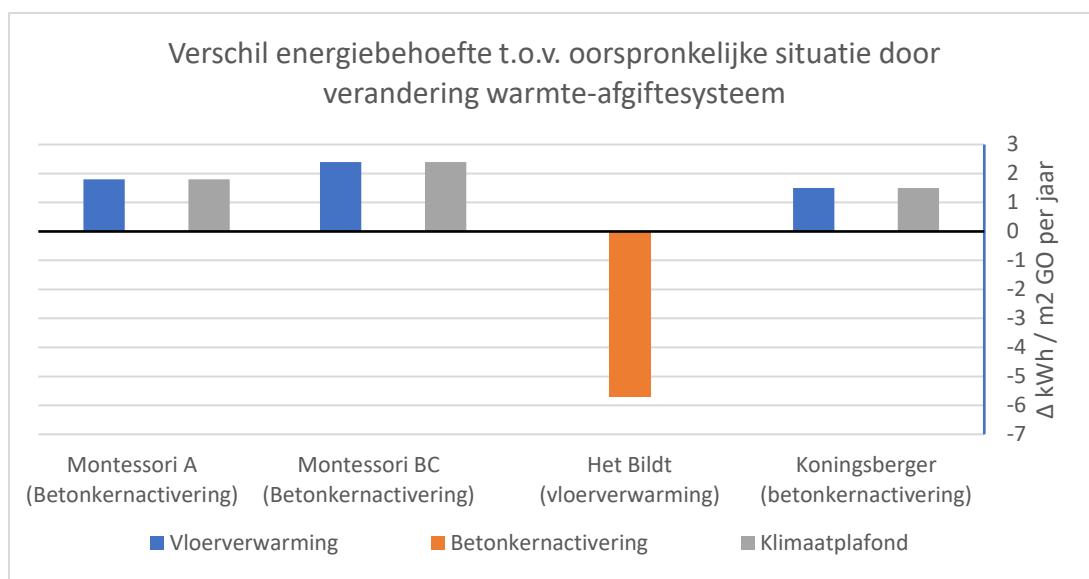
Figuur E.28 9 Invloed COP waarde warmtepomp op aandeel duurzame energie



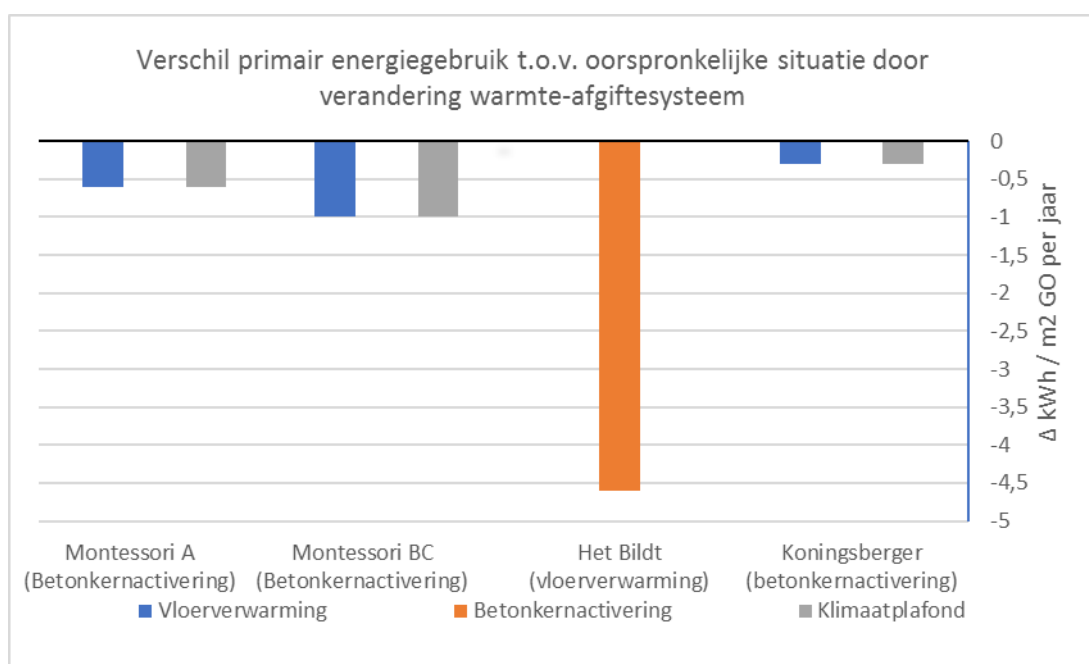
Figuur E.29 Invloed keuze warmte-opwrekker op primair energiegebruik



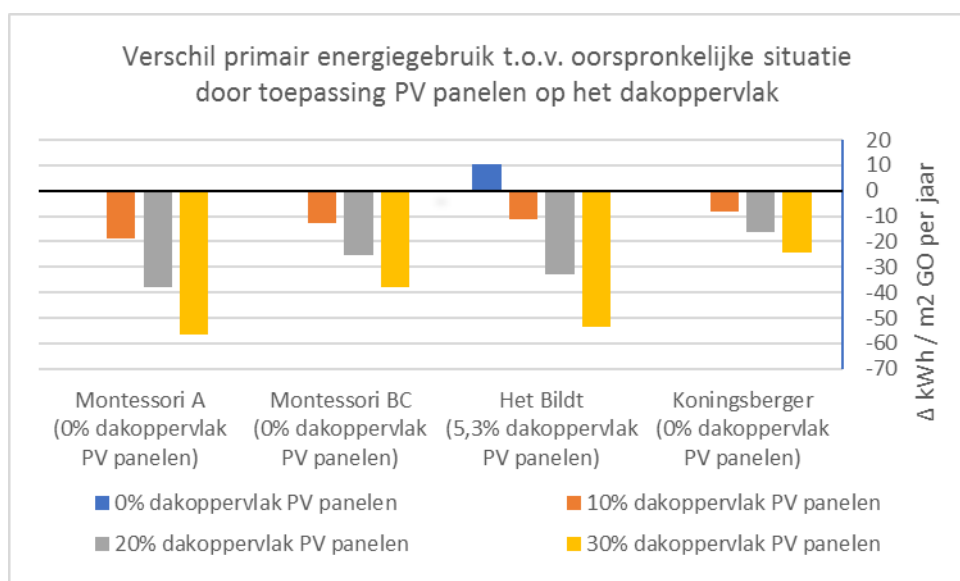
Figuur E.30 Invloed keuze aandeel warmte-opwrekker op aandeel duurzame energie



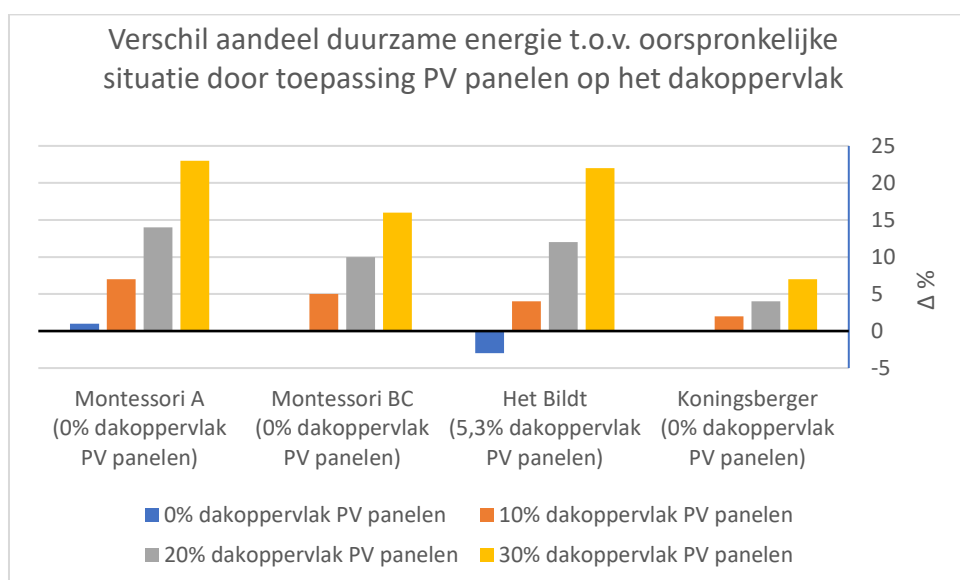
Figuur E.31 Invloed warmteafgiftesysteem op energiebehoefte



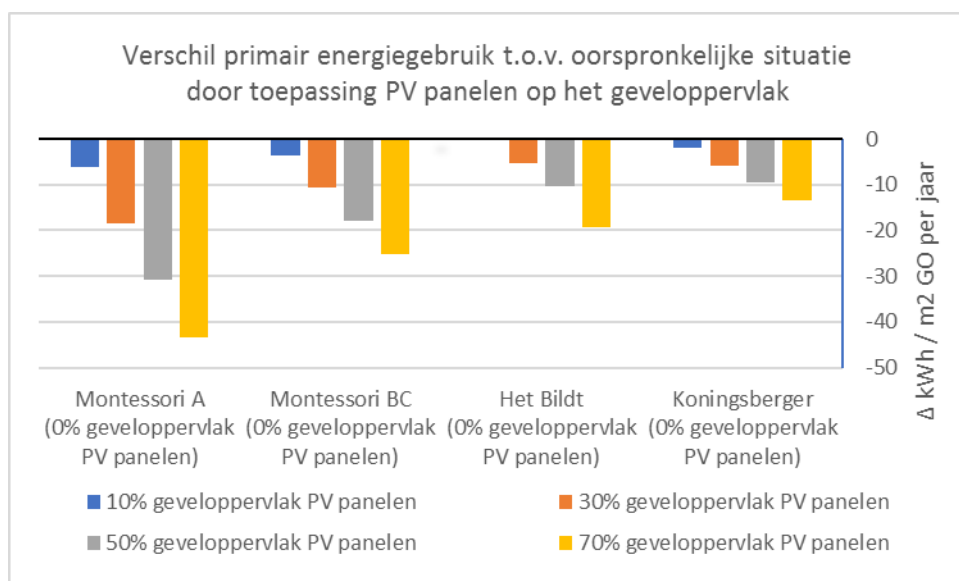
Figuur E.32 Invloed warmteafgiftesysteem op primair energiegebruik



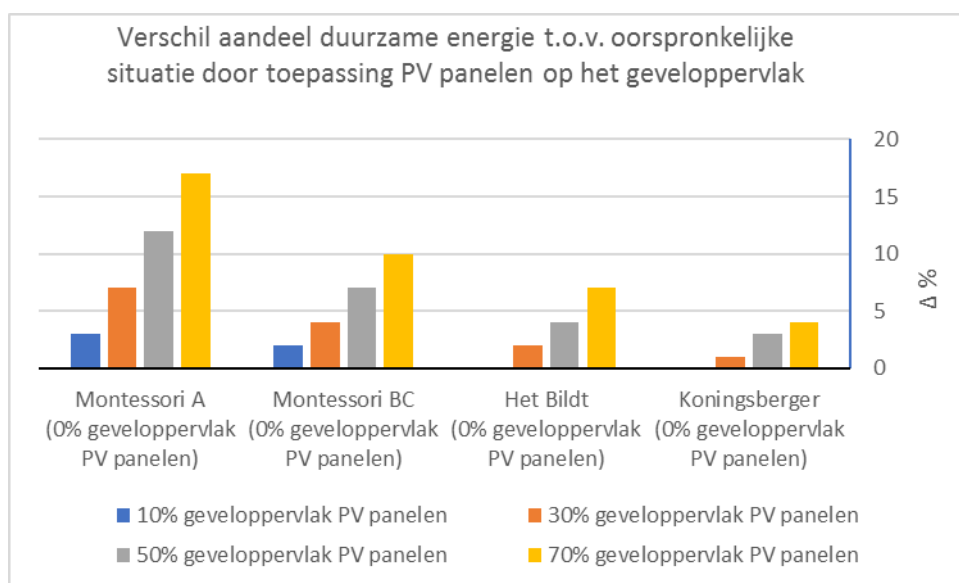
Figuur E.33 Invloed PV panelen op dakoppervlak op primair energiegebruik



Figuur E.34 Invloed PV panelen op aandeel duurzame energie



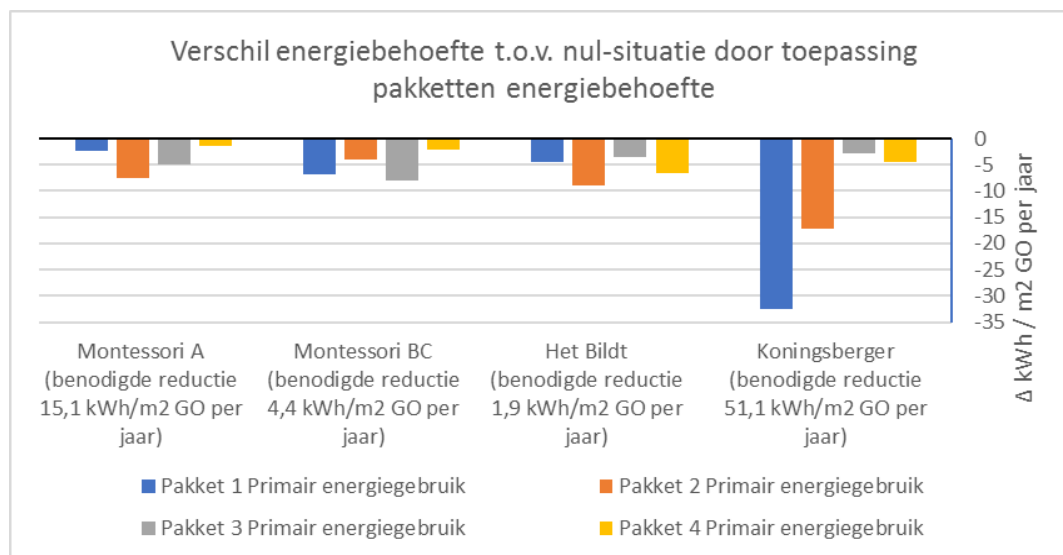
Figuur E.35 Invloed van PV panelen op het geveloppervlak op primair energiegebruik



Figuur E.36 Invloed van PV panelen op het geveloppervlak op aandeel duurzame energie

Bijlage F: Invloed van individuele maatregelpakketten

F.1 Energiebehoefte



Figuur F.1 Invloed individuele pakketten energiebehoefte

Tabel F.1 Benodigde maatregelpakketten om te voldoen aan de BENG eis voor energiebehoefte voor Montessori A

Deeloplossing	Combinatie	Energiebehoefte	Primair energiegebruik	Aandeel duurzame energie
Energiebehoefte 1 Montessori A	Pakket EB 2, EB 3 en EB 4	49,8 kWh/m² per jaar	104,1 kWh/m² per jaar	20%

Tabel F.2 Benodigde maatregelpakketten om te voldoen aan de BENG eis voor energiebehoefte voor Montessori BC

Deeloplossing	Combinatie	Energiebehoefte	Primair energiegebruik	Aandeel duurzame energie
Energiebehoefte 1 Montessori BC	Pakket EB 1 + voldoen aan eisen warmteweerstand	46,7 kWh/m² per jaar	108,2 kWh/m² per jaar	15 %
Energiebehoefte 2 Montessori BC	Pakket EB 2 en EB 4	48,1 kWh/m² per jaar	112,3 kWh/m² per jaar	17 %
Energiebehoefte 3 Montessori BC	Pakket EB 3 + voldoen aan eisen warmteweerstand	44,9 kWh/m² per jaar	95,2 kWh/m² per jaar	23 %

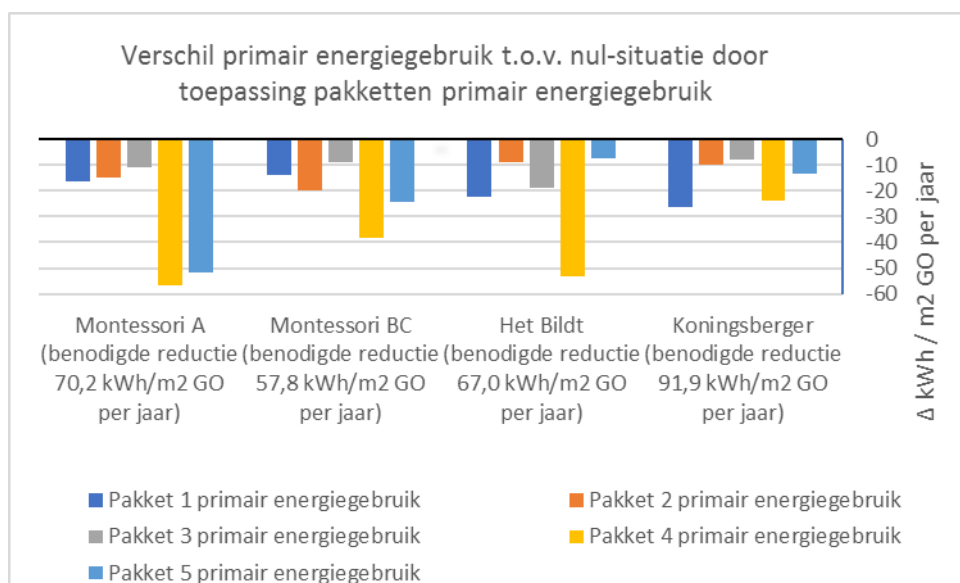
Tabel F.3 Benodigde maatregelpakketten om te voldoen aan de BENG eis voor energiebehoefte voor het Bildt

Deeloplossing	Combinatie	Energiebehoefte	Primair energiegebruik	Aandeel duurzame energie
Energiebehoefte 1 Het Bildt	Pakket EB 1 + voldoen aan eisen warmteweerstand	46,1 kWh/m ² per jaar	120,0 kWh/m ² per jaar	3%
Energiebehoefte 2 Het Bildt	Pakket EB 2	42,9 kWh/m ² per jaar	116,0 kWh/m ² per jaar	3%
Energiebehoefte 3 Het Bildt	Pakket EB 3 + voldoen aan eisen warmteweerstand	46,7 kWh/m ² per jaar	115,7 kWh/m ² per jaar	4%
Energiebehoefte 4 Het Bildt	Pakket EB 4 + voldoen aan eisen warmteweerstand	43,1 kWh/m ² per jaar	118,8 kWh/m ² per jaar	3%

Tabel F.4 Benodigde maatregelpakketten om te voldoen aan de BENG eis voor energiebehoefte voor het Koningsbergergebouw

Deeloplossing	Combinatie	Energiebehoefte	Primair energiegebruik	Aandeel duurzame energie
Energiebehoefte 1 Koningsberger	Pakket EB 1, EB 2, EB 3 en EB 4	43,8 kWh / m ² per jaar	105,0 kWh/m ² per jaar	15%

F.2 Primair Energiegebruik



Figuur F.2 Invloed pakketten primair energiegebruik op Primair Energiegebruik

Tabel F.5 Benodigde maatregelpakketten om te voldoen aan de BENG eis voor het primair energiegebruik voor Montessori A

Deeloplossing	Combinatie	Energiebehoefte	Primair energiegebruik	Aandeel duurzame energie
Primair Energiegebruik 1 Montessori A	Pakket PE 1, PE 2, PE 3 en PE 5	49,0 kWh/m ² per jaar	40,5 kWh/m ² per jaar	52%
Primair energiegebruik 2 Montessori A	Pakket PE 1 en PE 4	56,6 kWh/m ² per jaar	58,5 kWh/m ² per jaar	55,2%
Primair energiegebruik 3 Montessori A	Pakket PE 2 en PE 4 + voldoen aan eisen warmteweerstand	57,5 kWh/m ² per jaar	55,2 kWh/m ² per jaar	50%
Primair energiegebruik 4 Montessori A	Pakket PE 4 en PE 5 + voldoen aan eisen warmteweerstand	62,5 kWh/m ² per jaar	19,2 kWh/m ² per jaar	79%

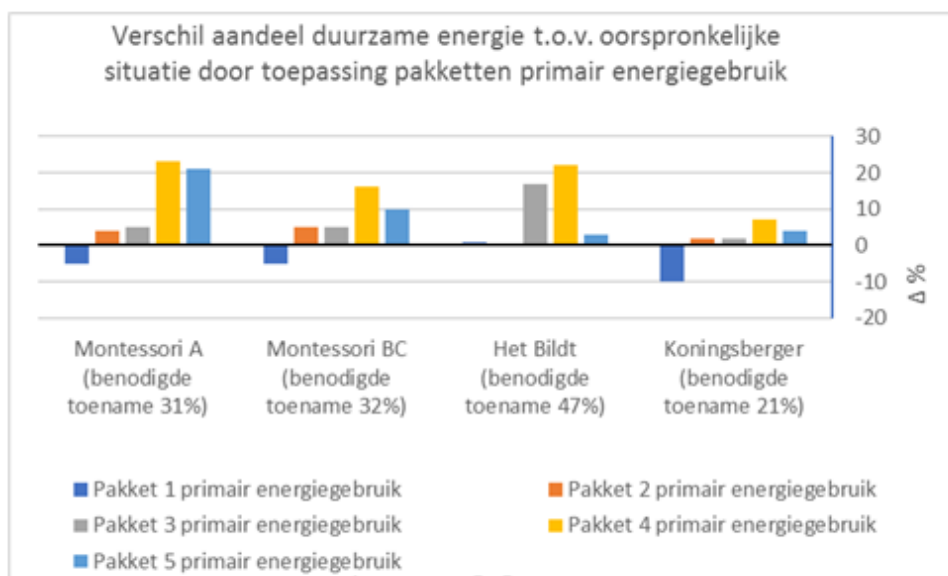
Tabel F.6 Benodigde maatregelpakketten om te voldoen aan de BENG eis voor energiebehoefte voor Montessori BC

Deeloplossing	Combinatie	Energiebehoefte	Primair energiegebruik	Aandeel duurzame energie
PE 1 Montessori BC	Pakket PE 1, PE 2, PE 3, PE 5	33,6 kWh / m ² per jaar	56,5 kWh / m ² per jaar	35%
PE 2 Montessori BC	Pakket PE 2 en PE 4	57,5 kWh / m ² per jaar	55,2 kWh / m ² per jaar	50%
PE 3 Montessori BC	Pakket PE 4 en PE 5	53,4 kWh / m ² per jaar	55,8 kWh / m ² per jaar	47%

Tabel F.7 Benodigde maatregelpakketten om te voldoen aan de BENG eis voor energiebehoefte voor het Bildt

Deeloplossing	Combinatie	Energiebehoefte	Primair energiegebruik	Aandeel duurzame energie
PE 1 Het Bildt	Pakket PE 1 en PE 4	39,4 kWh / m ² per jaar	56,5 kWh / m ² per jaar	31%
PE 2 Het Bildt	Pakket PE 2 en PE 4	42,5 kWh / m ² per jaar	49,3 kWh / m ² per jaar	49%
PE 3 Het Bildt	Pakket PE 4 en PE 5	51,8 kWh / m ² per jaar	53,7 kWh / m ² per jaar	38%

F.3 Aandeel duurzame energie



Figuur F.3 Invloed pakketten primair energiegebruik op Aandeel duurzame energie

Tabel F.8 Benodigde maatregelpakketten om te voldoen aan de BENG eis voor het aandeel duurzame energie voor Montessori A

Deeloplossing	Combinatie	Energiebehoefte	Primair energiegebruik	Aandeel duurzame energie
Aandeel duurzame energie 1 Montessori A	Pakket PE 1, PE 2, PE 3 en PE 5	49,0 kWh / m ² per jaar	40,5 kWh / m ² per jaar	52 %
Aandeel duurzame energie 2 Montessori A	Pakket PE 2 en PE 4 (+ Voldoen eisen thermische schil)	57,5 kWh / m ² per jaar	55,2 kWh / m ² per jaar	50 %
Aandeel duurzame energie 3 Montessori A	Pakket PE 4 en PE 5 (+ Voldoen eisen thermische schil)	62,9 kWh / m ² per jaar	19,2 kWh / m ² per jaar	79 %

Tabel F.9 Benodigde maatregelpakketten om te voldoen aan de BENG eis voor het aandeel duurzame energie voor Montessori BC

Deeloplossing	Combinatie	Energiebehoefte	Primair energiegebruik	Aandeel duurzame energie
Aandeel duurzame energie 1 Montessori BC	Pakket PE 1, PE 2, PE 3 en PE 4	30,3 kWh / m ² per jaar	35,2 kWh / m ² per jaar	50 %
Aandeel duurzame energie 2 Montessori BC	Pakket PE 1, PE 4 en PE 5	31,8 kWh / m ² per jaar	17,4 kWh / m ² per jaar	71 %
Aandeel duurzame energie 3 Montessori BC	Pakket PE 2, PE 4 en PE 5 (+ Voldoen eisen thermische schil)	43,3 kWh / m ² per jaar	31,5 kWh / m ² per jaar	63 %
Aandeel Duurzame energie 4 Montessori BC	Pakket PE 3, PE 4 en PE 5 (+ Voldoen eisen thermische schil)	46,8 kWh / m ² per jaar	36,3 kWh / m ² per jaar	61 %

Tabel F.10 Benodigde maatregelpakketten om te voldoen aan de BENG eis voor het aandeel duurzame energie voor Het Bildt

Deeloplossing	Combinatie	Energiebehoefte	Primair energiegebruik	Aandeel duurzame energie
Aandeel duurzame energie 1 Het Bildt	Pakket PE 1, PE 2, PE 3 en PE 4	24,3 kWh / m ² per jaar	26,8 kWh / m ² per jaar	57 %
Aandeel duurzame energie 2 Het Bildt	Pakket PE 1, PE 2, PE 4 en PE 5	34,8 kWh / m ² per jaar	27,8 kWh / m ² per jaar	54 %
Aandeel duurzame energie 3 Het Bildt	Pakket PE 3, PE 4 en PE 5 (+ Voldoen eisen thermische schil)	43,1 kWh / m ² per jaar	31,7 kWh / m ² per jaar	64 %

Bijlage G: Oplossingen voor de cases

Tabel G.1 Overzicht oplossing BENG-wetgeving Montessori A

Montessori A	
Oplossing 1	Rc waarde thermische schil = 10 m ² K/W U waarde transparante delen gevel = 0,7 W/m ² K Automatische zonwering Q _{v,10} waarde = 0,15 dm ³ /s.m ² Ventilatieregeling D5a Warmteterugwinning = 90% Efficiënte LED verlichting Aanwezigheidsdetectie, veegpuls-schakeling en daglichtschakeling Warmtepomp COP 5 Betonkernactivering met LTV en HTK Pv panelen op 70% van het dichte geveloppervlak
Oplossing 2	Efficiënte LED verlichting Aanwezigheidsdetectie, veegpuls-schakeling en daglichtschakeling PV panelen op 30% van het dakoppervlak Rc waarde thermische schil = 10 m ² K/W U waarde transparante delen gevel = 0,7 W/m ² K Automatische zonwering

Tabel G.2 Overzicht oplossing BENG-wetgeving Montessori BC

Montessori BC	
Oplossing 1	Rc waarde thermische schil = 10 m ² K/W U waarde transparante delen gevel = 0,7 W/m ² K Automatische zonwering Q _{v,10} waarde = 0,15 dm ³ /s.m ² Ventilatieregeling D5a Warmteterugwinning = 90% Efficiënte LED verlichting Aanwezigheidsdetectie, veegpuls-schakeling en daglichtschakeling Warmtepomp COP 5 Betonkernactivering met LTV en HTK Pv panelen op 30% van het dakoppervlak
Oplossing 2	Rc waarde thermische schil = 10 m ² K/W U waarde transparante delen gevel = 0,7 W/m ² K Automatische zonwering Q _{v,10} waarde = 0,15 dm ³ /s.m ² Ventilatieregeling D5a Warmteterugwinning = 90% Pv panelen op 30% van het dakoppervlak PV panelen op 70% van het dichte geveloppervlak
Oplossing 3	Efficiënte LED verlichting Aanwezigheidsdetectie, veegpuls-schakeling en daglichtschakeling Pv panelen op 30% van het dakoppervlak PV panelen op 70% van het dichte geveloppervlak
Oplossing 4	Warmtepomp COP 5 Betonkernactivering met LTV en HTK Pv panelen op 30% van het dakoppervlak PV panelen op 70% van het dichte geveloppervlak

Tabel G.3 Overzicht oplossing BENG-wetgeving

Het Bildt	
Oplossing 1	Rc waarde thermische schil = 10 m ² K/W U waarde transparante delen gevel = 0,7 W/m ² K Automatische zonwering Q _{v,10} waarde = 0,15 dm ³ /s.m ² Ventilatieregeling D5a Warmteterugwinning = 90% Efficiënte LED verlichting Aanwezigheidsdetectie, veegpuls-schakeling en daglichtschakeling Warmtepomp COP 5 Betonkernactivering met LTV en HTK Pv panelen op 30% van het dakoppervlak
Oplossing 2	Rc waarde thermische schil = 10 m ² K/W U waarde transparante delen gevel = 0,7 W/m ² K Automatische zonwering Q _{v,10} waarde = 0,15 dm ³ /s.m ² Ventilatieregeling D5a Warmteterugwinning = 90% Efficiënte LED verlichting Aanwezigheidsdetectie, veegpuls-schakeling en daglichtschakeling Pv panelen op 30% van het dakoppervlak PV panelen op 70% van het dakoppervlak
Oplossing 3	Warmtepomp COP 5 Betonkernactivering met LTV en HTK Pv panelen op 30% van het dakoppervlak PV panelen op 70% van het dakoppervlak

Tabel G.4 Overzicht oplossing BENG-wetgeving

Koningsberger	
Oplossing 1	Rc waarde thermische schil = 10 m ² K/W U waarde transparante delen gevel = 0,7 W/m ² K Automatische zonwering Q _{v,10} waarde = 0,15 dm ³ /s.m ² Ventilatieregeling D5a Warmteterugwinning = 90% Efficiënte LED verlichting Aanwezigheidsdetectie, veegpuls-schakeling en daglichtschakeling + Gebiedsmaatregelen evt. met PE maatregelpakketten om te voldoen aan de eis voor het primair energiegebruik en het aandeel duurzame energie