

Energieflexibiliteit van gebouwen



Technisch Rapport - KT 42



## INHOUDSOPGAVE

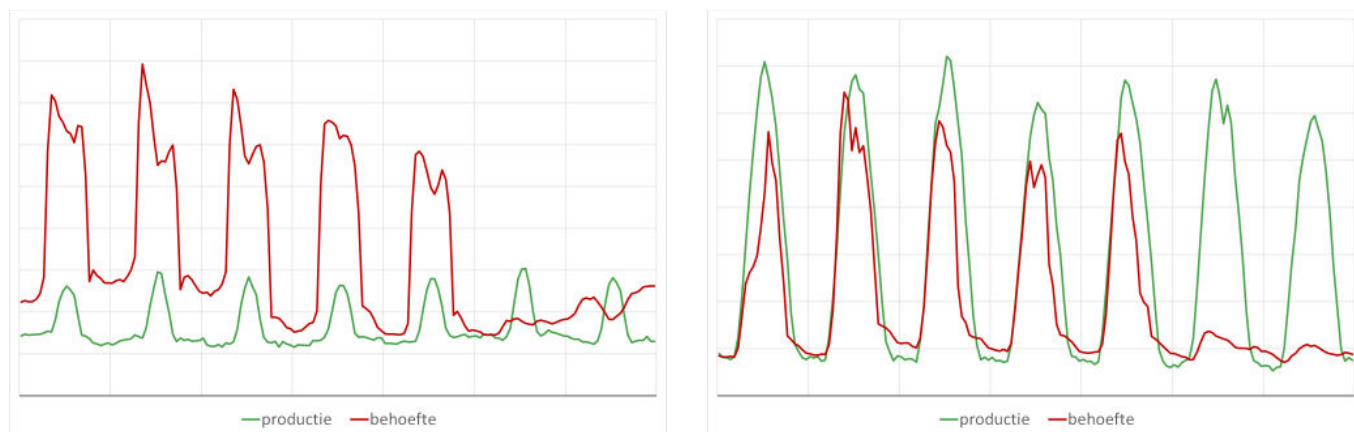
<b>SAMENVATTING .....</b>	<b>3</b>
<b>HOOFDSTUK 1 - INLEIDING .....</b>	<b>5</b>
<b>VERANTWOORDING .....</b>	<b>7</b>
<b>HOOFDSTUK 2 - DOELSTELLING VAN ENERGIEFLEXIBILITEIT .....</b>	<b>8</b>
<b>HOOFDSTUK 3 - ENERGIEFLEXIBILITEIT.....</b>	<b>10</b>
<b>3.1 Karakterisering .....</b>	<b>12</b>
<b>3.2 Indicatoren .....</b>	<b>13</b>
3.2.1 Gebouw én duurzame energievoorziening .....	13
3.2.2. Gebouw .....	15
3.2.3. Voorzieningen.....	17
<b>HOOFDSTUK 4 - ENERGIEVOORZIENING EN ENERGIEBEHOEFTE .....</b>	<b>19</b>
<b>4.1. Energievoorziening .....</b>	<b>19</b>
<b>4.2. Energiebehoefte gebouwen .....</b>	<b>21</b>
<b>4.3. Energiebehoefte versus energieproductie .....</b>	<b>22</b>
<b>4.4. Energiemarkt .....</b>	<b>23</b>
<b>HOOFDSTUK 5 - GEBOUWONTWERP.....</b>	<b>25</b>
<b>HOOFDSTUK 6 - TECHNIEKEN.....</b>	<b>26</b>
<b>6.1. Gebouw .....</b>	<b>26</b>
6.1.1. Comfort .....	27
6.1.2. Thermisch actief gebouw .....	29
6.1.3. Gebouwinstallaties .....	29
6.1.4. Brandstofwissel .....	29
<b>6.3. Elektrische opslag .....</b>	<b>31</b>
<b>6.4. Thermische opslag .....</b>	<b>31</b>
6.4.1. Warmwaterbuffer.....	32
6.4.2. Phase changing materials (PCM) .....	33
6.4.3. Zouthydraat warmteopslag .....	34
6.4.4. Waterstof.....	35
<b>6.5. Elektrisch vervoer .....</b>	<b>36</b>
<b>6.6. Clusteren .....</b>	<b>36</b>
<b>HOOFDSTUK 7 - ZELFCONSUMPTIE ZON-PV VERGROTEN .....</b>	<b>37</b>
<b>7.1. Batterij.....</b>	<b>37</b>
<b>7.2. Warmwatervoorraadvat.....</b>	<b>39</b>
<b>HOOFDSTUK 8 - PROTOCOLLEN.....</b>	<b>40</b>
<b>8.1. Aggregator .....</b>	<b>41</b>
<b>HOOFDSTUK 9 - VOORBEELDEN .....</b>	<b>42</b>
<b>LITERATUUR .....</b>	<b>45</b>



### SAMENVATTING

Deze rapportage geeft inzicht in hoe gebouwen kunnen bijdragen aan het verduurzamen van de energievoorziening door het flexibiliseren van de energiebehoefte. De energieflexibiliteit van een gebouw is de mate waarin de energiebehoefte en de energieproductie van een gebouw kunnen reageren op externe prikkels. Hierdoor kan het afnamepatroon beter passend gemaakt worden op de beschikbaarheid van duurzame energie of de beschikbare ruimte op een energienet. Naast de energieflexibiliteit die gewenst is vanuit de duurzame energievoorziening kan het maximaliseren van de zelfconsumptie van eigen duurzame opwek een motivatie zijn om energieflexibiliteit in een gebouw te realiseren.

De energietransitie is de overgang van fossiele energiebronnen naar duurzame energiebronnen. Deze duurzame energievoorziening onderscheidt zich van de fossiele energievoorziening doordat het aanbod van veel duurzame energiebronnen, zoals wind en zon, erg dynamisch en niet stuurbaar is en doordat veel van de opwekking decentraal en ook gebouwgebonden gebeurt. Deze duurzame energieopwekking past niet zonder meer bij de energiebehoefte van een gebouw, in Figuur 1 is daar een voorbeeld van gegeven.

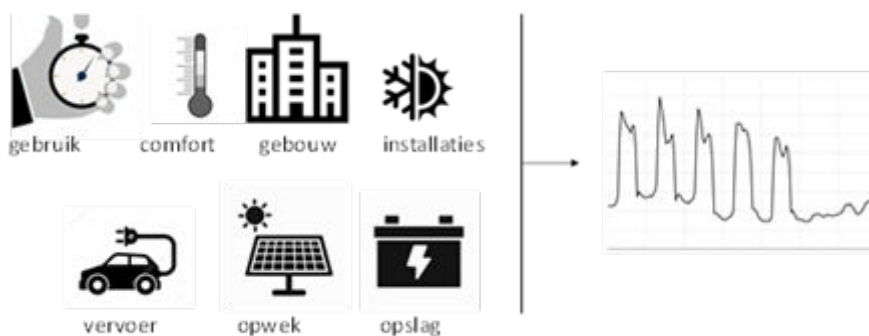


*Figuur 1: Mismatch (Illustratief) tussen gemiddelde duurzame energieproductie en afnamepatroon van een kantoorgebouw (links winterweek, rechts zomerweek).*

De gebouweigenaar of gebouwgebruiker heeft geen zicht op de behoefte aan energieflexibiliteit. De bijdrage van een enkel gebouw aan het leveren van de in de energievoorziening benodigde flexibiliteit is gering. De aggregator, een nieuwe, juridisch nog niet volledig vormgegeven rol in de energiemarkt<sup>1</sup>, moet er voor gaan zorgen dat het aanbod en vraag van energieflexibiliteit bij elkaar gebracht worden. De aggregator kan namens een groep van gebouweigenaren (dit kunnen ook woningeigenaren zijn) de vraag- en aanbodflexibiliteit bundelen en geaggregeerd op een flexibiliteitsmarkt aanbieden. De aggregator vormt daarmee een soort virtuele energiecentrale die op afroep bij- en af kan schakelen.

De vorm van het afnamepatroon van een gebouw is het resultaat van een complexe samenhang van factoren, zie ook Figuur 2.

<sup>1</sup> Er wordt nu door de energiemarktpartijen een marktmodel uitgewerkt waarin de aggregator een plaats heeft. Deze rol wordt daar CSP, congestiemanagement service provider genoemd.



Figuur 2: De energiebehoefte van het gebouw is het resultaat van een complexe samenhang van factoren.

In al deze factoren kan gezocht worden naar de mogelijkheden voor energieflexibiliteit. Door het hanteren van minder strikte comfortgrenzen kunnen bijvoorbeeld de klimaatinstallaties gedurende bepaalde tijd uitgeschakeld worden, of juist geforceerd aangeschakeld worden.

In zijn algemeenheid wordt energieflexibiliteit gerealiseerd door een vorm van energieopslag. Dit kan een batterij zijn, maar ook een voorraadvat met warmwater. Ook de massa van het gebouw zelf is een thermische buffer die gebruikt kan worden om energieflexibiliteit te realiseren. Daarnaast kan door het clusteren van vele gebouwen in combinatie met min of meer flexibel te schakelen apparatuur energieflexibiliteit opleveren.

Om de energieflexibiliteit in een gebouw te kunnen ontsluiten is een min of meer geavanceerde regelsysteem nodig. Complicerend daarbij is dat energieflexibiliteit meestal in samenhang met de andere gebouwssystemen beschouwd moet worden en ook een voorspellend element in zich heeft. Voor een goede regeling zijn dus voorspellende regelingen nodig. Dit wordt ook wel Model Predictive Control (MPC) genoemd. Innovaties op dit gebied zijn in volle gang.

Om energieflexibiliteit aan te kunnen bieden, bijvoorbeeld aan een aggregator, moet de aggregator via een protocol geïnformeerd kunnen worden over de beschikbare energieflexibiliteit. Daarvoor is inmiddels een aantal protocollen ontwikkeld, maar in de praktijk blijkt toepassing van de protocollen nog lastig.

Een specifieke vorm van energieflexibiliteit is energieflexibiliteit met als doel het vergroten van de eigen consumptie van de eigen duurzame energie opwek (meestal door een PV-systeem). Met name als het salderen niet meer mogelijk is, kan dit zinvol zijn.

Alhoewel energieflexibiliteit in gebouwen een forse bijdrage kan leveren aan het verduurzamen van de energievoorziening leveren de huidige energietarieven (of beter, de huidige energietariefstructuur) te weinig incentives om een zinvolle businesscase mogelijk te maken. De energietransitie is echter een zeer dynamisch proces en zowel technische- als juridische- en administratieve ontwikkelingen op dit gebied zijn dan ook in volle gang.



### HOOFDSTUK 1 - INLEIDING

De energietransitie is de overgang van fossiele energiebronnen naar duurzame energiebronnen. Deze duurzame energievoorziening onderscheidt zich van de fossiele energievoorziening doordat het aanbod van veel duurzame energiebronnen, zoals wind en zon, niet stuurbaar is en doordat veel van de opwekking decentraal en ook gebouwgebonden gebeurt.

In de traditionele energievoorziening volgt de energieproductie de energiebehoefte. Bij de duurzame energievoorziening is het aanbod van duurzame energie niet stuurbaar. Om zo veel mogelijk gebruik te maken van de beschikbare duurzame energie is het zinvol als de energiebehoefte de duurzame energieproductie enigszins kan volgen. Dit is het doel van energieflexibiliteit. De energieflexibiliteit van een gebouw is de mate waarin de energiebehoefte en de energieproductie van een gebouw kunnen reageren op externe prikkels<sup>2</sup>. Een (prijs)prikkel moet ervoor zorgen dat gebouwen extra vermogen vragen als er bijvoorbeeld een te groot aanbod van duurzame energie is of juist de vraag verminderen als er te weinig aanbod is.

Deze handreiking heeft als doel om iedereen die met ontwerpen, beheren of gebruiken van gebouwen bezig is te informeren over energieflexibiliteit en de technische mogelijkheden om de energieflexibiliteit van gebouwen te vergroten. De beschreven technieken hebben betrekking op het gebouw zelf en de gebouwgebonden installaties. De beschreven technieken hebben overwegend betrekking op utiliteitsgebouwen. Een uitzondering hierop is clusteren waarbij door het coördineren van schakelmomenten grote piekafnames voorkomen worden. Deze techniek is met name ook geschikt voor woningen.

De handreiking heeft betrekking op alle reguliere energiefuncties in een (utiliteits)gebouw. Als er in de handreiking sprake is van gebouwinstallaties voor verwarming (ruimteverwarming, tapwaterverwarming) wordt hier steeds uitgegaan van installaties die elektriciteit of warmte als energiedrager gebruiken tenzij anders is vermeld.

Een voorziening voor seizoensopslag, zoals een WKO worden niet gezien als een energieflexibele oplossing, maar als een energiebesparende voorziening. De behoefte aan energieflexibiliteit heeft doorgaans betrekking op een veel korter tijdsbestek, meestal binnen de dag.

In hoofdstuk 2 wordt omschreven wat voor een gebouweigenaar of gebouwgebruiker het nut kan zijn van energieflexibiliteit.

In hoofdstuk 3 wordt energieflexibiliteit verder toegelicht. Het inzetten van energieflexibiliteit heeft een bepaalde impact op het afnamepatroon van het gebouw. In hoofdstuk drie worden daar de karakteristieken van beschreven en wordt ook ingegaan op verschillende indicatoren die in het kader van energieflexibiliteit gebruikt kunnen worden.

In hoofdstuk 4 wordt ingegaan op de karakteristieken van de duurzame energievoorziening en de karakteristieken van afnamepatronen van gebouwen. Hiermee wordt inzicht gekregen in de mismatch tussen energieaanbod en energievraag. Ook wordt hier beschreven hoe energieflexibiliteit organisatorisch ingebed wordt in de energiemarkt.

---

<sup>2</sup> De officiële definitie is iets breder: "De energieflexibiliteit van een gebouw is de mogelijkheid om zijn vraag en productie aan te passen naar de lokale klimaatomstandigheden, gebruikersbehoeften en distributienetwerk vereisten". Omdat het in deze handreiking specifiek gaat om de vereisten vanuit de energievoorziening, is de scope daartoe beperkt.



Energieflexibiliteit heeft betrekking op een dynamische reactie van het gebouw op een externe prikkel. Dit speelt zich meestal af binnen een relatief korte tijdsperiode. Ook bij het ontwerp van een gebouw kunnen al ingrepen gedaan worden waardoor het afnamepatroon van een gebouw beter past in de duurzame energievoorziening of waardoor de energieflexibiliteit van een gebouw wordt vergroot. Dit is beschreven in hoofdstuk 5.

In hoofdstuk 6 worden de technieken beschreven waarmee energieflexibiliteit kan worden bewerkstelligd. Daarbij wordt een verdeling gemaakt naar waar de energieflexibiliteit in gevonden wordt: het comfort, het gebouw, de installaties, lokale opwek, lokale opslag of door het clusteren van meerdere gebouwen.

In hoofdstuk 7 wordt specifiek ingegaan op een apart geval van energieflexibiliteit namelijk het vergroten van de zelfconsumptie door een zonne-energiesysteem.

In hoofdstuk 8 wordt een beschrijving gegeven van de informatie-uitwisselingsprotocollen die ingezet kunnen worden bij het inzetten van energieflexibiliteit.

In hoofdstuk 9 worden voorbeelden van energieflexibele gebouwen beschreven.



## VERANTWOORDING

Aan de totstandkoming van deze rapportage door de T VVL Expertgroep Klimaattechniek hebben meegewerkt:

### BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Ing. Wobbe van den Kieboom	Expertgroep Klimaattechniek, KWA-bedrijfsadviseurs
Jos de Leeuw	Expertgroep Klimaattechniek, ISSO
Ing. Henry Lootens	Expertgroep Elektrotechniek, ISSO
Ing. Kees Smit	Expertgroep Elektrotechniek
Joep van der Velden	Expertgroep Gebouwbeheer en -automatisering, Kropman Installatietechniek

### AUTEUR

Michiel van Bruggen (Expertgroep Klimaattechniek, De Energiemanager)

### HET PROJECT IS FINANCIËEL MEDE MOGELIJK GEMAAKT DOOR



Wij Techniek



TVVL

### DATUM

31 januari 2023

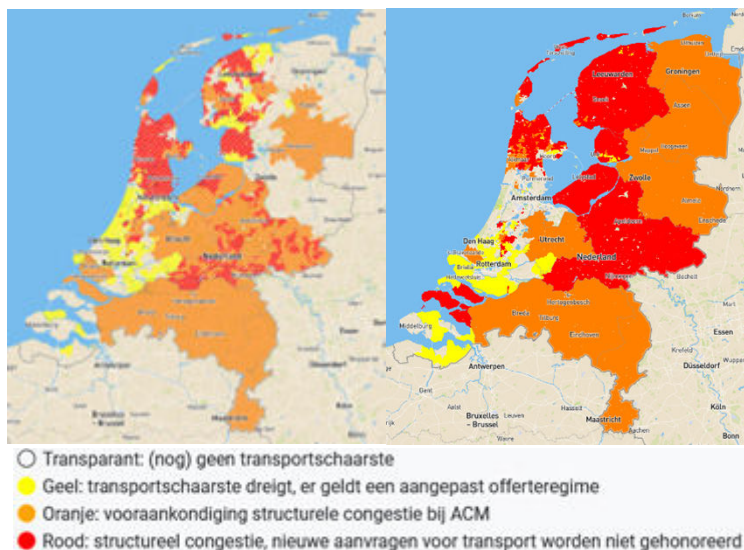
### GEWIJZIGD

-



## HOOFDSTUK 2 - DOELSTELLING VAN ENERGIEFLEXIBILITEIT

In zijn algemeenheid is het doel van energieflexibiliteit een betere benutting van duurzame energieproductie en het voorkomen van congestie op de energienetten. Met name netcongestie is een acuut probleem. In Figuur 3 is de congestiekaart van Nederland gegeven waarop te zien is dat er inmiddels grote gebieden zijn waar op het net geen ruimte meer is voor nieuwe aansluitingen, met name nieuwe aansluitingen met teruglevering.



*Figuur 3: Congestiekaart van Nederland (peildatum 22-12-2022) met links afname (verbruik) en rechts invoeding (teruglevering).*

Deze betere benutting van duurzame energie en de energienetten zal bewerkstelligd moeten worden bij de eindgebruikers door middel van financiële prikkels, bijvoorbeeld door variërende energietarieven. Voor gebouweigenaren is er dan ook geld te verdienen met het aanbieden van energieflexibiliteit.

Naast externe prijsprikkels kunnen er ook interne prijsprikkels of andere incentives zijn die samenhangen met energieflexibiliteit.

Het optimaliseren van zelfconsumptie van de energieproductie door een eigen lokale energieproductievoorziening is voor bedrijven interessant omdat de energieprijs voor teruglevering lager is dan de energieprijs voor levering.

Omdat de beschikbaarheid van duurzame energie varieert en ook de inzet van conventionele bronnen op korte tijdbestekken over het algemeen weinig flexibel is, variëren ook de CO<sub>2</sub> emissies die geassocieerd kunnen worden met de geleverde energie. Bedrijven kunnen dit gebruiken om hun eigen CO<sub>2</sub> footprint te verlagen. Hierbij is daarbij het overigens relevant dat het inzetten van energieflexibiliteit meestal (beperkt) ten koste gaat van de energie-efficiëntie van het energiegebruik.

De beschikbare aansluitcapaciteit voor nieuwe gebouwen kan in verband met congestie beperkt of kostbaar zijn. Door peakshaving, flexibiliteit die gebruikt wordt om de hoogste belastingpieken af te vlakken, kan een aansluiting toch mogelijk of betaalbaar worden.

Een gebouwontwerp dat gericht is op energieflexibiliteit wordt vaak gekenmerkt door meer opslag van (thermische) energie en lagere koel- of verwarmingscapaciteiten. Dit kan zorgen voor lagere investeringskosten.



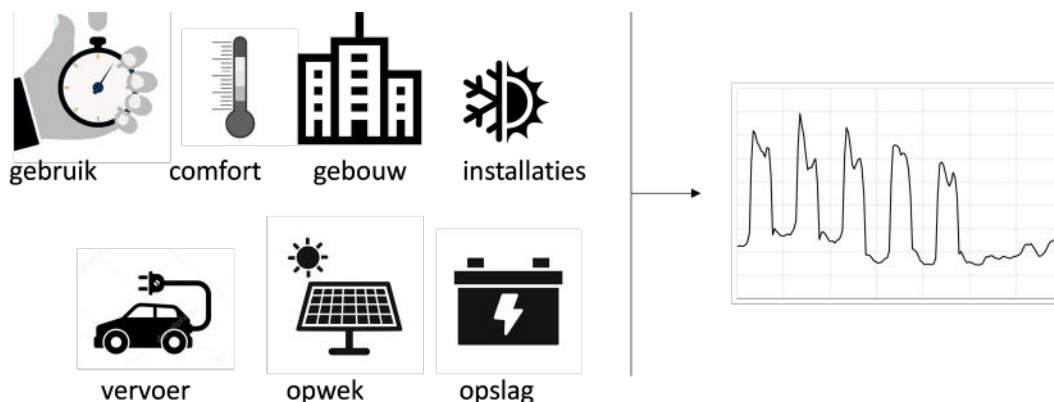


Voor de individuele gebouweigenaar is het van belang dat de inspanningen en kosten die nodig zijn om energieflexibiliteit te bewerkstelligen in verhouding staan tot de opbrengsten en dat deze de energieflexibiliteit niet ten koste gaat van comfort en bedrijfszekerheid. De eigenaar of gebruiker van een gebouw zal dan ook in de meeste gevallen niet zelf actief deel nemen aan de flexibiliteitsmarkt, maar de beschikbare flexibiliteit in het gebouw zal onderdeel zijn van een door een aggregator beheerde virtual power plant.



## HOOFDSTUK 3 - ENERGIEFLEXIBILITEIT

Bij een energieflexibel gebouw is de energiebehoefte dus te beïnvloeden. Hoe kunnen we dat bewerkstellingen? De energiebehoefte van het gebouw is afhankelijk van het gebruik van het gebouw, het gewenste comfort en de fysische eigenschappen het gebouw. Maar ook de gebouwinstallaties en eventueel aanvullende voorzieningen zoals lokale opwek of batterijen spelen een rol bij de mate van energieflexibiliteit. Dit is geïllustreerd in Figuur 4.



*Figuur 4: De energiebehoefte van het gebouw is het resultaat van een complexe samenhang van factoren.*

Behalve de mogelijkheden die in het gebouw aanwezig zijn, kan een zekere energieflexibiliteit verkregen worden door gebouwen te clusteren.

Al deze mogelijkheden worden hieronder verder in zijn algemeenheid toegelicht. In hoofdstuk 6 komen de specifieke technieken aan bod.

In paragrafen 3.1 en 3.2 wordt beschreven hoe energieflexibiliteit gekwantificeerd kan worden.

### Gebruikstijden gebruikintensiteit



De gebruikstijden en de gebruikintensiteit zijn de meest dominante bepalende factoren voor de vorm van het patroon van de energiebehoefte van een gebouw. Andere gebruikstijden zorgen voor een ander behoeft patroon, een patroon dat misschien beter past bij de duurzame energievoorziening. Nu zal energieflexibiliteit niet snel de reden zijn om gebruikstijden van een gebouw te veranderen, maar in zijn algemeenheid kan wel geconstateerd worden dat kantoorgebouwen niet erg efficiënt gebruikt worden. Bij reguliere gebruikstijden zijn kantoorgebouwen slechts een derde van de tijd in gebruik. Daarbij komt dat ook de gebruikintensiteit bij veel kantoren minder is geworden nu veel mensen blijvend een deel van hun werk thuis verrichten.

### Comfort



Als gebruik gemaakt wordt van het gebouw dan moet er een comfortabel binnenklimaat zijn. De belangrijkste factor met betrekking tot het comfort is de binnentemperatuur. Een zekere dynamiek van de binnentemperatuur gaat over het algemeen niet ten koste van de comfortbeleving. Dit kan gebruikt worden om energieflexibiliteit te bewerkstelligen. De binnentemperatuur kan bijvoorbeeld tot een bovengrens opgestookt worden waarna het gebouw gedurende zekere tijd kan afkoelen tot een ondergrens zonder de verwarmingsinstallatie aan te zetten. Hiermee verschuift dus ook de energiebehoefte. De mate waarin mensen een zekere bandbreedte ten aanzien van het comfort accepteren hangt overigens sterk samen de beïnvloedbaarheid van het comfort door bijvoorbeeld te openen ramen of te bedienen zonwering.



### Gebouw



Een gebouw wordt gekenmerkt door een zekere traagheid die vooral veroorzaakt wordt door de thermisch actieve massa in het gebouw. Deze traagheid kan, in samenhang met de acceptabele bandbreedte ten aanzien van het comfort, gebruikt worden om de warmte- of koudelevering te sturen. Een gebouw met meer traagheid kan dan langer een periode zonder actief verwarmen of koelen overbruggen. Niet alleen de thermisch actieve massa, maar ook isolatie, de zoninstraling en de ventilatie spelen hierbij een relevante rol.

### Thermische opslag



Gebruikstijden, gebruikintensiteit, comforteisen en de fysische eigenschappen van het gebouw bepalen in feite de energiebehoefte waarin de gebouwinstallaties moeten voorzien. De 'output' van de gebouwinstallaties staat daarmee vast. De gebouwinstallaties kunnen zelf een bijdrage leveren aan energieflexibiliteit als een vorm van opslag onderdeel uitmaakt van de gebouwinstallaties of als een voorziening gebruik maakt van verschillende energiedragers. Een vorm van opslag komt standaard al voor bij gebouwen met een hoge warmtapwatervraag (een warmtapwatervoorraadvat). Bij gebouwen met warmtepompen, wordt opslag gebruikt om het vermogen af te vlakken en de schakelfrequentie van een warmtepomp te verlagen. Deze opslagcapaciteit kan ook gebruikt worden met specifiek energieflexibiliteit als doel.

### Brandstofwissel



Bij hybride warmtepompinstallaties worden verschillende energiedragers gebruikt. Enerzijds elektriciteit voor de warmtepomp, meestal om in een basislast te voorzien. Anderzijds (meestal) aardgas om te voorzien in piekvraag. Dit biedt de mogelijkheid om te schakelen tussen de energiedragers als de energieflexibiliteitsbehoefte daarom vraagt.

### Lokale opwek



Lokale opwek is doorgaans elektriciteitsproductie met zonnepanelen. In principe moet er van uitgegaan worden dat deze productie niet flexibel is, alle duurzame energieproductie is immers meegenomen. In de praktijk wordt bij congestieproblemen die veroorzaakt worden door een overschot aan duurzame energieproductie wel duurzame energieopwekking uitgeschakeld. Lokale opwek in combinatie met batterijen zijn de ingrediënten om de zelfconsumptie van eigen opwek te vergroten.

### Elektrische opslag



We onderscheiden opslag door kinetische energie (zoals een vliegwiel), opslag door potentiële energie (zoals een stuwmeer), thermische opslag (voorraadvat of ijsbuffer), elektrische opslag (batterij) en chemische opslag (zoals waterstof). Batterijen zijn flexibel inzetbaar (beperkt door laadvermogen en capaciteit) omdat er nauwelijks een grens is aan de opslagperiode. Dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld een vliegwiel. Batterijen worden in gebouwen al toegepast als noodstroomvoorziening. In de praktijk zijn die batterijen niet bruikbaar voor energieflexibiliteit, dit zou immers ten koste gaan van de bedrijfszekerheid. Batterijen kunnen ingezet worden met specifiek energieflexibiliteit als doel. Het vergroten van de zelfconsumptie van eigen opwek is dan vaak een belangrijk aspect, maar de batterij kan natuurlijk ook gebruikt worden om flexibel gebruik te maken van variërende leveringstarieven.

### Elektrisch vervoer



Opladen van elektrisch vervoer is geen onderdeel van de standaard gebouwvoorzieningen. Vanwege de relevantie en impact van het opladen van elektrisch vervoer en de toekomstige mogelijkheden van bidirectioneel laden is het zinvol om bij beschouwingen over energieflexibiliteit van een gebouw dit wel te betrekken.



## Clustering



Clustering heeft betrekking op het samenvoegen van vele gebouwen tot een eenheid. Door slim om te gaan met het aan- en uitschakelen van apparatuur kan bijvoorbeeld voorkomen worden dat er hoge pieken ontstaan door gelijktijdigheid. Dit clusteren van schakeltijden kan op van alles betrekking hebben, van koelkasten tot de verwarmingsinstallaties. Het clusteren van gebouwen tot één virtual powerplant is de taak van de aggregator een nieuwe speler in de energiemarkt die de schakel wordt tussen aanbod van duurzame energie en de energiebehoefte van gebouwen. Het clusteren hoeft niet gebonden te zijn aan geografische grenzen maar in de praktijk heeft een wijkgebonden aanpak wel voordelen.

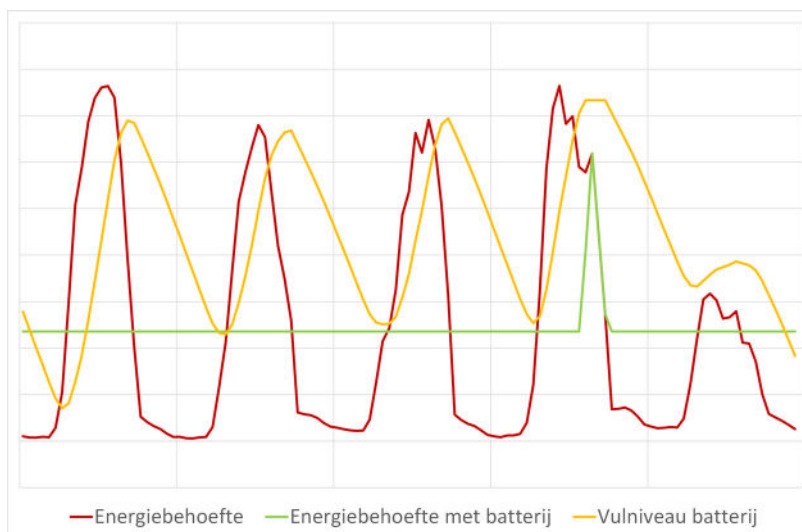
### 3.1 Karakterisering

Energieflexibiliteit uit zich als een verandering van het reguliere afnamepatroon van een gebouw. Dit kan een verschuiving zijn in het afnamepatroon (load shifting) of een verandering van het afnamepatroon zonder verdere consequenties voor de rest van het afnamepatroon (peak shaving of valley lifting).

#### Verschuiving met flexibele tijdsduur

In een reservoir met een beperkte omvang kan energie tijdelijk opgeslagen worden. Zo kan tijdens piekuren energie in het reservoir gestopt worden en kan dit in daluren er weer uitgehaald worden.

Er is altijd sprake van een apart opslagmedium. Dit kan een batterij, maar bijvoorbeeld ook een voorraadvat met water zijn. In Figuur 5 is een voorbeeld gegeven van het afvlakken van de energiebehoefte met een batterij.



Figuur 5: Met de batterij wordt dit afnamepatroon vrijwel volledig afgevlakt.

#### Verschuiving met maximale tijdsduur

De energiebehoefte kan een beperkte periode verkleind of vergroot worden. Dit is bijvoorbeeld het geval als een verwarmingsinstallatie tijdelijk uitgezet wordt. Als de binnentemperatuur onder een bepaalde comfortgrens komt, zal de verwarming weer aangezet worden. Vaak gaat dit gepaard met extra energiebehoefte aan het einde van de periode om de situatie weer in een gewenste status te krijgen. Het inzetten van energieflexibiliteit kan dus ten koste gaan van de energie-efficiëntie.



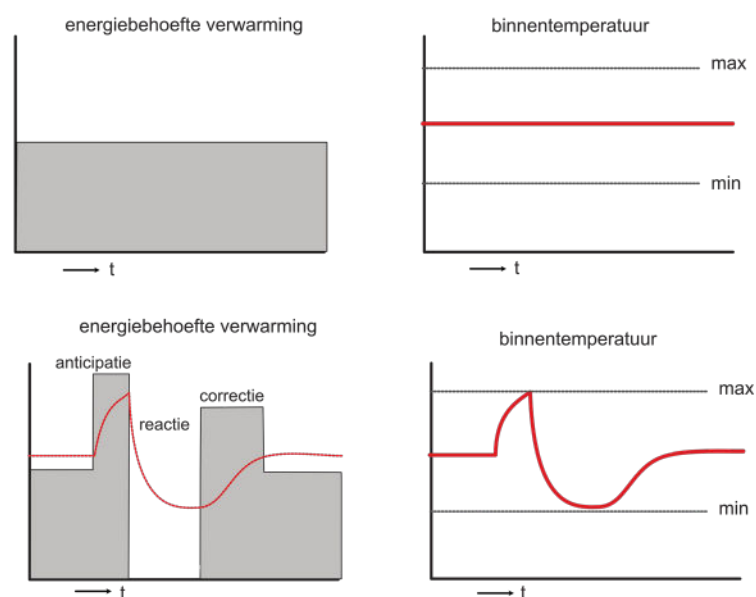
### Af- of aanschakelbaar

Als de energiebehoefte flexibel verminderd of vermeerderd kan worden, zonder dat dit gevolgd wordt door energiegebruik voor herstel naar een gewenste situatie. Dit kan bijvoorbeeld van toepassing zijn als een brandstofwissel mogelijk is.

Energieflexibiliteit kenmerkt zich door de reactie van de energiebehoefte van een gebouw op een externe prikkel. Hierin kunnen drie fasen onderscheiden worden, die niet in elke situatie voor hoeven te komen:

- Anticipatie: bijvoorbeeld opstoken (of afkoelen) van het gebouw.
- Reactie: de gewenste verandering.
- Correctie: herstellen van het gebouw naar gewenste condities.

Dit is schematisch weergegeven in Figuur 6.



Figuur 6: Schematische weergave van het verloop van een flexibiliteitsgebeurtenis. Boven regulier, onder met flexibiliteitsreactie.

## 3.2 Indicatoren

Met behulp van indicatoren kunnen aspecten van energieflexibiliteit gekwantificeerd worden. Indicatoren kunnen betrekking hebben op een verschillende scope; de indicator kan betrekking hebben op de samenhang tussen de duurzame energievoorziening en het gebouw, op het gebouw alleen of op een specifieke voorziening.

### 3.2.1 Gebouw én duurzame energievoorziening

In deze paragraaf worden indicatoren beschreven die betrekking hebben op de wisselwerking tussen de duurzame energievoorziening en het gebouw.

#### Ongedekte energiebehoefte<sup>3</sup>

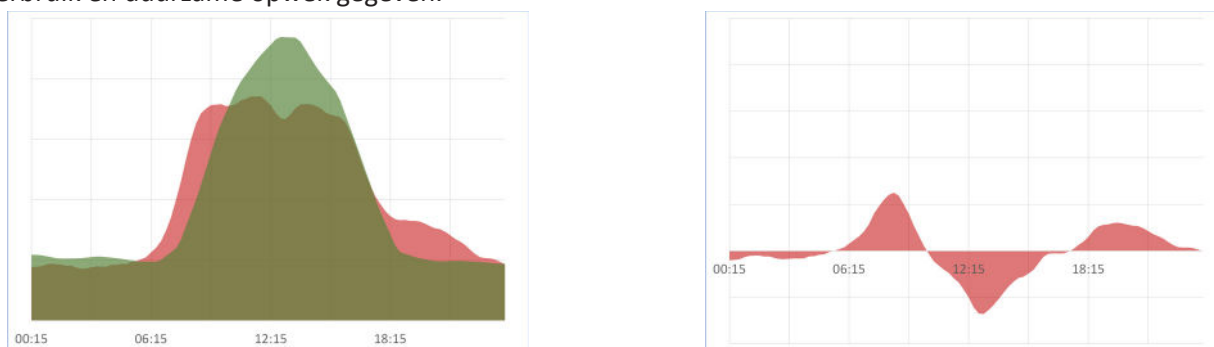
De ongedekte energiebehoefte op een gegeven moment is het verschil tussen de energiebehoefte en het aanbod van duurzame energie. De ongedekte energiebehoefte is dus behoefte die ingevuld moet worden met regelbare (eventueel conventionele) energieproductie en flexibiliteit in de energiebehoefte. Hoe groter de flexibiliteit in de energiebehoefte, hoe minder regelbare energieproductie nodig is. Als de ongedekte energiebehoefte negatief is, dan is er een duurzame energieproductieoverschot.

<sup>3</sup>Eigen vertaling van het begrip "residual load"



De ongedekte energiebehoefte kan over een periode gesommeerd worden. De negatieve ongedekte energiebehoefte en de positieve ongedekte energiebehoefte worden apart van elkaar opgeteld. Als energieproductie en energiebehoefte genormaliseerd worden (volume van beiden is gelijk aan 1), dan is de positieve ongedekte energiebehoefte gelijk aan de negatieve ongedekte energiebehoefte. Het resultaat is dan de ongedekte energiebehoefte als fractie van de totale energiebehoefte.

Dit is schematisch weergegeven in Figuur 7. Gegeven is een hypothetisch behoefteprofiel over een dag (in rood) en een profiel van duurzame opwek (50% wind en 50% zon). Het gearceerde deel is het deel van de energiebehoefte die gedekt kan worden door de duurzame energievoorziening. Rood is de ongedekte energiebehoefte en groen is het overschot aan duurzame energie. Rechts in Figuur 7 is alleen het saldo van verbruik en duurzame opwek gegeven.



*Figuur 7: Links: schematisch (genormaliseerde) energiebehoefte en duurzame opwek gedurende een dag. Rood is de ongedekte energiebehoefte. Groen is overschot aan opwek. Donker is de door duurzame energie gedekte energiebehoefte. Rechts de ongedekte energiebehoefte bij de situatie links.*

De ongedekte energiebehoefte wordt in principe gebruikt om inzicht te krijgen in de verhouding tussen in de energievoorziening beschikbare duurzame energie en de energiebehoefte bij aansluitingen. Het inzetten van energieflexibiliteit verlaagt doorgaans de ongedekte energiebehoefte.

De indicator kan ook gebruikt worden voor een individueel gebouw waar lokale energieopwekking plaats vindt. In dat geval wordt het productieprofiel niet geschaald. Dan zullen de ongedekte energiebehoefte en het overschot aan productie ook meestal niet gelijk zijn aan elkaar.

Een gerelateerd kengetal is de dekkingsgraad, die aangeeft welk aandeel van de eigen energiebehoefte gedekt wordt door duurzame energie.

#### Helling<sup>4</sup>

De helling zegt iets over de snelheid van verandering van een afname- of productiepatroon. In het kader van energieflexibiliteit is dit een relevant gegeven. De grootste behoefte aan (snel reagerende) flexibiliteit is er op het moment dat de ongedekte energiebehoefte snel verandert. Juist bij duurzame energieproductie, en met name door zon, kunnen er plotselinge grote veranderingen zijn in de productie.

Het inzetten van energieflexibiliteit bij een steile helling heeft tot doel de snelheid van de verandering te vertragen of om korte pieken af te vlakken, zodat de reguliere energieproductiemiddelen deze snelle veranderingen niet hoeven op te vangen.

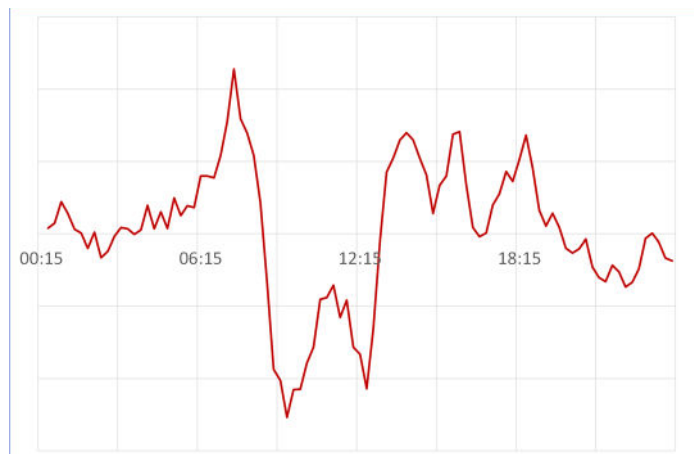
De helling kan uitgedrukt worden door het verschil te nemen (van de afname of productie) tussen twee elkaar opvolgende periodes.

<sup>4</sup> Doorgaans wordt, ook in Nederlandse rapporten, de Engelse term “ramp” gebruikt.



De helling van de ongedekte energiebehoefte is een goede indicator voor de benodigde flexibiliteit. Bij een opwaartse helling is de ongedekte energiebehoefte aan het toenemen. Voor de energieflexibiliteit in een gebouw kan dit betekenen dat een lagere energievraag wenselijk is. Bij een neerwaartse helling is de ongedekte energiebehoefte aan het afnemen. Voor de energieflexibiliteit in een gebouw kan dit betekenen dat een hogere energievraag wenselijk is.

De helling van het voorbeeld in Figuur 7 is gegeven in Figuur 8.



Figuur 8: Helling van de ongedekte energiebehoefte bij het voorbeeld in Figuur 7.

### 3.2.2. Gebouw

In deze paragraaf worden indicatoren gegeven die enkel betrekking hebben op een gebouw.

#### Flexibiliteitsindex (FI)

De flexibiliteitsindex is een maat voor de reactie van het gebouw op een specifieke prikkel. Als deze prikkel bijvoorbeeld de prijs van elektriciteit is, dan wil een flexibiliteitsindex van 0,2 zeggen dat de gemiddelde prijs van elektriciteit van het energieflexibele gebouw 20% lager is dan de gemiddelde prijs van het (zelfde) niet-energieflexibele gebouw.

De flexibiliteitsindex kan bepaald worden door het gebouw met energieflexibiliteit en het gebouw zonder energieflexibiliteit te simuleren. De resultaten worden vervolgens gewogen met de waarde van de prikkel. De flexibiliteitsindex wordt dan gegeven door:

$$FI = 1 - \frac{E_{flexibel}}{E_{referentie}}$$

Als de prikkel bijvoorbeeld betrekking heeft op peak-shaving dan heeft de prikkel een waarde van 1 bij overschrijding van een maximale waarde van het verbruik en een waarde 0 bij onderschrijden van deze maximale waarde. De flexibiliteitsindex kan dan de waarde 1 hebben als in het energieflexibele gebouw de grenswaarden voor het maximale verbruik in zijn geheel niet overschrijdt.

#### Flexibele energiehoeveelheid (Shiftable (thermal) energy potential)

Geeft de hoeveelheid energie in kWh/m<sup>2</sup> (gebouw) die verschoven kan worden in het geval van een vraagresponsgebeurtenis. Omdat de grootte en duur van de verschuiving vaak afhankelijk is van externe condities worden die externe condities bij het bepalen van deze indicator constant verondersteld. Bijvoorbeeld een gemiddelde constante buitentemperatuur van 4 °C en geen zoninstraling.



### Uitschakeltijd

De uitschakeltijd is de maximale tijd die een voorziening afgeschakeld of geforceerd aangezet kan worden in uren.

### Flexibel vermogen (shiftable load)

Geeft de grootte van het afschakelbaar vermogen in W/m<sup>2</sup>. Dit is gelijk aan de flexibele energiehoeveelheid gedeeld door de afschakeltijd.

De flexibele energiehoeveelheid, afschakeltijd en het flexibel vermogen zijn, als het gaat om het schakelen van een verwarmings- of koelinstallatie, voor een gebouw geen vaste waarden. Deze zijn afhankelijk van de buitencondities en de huidige status van het gebouw. Het kwantificeren van deze waarden voor een gebouw kan gebeuren door het uitvoeren simulatiestudies of door het gedrag van het gebouw te monitoren in relatie tot de relevante condities. Vervolgens kan met kunstmatige intelligentie-technieken deze relatie gemodelleerd worden.

### Zelfconsumptie van duurzame opwek

Geeft de lokaal opgewekte energie die direct gebruikt kan worden in het gebouw als percentage van het totale energiegebruik van het gebouw. Als bekend is hoe groot de productie door de duurzame opwek is, de afname van energie en de teruglevering van energie, dan wordt de zelfconsumptie als volgt bepaald:

$$\text{Zelfconsumptie} = \frac{E_{\text{duurzaam}} - E_{\text{teruglevering}}}{E_{\text{afname}} + E_{\text{duurzaam}} - E_{\text{teruglevering}}} \cdot 100\%$$

### Benuttingsfactor duurzame opwek

Geeft de lokaal opgewekte energie die direct gebruikt kan worden in het gebouw als percentage van de totale lokale opwek.

$$\text{Benuttingsfactor} = \frac{E_{\text{duurzaam}} - E_{\text{teruglevering}}}{E_{\text{duurzaam}}} \cdot 100\%$$

### Smart readiness indicator<sup>5</sup> (SRI)

De smart readiness indicator is ontwikkeld in het kader van de Europese Energy Performance of Buildings Directive (EPBD). De SRI geeft een maat voor de 'slimheid' van het gebouw op basis van de in het gebouw aanwezige voorzieningen. De SRI richt zich op de drie domeinen:

- Het gebouw. Het vermogen om de energie-efficiëntie en het functioneren van het gebouw te behouden door aanpassing van het energieverbruik. Bijvoorbeeld door het gebruik van energie uit duurzame bronnen.
- De gebruiker. Het vermogen om in te spelen op de behoefte van de gebruiker. Hierbij wordt rekening gehouden met gebruiksvriendelijkheid, gezond binnenklimaat en informatie over het energiegebruik.
- De energievoorziening. De flexibiliteit van de totale energievraag van een gebouw: het vermogen om met de elektriciteitsbehoefte in relatie tot het energienetwerk (Demand-Response).

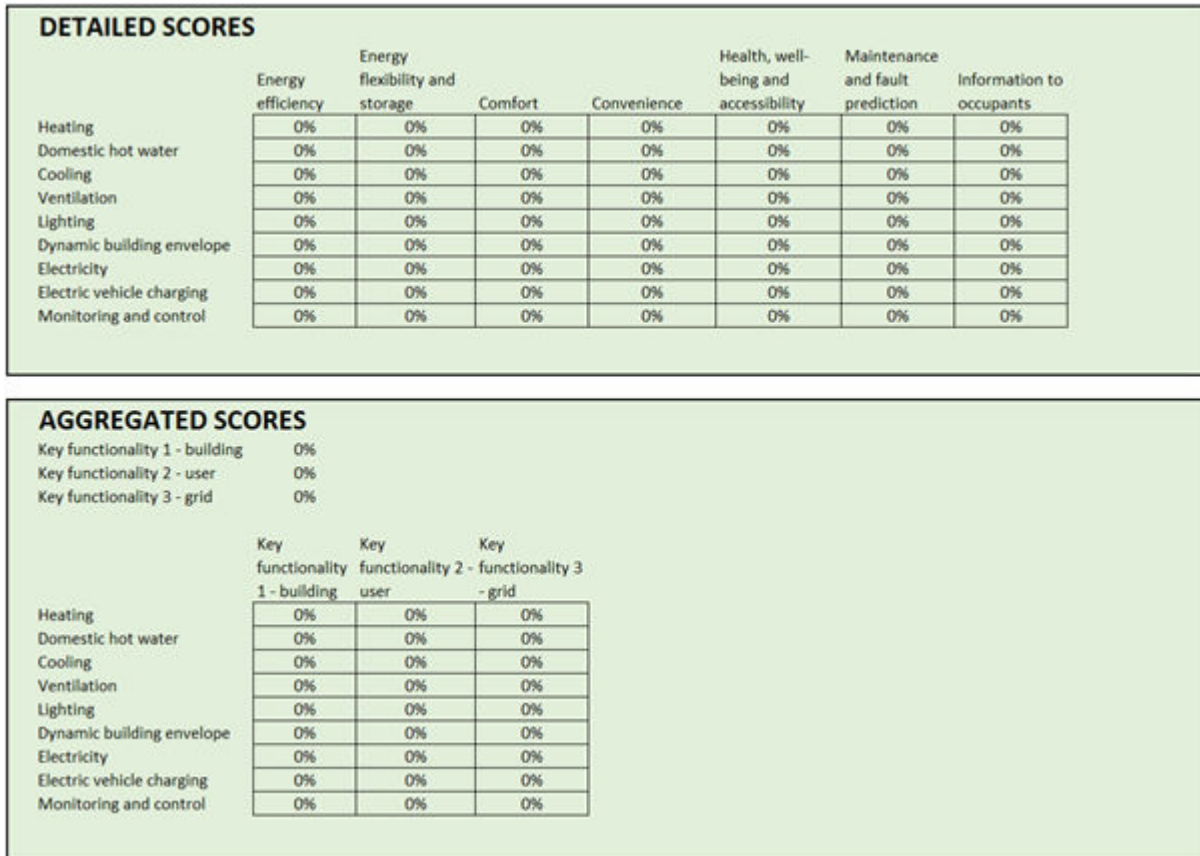
<sup>5</sup>Op het moment van schrijven is deze methodiek nog in ontwikkeling





De voorzieningen in een gebouw zijn ingedeeld in verschillende energiefuncties (heating, domestic hot water, cooling, ventilation, lighting, electricity generation, electric vehicles, dynamic envelope en monitoring & control). De voorzieningen krijgen een score voor de verschillende gebruiksaspecten (energy savings, maintenance & fault prediction, comfort, convenience, information to occupant, health & wellbeing, energy demand flexibility).

Op basis van de scores worden zowel per domein als per gebruiksaspect geaggregeerde impactscores gegeven. In Figuur 9 zijn de scoringstabellen uit het concept instrument voor de bepaling van de SRI gegeven.



Figuur 9: Scoringstabellen uit de het concept instrument waarmee de Smart Readiness Indicator bepaald kan worden.

### 3.2.3. Voorzieningen

In deze paragraaf worden indicatoren gegeven die betrekking hebben op een voorziening.

#### C-rate

De C-rate is een kengetal dat gebruikt kan worden om een vorm van opslag te karakteriseren en wordt gegeven door:

$$C = \frac{P}{Q}$$

P: Vermogen in kW

Q: Capaciteit in kWh Benuttingsfactor



De onlaadtijd in uren is gelijk aan de reciproke waarde van de C-rate. Bijvoorbeeld, een Tesla Powerwall met een capaciteit van 13,5 kWh en een laadvermogen van 7 kW heeft een C-rate van  $7/13,5 = 0,52$  1/h. De onlaadtijd is dan  $1/0,52 = 1,92$  uren.

### **Benuttingsfactor van opslag**

Voor een opslagvoorziening, zoals bijvoorbeeld een batterij, is de benuttingsfactor de totale in een jaar aan de opslag onttrokken hoeveelheid energie (in kWh) gedeeld door de capaciteit (in kWh) van de opslagvoorziening.

### **Vulniveau (State of Charge, SOC) (van een batterij of opslag)**

Het vulniveau geeft het laadniveau als percentage van de totale maximale energie-inhoud van een opslagvoorziening.



## HOOFDSTUK 4 - ENERGIEVOORZIENING EN ENERGIEBEHOEFTE

De karakteristieken van de duurzame energievoorziening en de energiebehoefte (in dit geval van gebouwen) zijn bepalend voor de behoefte aan flexibiliteit. In dit hoofdstuk wordt een (indicatieve) verkenning gedaan van de karakteristieken van de productiepatronen van de duurzame energievoorziening en de afnamepatronen van kantoorgebouwen<sup>6</sup>.

### 4.1. Energievoorziening

In 2050 moet de energievoorziening vrijwel volkomen duurzaam zijn. Dit zal met een mix van productie- en opslagtechnieken gebeuren. Ten aanzien van flexibiliteit zijn eigenlijk alleen de duurzame productiemiddelen die niet stuurbaar zijn relevant. Dit zijn windenergie en zonne-energie. De prognose is dat de mix tussen wind- en zonne-energie in 2050 fifty-fifty is.

In Tabel 1 zijn van de verschillende productietechnieken de karakteristieken gegeven van de energieproductie. Hieruit valt te concluderen dat wind- en zonne-energie enigszins complementair zijn aan elkaar als het gaat om het jaarpatroon.

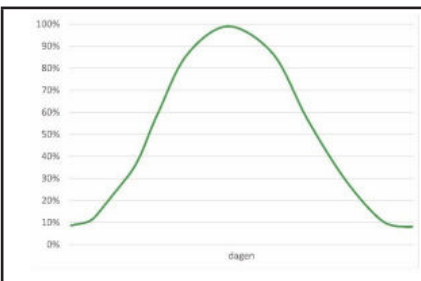
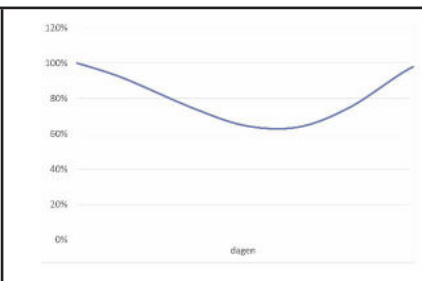
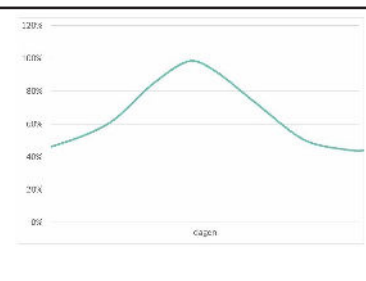
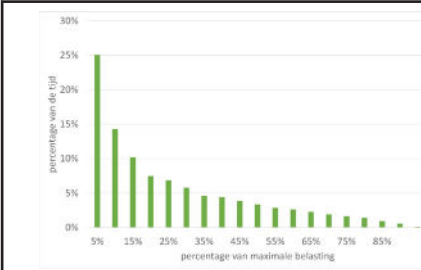
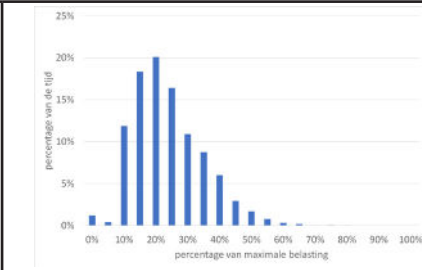
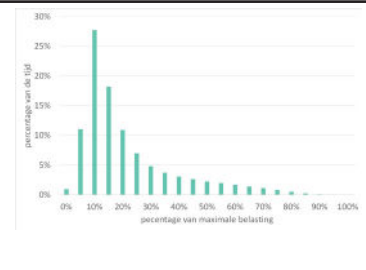
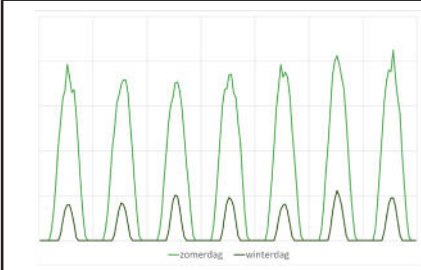
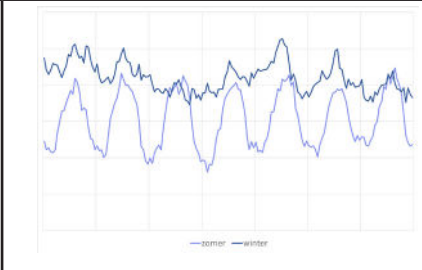
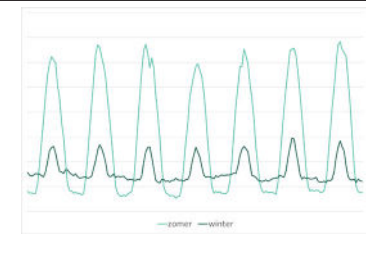
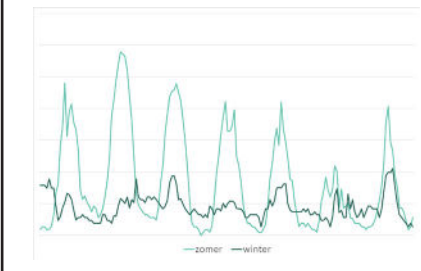
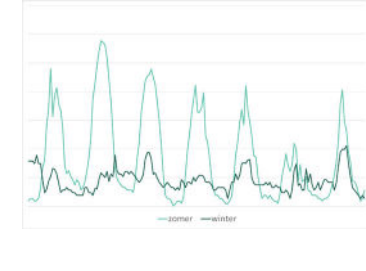
Ten aanzien van het dagpatroon is te zien dat wind- en zonne-energie elkaar in de zomer versterken.

---

<sup>6</sup> Hier wordt alleen afnamepatronen van kantoren beschouwd. De energiemarkt wordt natuurlijk gekenmerkt door afname door woningen, industrie en andere functies. Een totale analyse van de ongedekte energiebehoefte zou dus eigenlijk ook die afnames moeten betrekken. Hier worden de karakteristieken van kantoorgebouwen gebruikt ter illustratie van energieflexibiliteit.



Tabel 1: Karakteristieken van zonne-energie, windenergie en gezamenlijke productie

Zon	Wind	50% zon – 50% wind
<i>Dagen van het jaar</i>		
		
<i>Frequenties belasting</i>		
		
<i>Gemiddeld patroon</i>		
		
<i>Voorbeeldpatroon</i>		
		



#### 4.2. Energiebehoefte gebouwen

De energiebehoefte van gebouwen varieert sterk met de eigenschappen en de aard van het gebruik van het gebouw, maar in algemene zin worden kantoorgebouwen gekarakteriseerd door:

- Een sterke relatie met het gebruikspatroon en de bezetting.
- Een sterke relatie tussen warmtebehoefte en buitentemperaturen en zoninstraling.
- Een sterke relatie tussen koelbehoefte en interne warmtebronnen, buitentemperaturen en zoninstraling.

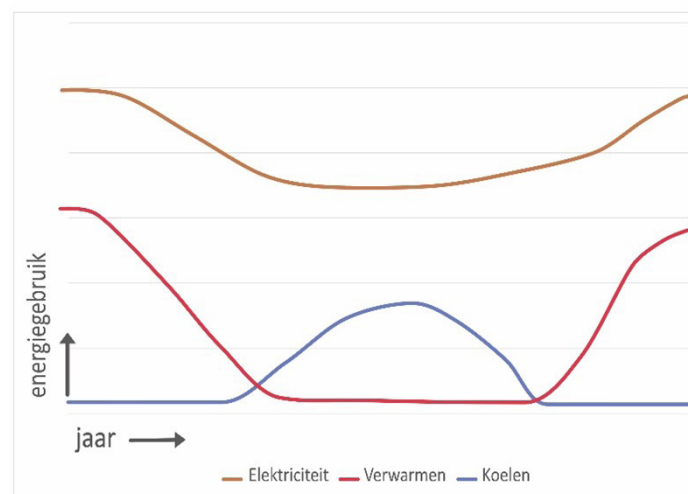
Om enigszins een uitspraak te kunnen doen over de relatie tussen duurzame energieproductie en energiebehoefte van gebouwen is een referentie kantoorgebouw gebruikt. Dit referentie kantoorgebouw wordt gekenmerkt door:

- Een elektriciteitsverbruik voor verwarmen van 10 kWh/m<sup>2</sup>
- Een elektriciteitsverbruik voor koelen van 5 kWh/m<sup>2</sup>
- Een elektriciteitsverbruik voor overige zaken van 40 kWh/m<sup>2</sup>

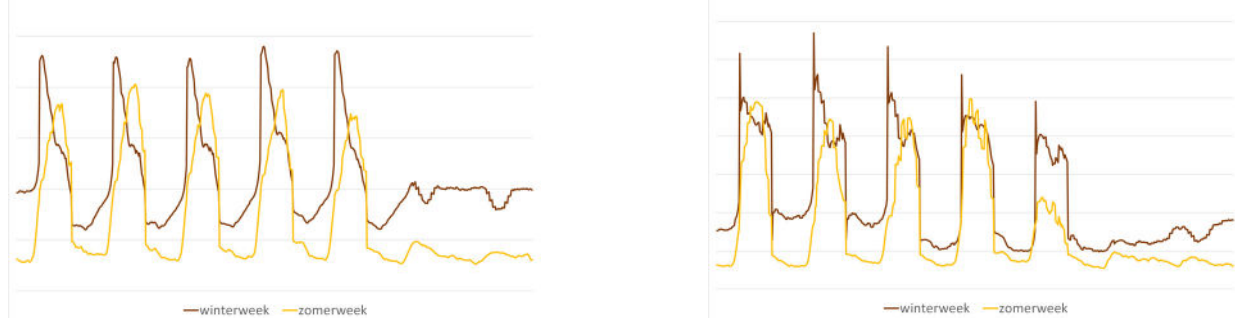
Deze kenmerken komen overeen met een modern kantoorgebouw met goede isolatie en gebruik van een warmtepomp voor koelen en verwarmen.

In Figuur 10 is gegeven hoe energiebehoefte voor verwarmen, koelen en overig zich tot elkaar verhouden.

In Figuur 11 is het detailpatroon in de winter en de zomer gegeven onder gemiddelde klimaatomstandigheden en bij een sample van de klimaatomstandigheden.



Figuur 10: Jaarpatroon van de energiebehoefte van het referentie kantoorgebouw.



Figuur 11: Winterweekpatroon en zomerweekpatroon van het referentiegebouw. Links gemiddelde klimaatomstandigheden, rechts een sample van klimaatomstandigheden.



### 4.3. Energiebehoefte versus energieproductie

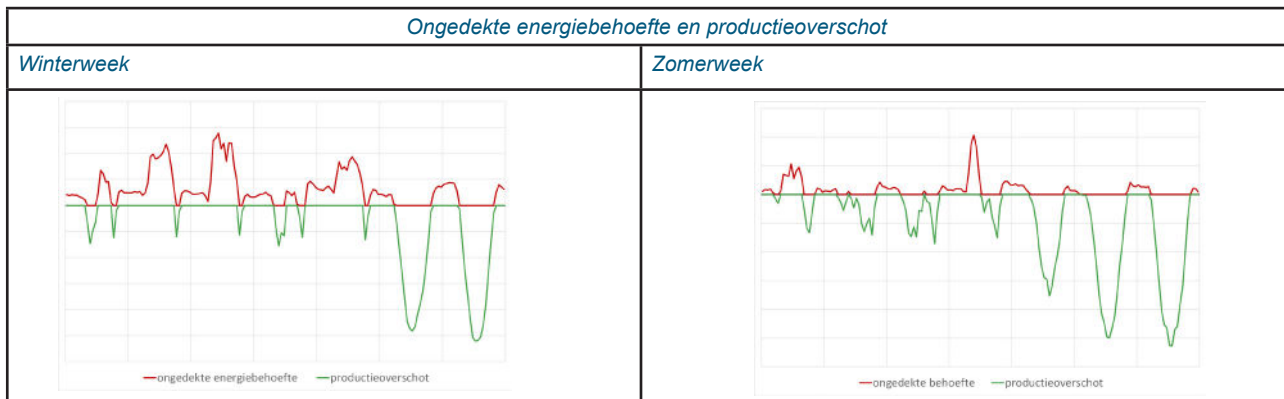
Op basis van de productiepatronen zoals beschreven in paragraaf 5.1 en de energiebehoefte zoals beschreven in 5.2 is in Tabel 2 beschreven hoe deze zich op jaarbasis tot elkaar verhouden. In Tabel 3 is beschreven hoe deze zich op weekbasis tot elkaar verhouden.

Hieruit is te concluderen dat er in zijn algemeenheid een relevante mismatch is tussen energieproductie en energiebehoefte op de tijdschaal van de seizoenen, met in de zomer een vooral een productieoverschot en in de winter vooral een grote ongedekte energiebehoefte. Omdat de grote bewegingen in de mismatch tussen opwek en behoefte meestal wel opgevangen kan worden door het flexibele deel van de energievoorziening speelt de behoefte aan energieflexibiliteit zich vooral af op de kortere tijdschaal. Dit neemt niet weg dat een gebouw dat qua energiebehoefte ook op de tijdschaal van een jaar beter aansluit bij de ‘jaarswing’ van de duurzame energieproductie een relevante bijdrage levert aan de verduurzaming.

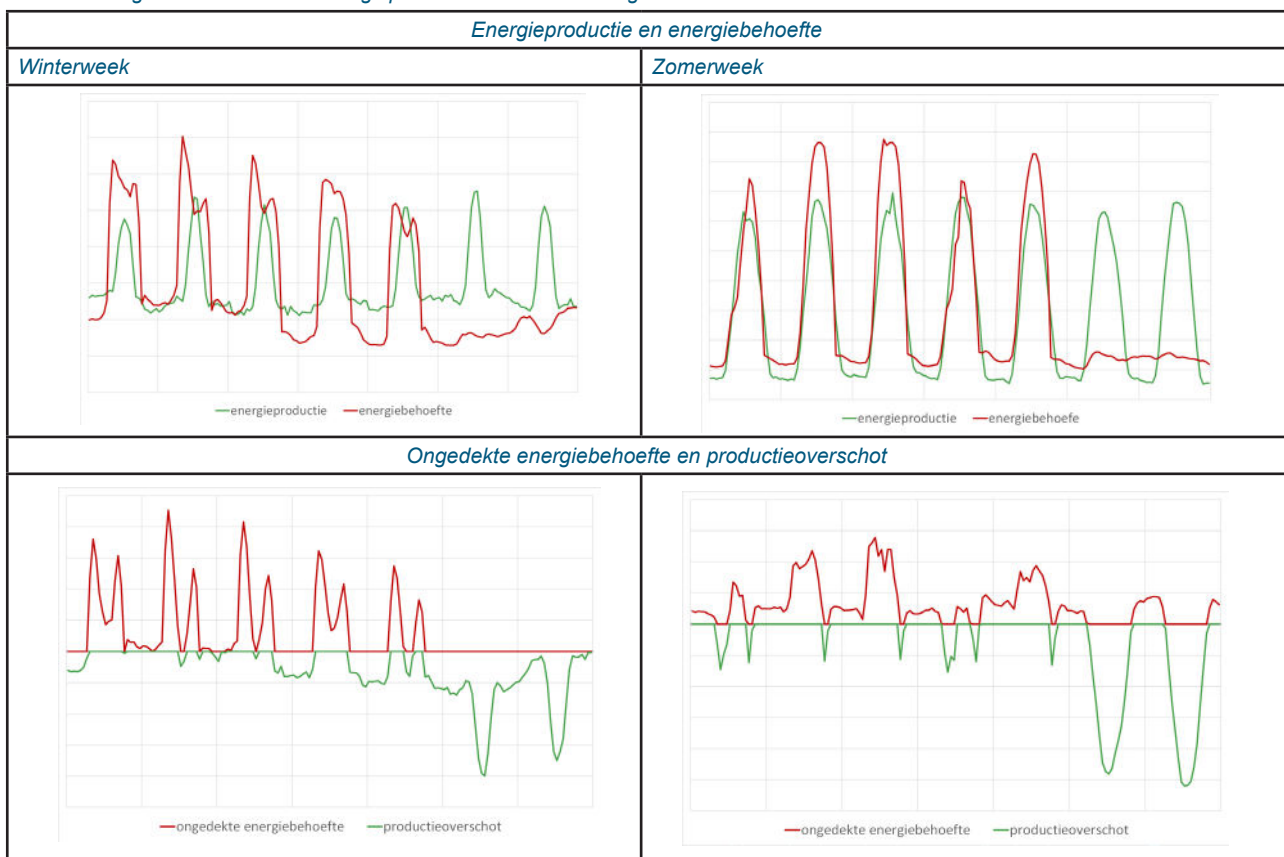
Bij de tijdschaal van een week zit het grootste deel van de mismatch tussen de werkdagen en de weekenddagen. Het patroon van de ongedekte energiebehoefte en de overproductie op de werkdagen is erg dynamisch en verschilt tussen zomer en winter en vertoont dus over de loop van het jaar verschuivingen.

Tabel 2: Energiebehoefte versus energieproductie over het jaar genormaliseerd

Energiebehoefte en energieproductie	Ongedekte energiebehoefte en productieoverschot
<p style="text-align: center;">— productie — behoefte</p>	<p style="text-align: center;">— ongedekte behoefte — productieoverschot</p>
<i>Gemiddelde patronen</i>	
Winterweek	Zomerweek
<p style="text-align: center;">— productie — behoefte</p>	<p style="text-align: center;">— productie — behoefte</p>



Tabel 3: Energiebehoefte versus energieproductie over een week genormaliseerd



#### 4.4. Energiemarkt

De flexibiliteit die nodig is in de duurzame energievoorziening kan deels geleverd worden door grootschalige voorzieningen zoals opslag door middel van vliegwielen voor regulering binnen zeer korte periodes (seconden, minuten), batterij-installaties voor middellange periodes (uren, dagen) of bijvoorbeeld een stuwmeer voor de langere periodes (seizoenen). Deze voorzieningen zijn kostbaar, daarom is het noodzakelijk om ook het potentieel aan flexibiliteit in de gebouwde omgeving zo veel mogelijk te benutten.



De gebouweigenaar of gebouwgebruiker heeft geen zicht op de behoefte aan energieflexibiliteit. De bijdrage van een enkel gebouw aan het leveren van de in de energievoorziening benodigde flexibiliteit is gering. De aggregator, een nieuwe, juridisch nog niet volledig vormgegeven<sup>7</sup> rol in de energiemarkt, moet er voor gaan zorgen dat het aanbod en vraag van energieflexibiliteit bij elkaar gebracht worden. De aggregator kan namens een groep van gebouweigenaren (dit kunnen ook woningeigenaren zijn) de vraag- en aanbodflexibiliteit bundelen en geaggregeerd op een flexibiliteitsmarkt aanbieden. De aggregator vormt daarmee een soort virtuele energiecentrale die op afroep bij- en af kan schakelen.

Voor het uitvoeren van de rol van aggregator is de beschikbaarheid van de relevante informatie noodzakelijk. Informatie over de belasting van het stroomnet, het aanbod van energie en informatie over de energiebehoefte en flexibiliteitsmogelijkheden bij de eigen aangesloten gebouwen of voorzieningen. Dit vergt een verdergaande digitalisering van de energiemarkt en standaardisatie van informatie-uitwisselingsprotocollen.

Voor de gebouweigenaar of gebouwgebruiker is het van belang dat de informatie over het eigen energiegebruik en de al dan niet beschikbare energieflexibiliteit goed ontsloten wordt voor de aggregator. Een energiemanagementsysteem dat in staat is de benodigde koppelingen tussen de in het gebouw aanwezige voorzieningen en de aggregator te maken is essentieel.

In de huidige organisatie van de energiemarkt zorgt de behoefte aan reservecapaciteit (deze kan overigens ook negatief zijn) voor de beste businesscase in relatie tot energieflexibiliteit. Deze reservecapaciteit wordt ingekocht door Tennet op de onbalansmarkt.

---

<sup>7</sup>Op het moment van schrijven worden in de energiemarkt de regels en protocollen voor de aggregator-rol uitgewerkt.





## HOOFDSTUK 5 - GEBOUWONTWERP

Bij het ontwerp van gebouwen hebben maatregelen om de energiebehoefte te reduceren altijd voorrang boven specifieke maatregelen om energieflexibiliteit te bewerkstelligen. Deels vallen deze maatregelen ook samen. Verbetering van isolatie en energie-efficiënte ventilatie zijn bijvoorbeeld essentieel om de energieflexibiliteit met betrekking tot verwarmings- en koelinstallaties goed te ontsluiten. In zijn algemeenheid kunnen de volgende regels aangehouden worden bij het ontwerpen van gebouwen:

Onderzoek of er, naast elektriciteit, andere energiedragers beschikbaar zijn voor verwarmen of koelen. Als naast elektriciteit nog een andere energiedrager beschikbaar is voor verwarmen of koelen, kan een hybride oplossing gekozen worden waarbij gebruik gemaakt kan worden van een brandstofwissel, een flexibel instrument in relatie tot de energieflexibiliteit van het gebouw.

Maakt het gebouw geschikt voor gebruik van de adaptieve temperatuurgrenswaarden. Dit kan met name in een gebouw waarin de gebruikers goede mogelijkheden hebben het binnenklimaat te beïnvloeden en ramen te openen. De adaptieve temperatuurgrenswaarden geven de mogelijkheid een bandbreedte aan te houden voor de binnentemperatuur; dit is een randvoorwaarde voor het ontsluiten van de energieflexibiliteit bij het gebruik van verwarmings- en koelinstallaties.

Zorg voor een minimale energiebehoefte door het beperken van energieverliezen. Door goede isolatie en energie-efficiënte ventilatie verliest het gebouw minder energie, waardoor de maximale afschakeltijd van een verwarmings- of koelinstallatie flink zal toenemen.

Zorg voor voldoende actieve thermische massa. Thermische massa zorgt ervoor dat de in de massa opgeslagen energie nuttig gebruikt kan worden op het moment dat een verwarmings- of koelinstallatie tijdelijk uitgeschakeld wordt. Deze thermische massa kan in de constructie van het gebouw zitten of kunstmatig toegevoegd worden, bijvoorbeeld met behulp van PCM panelen. Belangrijk bij het ontwerp is dat de thermische massa ook echt goed geactiveerd kan worden. Een gebouw met veel thermische massa biedt overigens ook veel mogelijkheden ten aanzien van passieve koeling.

Maak thermische energieopslag geschikt voor energieflexibiliteit. Als er zich buffervaten met warmwater in het gebouw bevinden, bijvoorbeeld ten behoeve van warm tapwater of ten behoeve van een warmtepomp, maak deze dan geschikt voor toepassing als “warmtebatterij” die flexibel kan inspelen op de behoefte vanuit de duurzame energievoorziening. Denk bij het toepassen van buffervaten aan het ruimtebeslag en eventuele constructieve consequenties.



## HOOFDSTUK 6 - TECHNIEKEN

In dit hoofdstuk worden de gebouwgebonden technieken beschreven die kunnen bijdragen aan de energieflexibiliteit van het gebouw. Uiteindelijk heeft flexibiliteit in het gebouw altijd betrekking op het gebouw (gebruik, comfort, thermische massa), een vorm van thermische opslag, elektrische opslag of op een brandstofwissel.

### 6.1. Gebouw

Drie relevante eigenschappen hebben een wezenlijk effect op de energieflexibiliteit van het gebouw.

#### Verminderen van warmteverlies

Verminder warmteverlies door goede isolatie en energiezuinige ventilatie. Dit voorkomt bijvoorbeeld dat het gebouw snel afkoelt als de verwarming tijdelijk uitgezet wordt.

#### Vergroten van actieve thermische massa

De actieve thermische massa van het gebouw is in feite een warmtebuffer. Als een verwarming wordt uitgezet en de binnentemperatuur in het gebouw daalt, levert de actieve thermisch actieve massa nog warmte aan de ruimte.

#### Grotere bandbreedte voor comforttemperatuur.

Als de verwarming (of koeling overigens) uitgezet wordt zal het gebouw afkoelen. Hoe meer afkoeling acceptabel is, hoe groter de energieflexibiliteit van het gebouw.

Onderzoek<sup>8</sup> naar het kwantificeren van de energieflexibiliteit bij een referentiegebouw laat het effect zien van een aantal eigenschappen van het gebouw op de energieflexibiliteit van het gebouw.

Tabel 4: *Indicatief effect van verschillende gebouweigenschappen op energieflexibiliteit van de verwarmingsinstallatie.*

<i>Maatregel</i>	<i>Afschakeltijd</i>	<i>Flexibel vermogen</i>
Referentiegebouw	14 uur	13 W/m <sup>2</sup>
Verbeterde isolatie van de gevel (U = 0,11 W/m <sup>2</sup> .K)	33 uur	8 W/m <sup>2</sup>
Grotere thermisch actieve massa	48 uur	13 W/m <sup>2</sup>
Comfort bandbreedte (24 °C -18 °C)	64 uur	20 W/m <sup>2</sup>

In Tabel 4 is afschakeltijd de periode dat de verwarmingsinstallatie uitgeschakeld kon worden, het flexibel vermogen is het uitgestelde vermogen in W/m<sup>2</sup>. De maximale energieflexibiliteit kon echter alleen gerealiseerd worden als het gebouw gedurende twee weken volledig was "opgeladen".

In de hierna volgende paragrafen wordt verder ingegaan op de impact van de comfortbandbreedte en de actieve thermische massa.

<sup>8</sup> Weiss, T. (2020), "Energy flexibility and shiftable heating power of building components and technologies"



### 6.1.1. Comfort

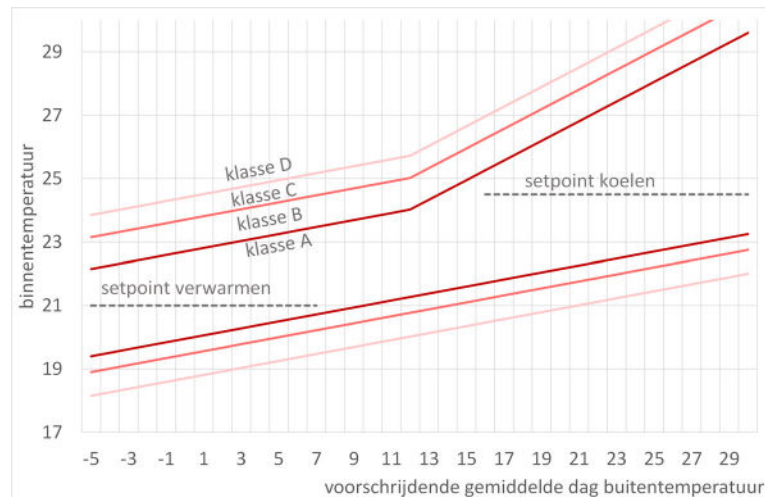
In volledig airconditioned gebouwen wordt de binnentemperatuur binnen een hele kleine bandbreedte constant gehouden. Hier doet zich wat men zou kunnen noemen de nauwe temperatuurgrenzen-paradox voor. Hoe nauwer de grenzen waarbinnen de binnentemperatuur door airconditioning gehouden wordt, des te meer de bewoners afleren om zich door hun eigen gedrag, met name aanpassing van de kledingisolatie, comfortabel te houden en des te meer hun lichaam afleert om zich fysiologisch aan hogere temperaturen aan te passen. Als er dan toch, wat onvermijdelijk is in deze gebouwen met complexere installaties, incidentele afwijkingen van de ingestelde temperatuur optreden, die niet samenhangen met de buitentemperatuur, zal dit tot discomfort en ontevredenheid leiden.

Een zekere dynamiek van de binnentemperatuur gaat over het algemeen juist niet ten koste van de comfortbeleving. De bandbreedte van de binnentemperatuur waarbinnen mensen zich thermisch comfortabel voelen geeft mogelijkheden ten aanzien van energieflexibiliteit. De mate waarin mensen een zekere bandbreedte ten aanzien van het comfort accepteren hangt sterk samen met de beïnvloedbaarheid van het comfort door bijvoorbeeld te openen ramen of te bedienen zonwering.

Bij het ontwerpen van gebouwen is de veronderstelde gewenste binnentemperatuur een belangrijk uitgangspunt. Daarbij wordt vaak de methode van de adaptieve grenswaarden (ATG) gebruikt. Kenmerkend voor deze methode is:

- De psychologische adaptatie van gebruikers aan hogere buitentemperaturen. Bij hogere buitentemperaturen worden ook hogere binnentemperaturen geaccepteerd.
- In gebouwen waar gebruikers meer mogelijkheden hebben om het binnenklimaat zelf te beïnvloeden accepteren de gebruikers een grotere variatie van de binnentemperatuur.

In Figuur 13 zijn de grenswaarde gegeven van de ATG methode.



Figuur 12: Bandbreedte van binnentemperaturen voor verschillende typen gebouwen.

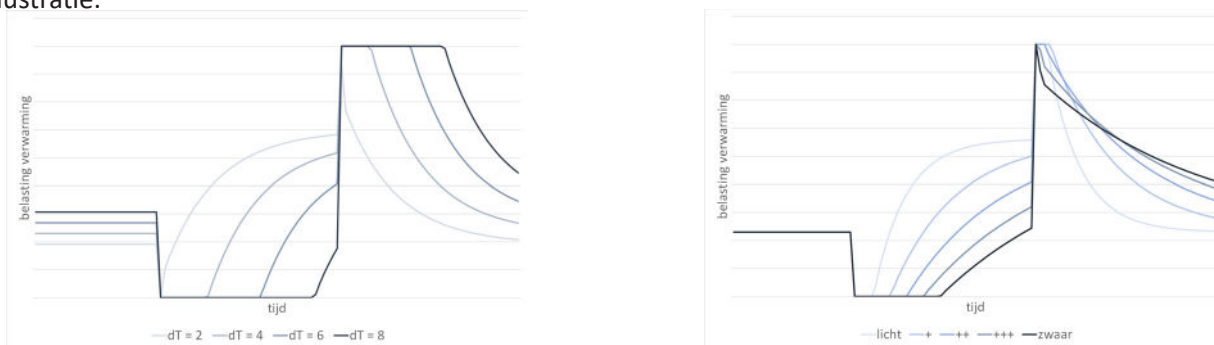
Op basis van de 'comfortruimte' in de adaptieve grenstemperaturen is in Figuur 13 weergegeven wat er gebeurt met de belasting van de verwarmingsinstallatie en de binnentemperatuur bij een flexibiliteitsgebeurtenis waarbij enkel de binnentemperatuur als variabele gebruikt is.



De vorm van deze grafiek hangt af van verschillende factoren:

- De thermisch actieve massa van het gebouw
- Het isolatieniveau
- De grootte van de temperatuursprong
- Buitentemperatuur en zinstraling

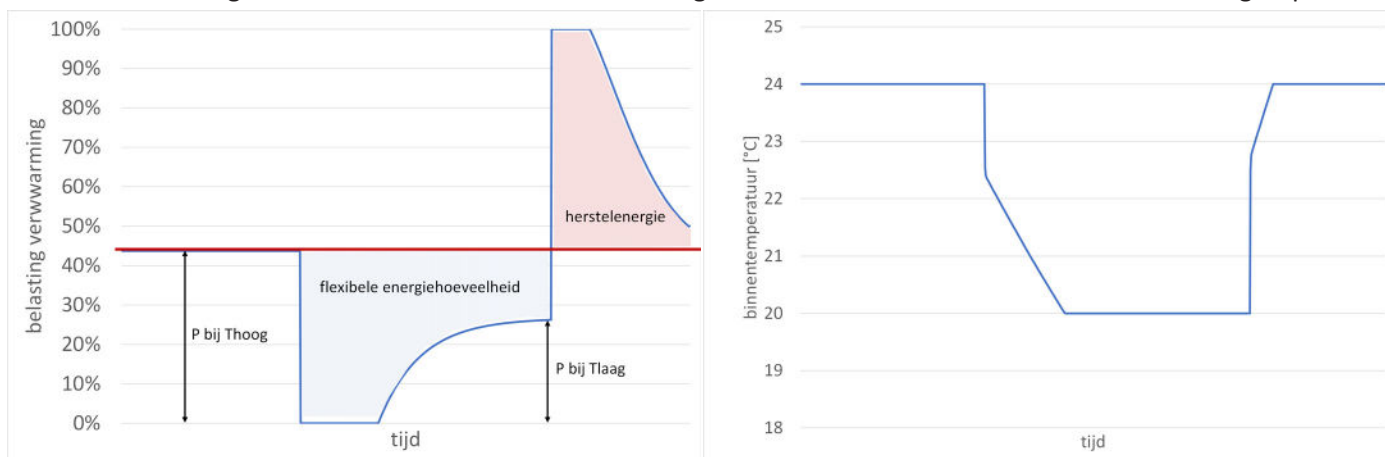
Om de vorm van het gedrag van een dergelijke flexibiliteitsgebeurtenis onder ‘laboratoriumcondities’ te kunnen onderzoeken wordt buitentemperatuur constant verondersteld (onder winterse condities bijvoorbeeld gelijk aan 4°C) en wordt de invloed van zon achterwege gelaten. In Figuur 13 zijn de x-as en y-as niet gekwantificeerd, de figuur is gebaseerd op een eenvoudig rekenmodel en dient enkel ter illustratie.



Figuur 13: Illustratief effect op belasting van verwarming (links) en op binnentemperatuur (rechts) van tijdelijk uitzetten van de verwarmingsinstallatie bij een bepaalde acceptabele temperaturdaling.

In Figuur 14 is te zien dat de verwarming uit gaat gedurende een bepaalde tijd en daarna langzaam weer bijkomt. Dat de verwarming langzaam weer bijkomt in plaats van in één keer voluit heeft te maken met de bijdrage die de (opgewarmde) massa van het gebouw levert.

In Figuur 14 is de referentiebelasting en een flexibele belasting weergegeven. Het gearceerde deel is de flexibele energiehoeveelheid. Dit wordt als indicator gebruikt voor het effect van een flexibiliteitsingreep.



Figuur 14: Boven de referentiebelasting verwarmingsinstallatie versus flexibele belasting. Het blauw gearceerde deel is de verschoven energiehoeveelheid. P bij Thoog is het benodigde verwarmingsvermogen bij de hoge comforttemperatuur en P bij Tlaag is het benodigde verwarmingsvermogen bij de lage comforttemperatuur. Onder de binnentemperatuur gedurende de flexibiliteitsingreep.

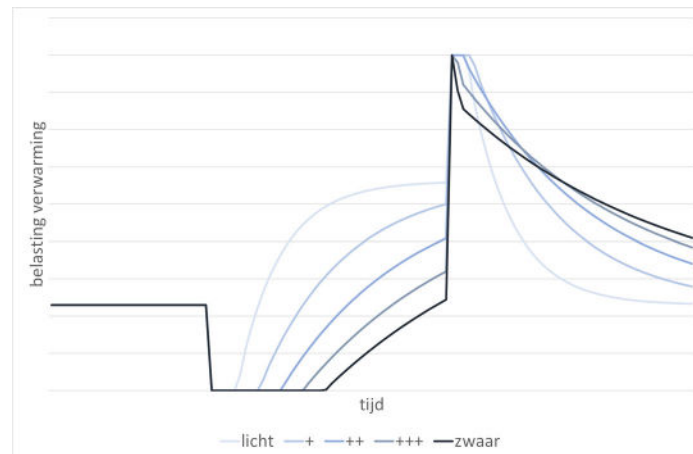
Te zien is dat na verloop van tijd er verwarmingsvermogen bijgezet moet worden. Dit komt omdat de bijdrage van de thermisch actieve massa afneemt, de massa koelt dan af.



De voorspelbaarheid en de duur van de flexibiliteitsingreep kan vergroot worden door de verwarming niet volledig af te schakelen, maar de belasting op het niveau te houden dat (naar verwachting) nodig is bij de lagere comforttemperatuur. Er ontstaat dan geen langzaam verloop in het benodigd vermogen voor verwarming en de afschakeltijd kan aanzienlijk verlengd worden.

### 6.1.2. Thermisch actief gebouw

Naast de marge in de comforttemperaturen speelt de thermisch actieve massa van een gebouw een belangrijke rol bij het gedrag van de verwarmings- of koelinstallaties in het geval van een flexibiliteitsgebeurtenis. Bij onderstaande analyse is uitgegaan van een temperatuurval van 4 °C en is de thermisch actieve massa van het gebouw gevarieerd.



*Figuur 15: Effect op belasting van verwarming en op binnentemperatuur van tijdelijk uitzetten van de verwarmingsinstallatie bij een temperatuurdaling van 4°C en variërende gebouwmassa.*

Te zien is dat de thermische massa van het gebouw een wezenlijk effect heeft op de maximale duur van de flexibiliteitsgebeurtenis.

### 6.1.3. Gebouwinstallaties

Installaties leveren de energiebehoefte die het gebouw, eventueel na een flexibiliteitsgebeurtenis zoals bij paragraaf 5.1. en 5.2. beschreven. Daar kan flexibiliteit in zitten op het moment dat er in de installatie sprake is van thermische energieopslag of als er een mogelijkheid is van een brandstofwissel.

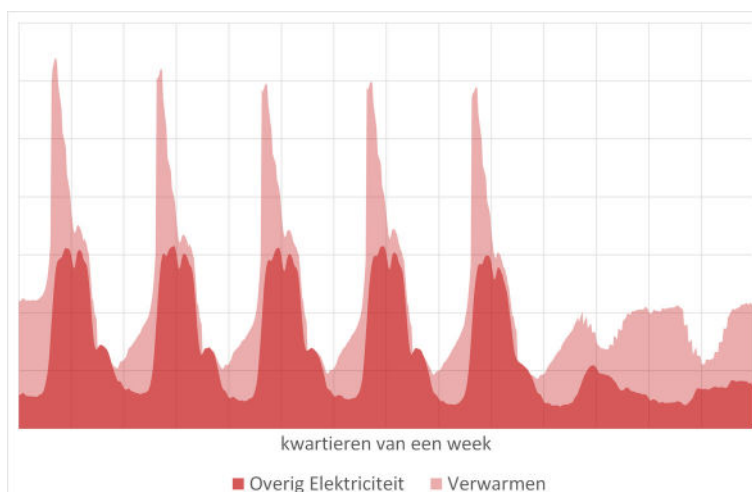
Het effect van een brandstofwissel en de thermische energieopslag wordt in de hierna volgende paragrafen besproken.

### 6.1.4. Brandstofwissel

Een brandstofwissel is mogelijk bij installaties waarbij meerdere energiebronnen in te zetten zijn voor het leveren van een energiefunctie. Meestal zal een warmtepomp de primaire energiebron zijn. Als secundaire bron kunnen brandstofgestookte (aardgas, biomassa, waterstof) ketels voor warmtelevering gebruikt worden.

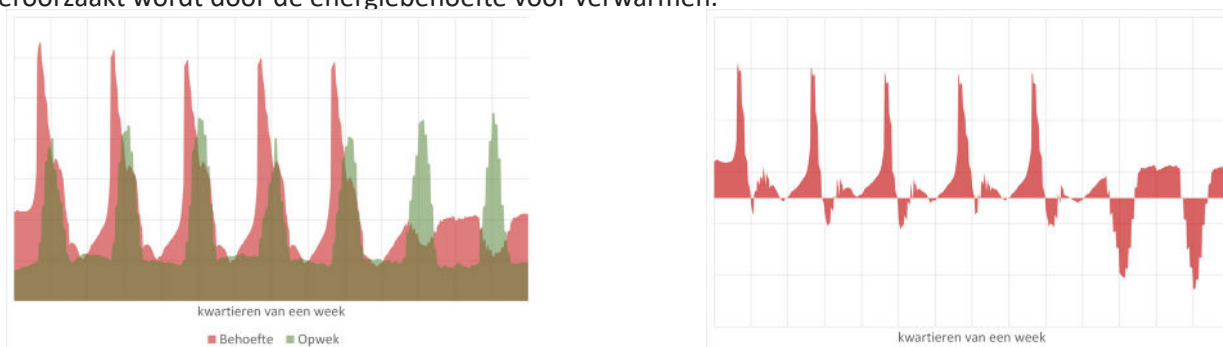
Een warmtepomp in combinatie met een aardgasgestookte verwarmingsketel wordt een hybride warmtepomp genoemd.

In onderstaande Figuur 16 t/m Figuur 19 is een voorbeeld gegeven van het toepassen van een brandstofwissel.



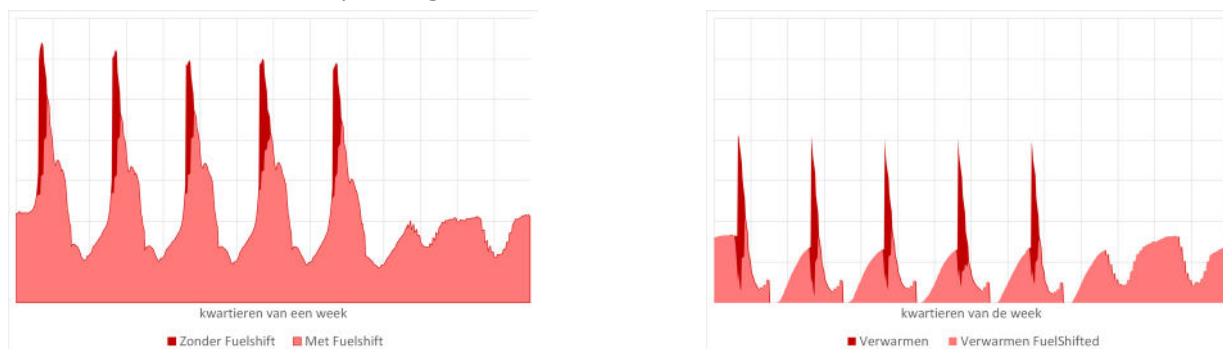
Figuur 16: Energiebehoefte in een week voor verwarmen plus (gestapeld) overig (illustratief).

In Figuur 16 is de energiebehoefte (elektriciteit) gegeven. Daarin is de energiebehoefte voor verwarmen en de overige energiebehoefte apart (gestapeld) aangegeven. Te zien is dat de piek in de ochtend voornamelijk veroorzaakt wordt door de energiebehoefte voor verwarmen.



Figuur 17: Links de energiebehoefte en duurzame opwek. Rechts de ongedekte energiebehoefte

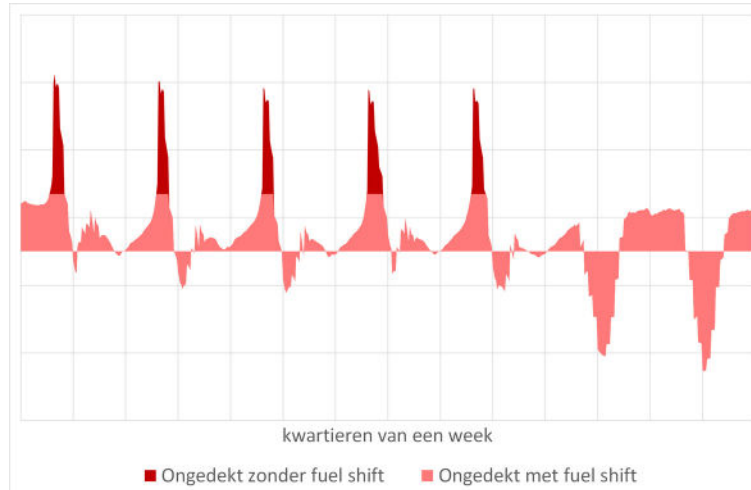
In Figuur 17 is links een de energiebehoefte met een hypothetisch productieprofiel gegeven en rechts de ongedekte energiebehoefte op basis van de energiebehoefte en het productieprofiel. Te zien is dat de ongedekte energiebehoefte gekarakteriseerd wordt door forse (ochtend)pieken. Met behulp van een brandstofwissel worden deze pieken geëlimineerd.



Figuur 18: Pieken afvlakken met brandstofwissel. Links de resulterende totale behoefte, rechts alleen het aandeel verwarmen.



Links in Figuur 18 is het effect van de brandstofwissel gegeven. De piekvraag wordt nu niet meer geleverd door de elektrische warmtepomp, maar met een andere energiedrager, zoals aardgas of waterstof. De rechtergrafiek geeft alleen de energiebehoefte voor verwarmen zonder de brandstofwissel (donker- plus lichtrood) en met de brandstofwissel (lichtrood). In Figuur 19 is het effect van de brandstofwissel op de ongedekte energiebehoefte te zien.



*Figuur 19: Het effect van de brandstofwissel op de ongedekte energiebehoefte.*

In dit voorbeeld is het algoritme voor de inzet van de brandstofwissel eenvoudig: als de ongedekte energiebehoefte boven een bepaalde waarde komt wordt de brandstofwissel ingezet. Een brandstofwissel is een erg flexibel instrument en kan dan ook op allerlei manieren ingezet worden.

### 6.3. Elektrische opslag

Elektrische opslag in de vorm van een batterij is een flexibele vorm van opslag omdat energie gedurende langere tijd opgeslagen kan worden. Een veel voorkomende toepassing van een batterij is het vergoten van de zelfconsumptie bij toepassing van duurzame energieopwekking door zonnecellen. Dit komt er op neer dat de overdag te veel opgewekte duurzame energie opgeslagen wordt in de batterij; de opgeslagen energie wordt dan gedurende de avond en nacht in het gebouw gebruikt, zie ook paragraaf 7.1. Daarnaast is een batterij bij uitstek geschikt om snel en flexibel te reageren op (energie) prijssprongen.

Naast capaciteit (maximale energie-inhoud) en laadvermogen zijn (ten aanzien van energieflexibiliteit) de belangrijkste eigenschappen van de batterij de efficiency van de laadcyclus en de effectieve capaciteit.

### 6.4. Thermische opslag

Thermische opslag wordt in de installatietechniek al veelvuldig toegepast met als voornaamste doel om pieken in de energiebehoefte af te vlakken. Een elektrische boiler is daarvan een goed voorbeeld. Het benodigde vermogen voor een warme douche is circa 15 kW, terwijl het aansluitvermogen bij toepassing van een boiler 2 tot 5 kW is. Ook een warmtepomp wordt vaak gebruikt in combinatie met een buffervat met als voornaamste doel om veelvuldig aan- en uitschakelen (pendelen) van de warmtepomp te voorkomen.

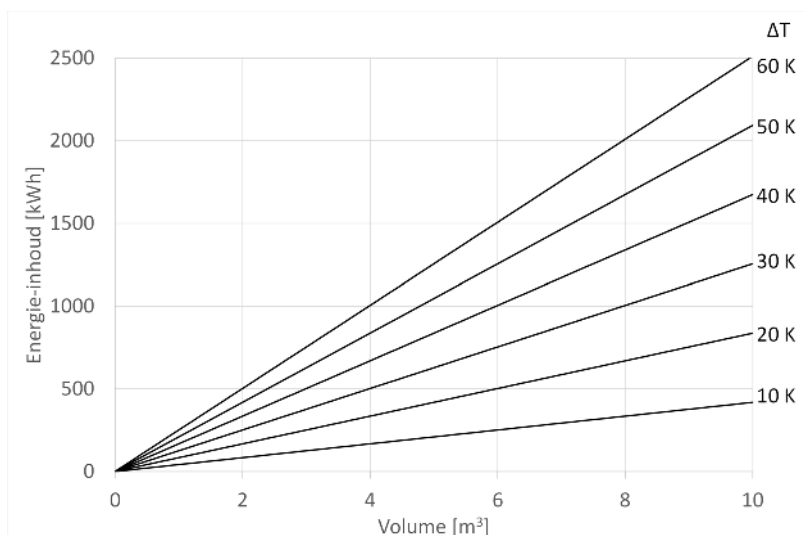


### 6.4.1. Warmwaterbuffer

Een warmwaterbuffer kan gebruikt worden om de warmtebehoefte en de energiebehoefte in de tijd van elkaar los te koppelen. Het meest evident is het gebruik van een warmwaterbuffer ten behoeve van het afvlakken van de piekbehoefte voor verwarmen, bijvoorbeeld omdat het piekvermogen van de warmtelevering niet voldoende is. Maar een warmtebuffer kan ook dynamisch geladen en ontladen worden op basis van andere prikkels, bijvoorbeeld als er een overschot is aan lokaal geproduceerde duurzame energie.

Een warmwaterbuffer is geschikt om te gebruiken in relatie tot de energiebehoefte van ongeveer een dag. Voor langere perioden is de warmwaterbuffer minder geschikt vanwege de omvang en de energieverliezen.

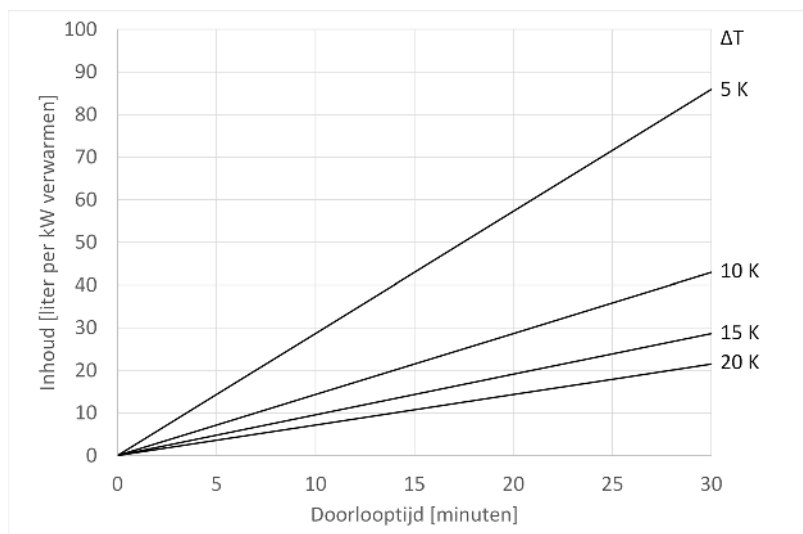
De theoretische opslagcapaciteit van een warmwater voorraadvat is recht evenredig met het volume en het temperatuurniveau, zie Figuur 20. In relatie tot energieflexibiliteit kan de energie-inhoud zoals gegeven in Figuur 20 ook gezien worden als de Flexibele energiehoeveelheid van het voorraadvat die ook gekenmerkt wordt door een vulniveau, een uitschakeltijd en flexibel vermogen.



Figuur 20: Relatie tussen volume, temperatuurverschil en energie-inhoud bij een warmwatervoorraadvat.

Omdat het temperatuurverschil (tussen aanvoer en retour) bij warmtepompinstallaties relatief klein is (5 °C à 15 °C) is de benodigde omvang van een buffer relatief groot. In Figuur 21 is een indicatie gegeven van de benodigde grootte van de buffer in relatie tot de doorlooptijd van de warmtepomp.





Figuur 21: Relatie tussen maximale doorlooptijd van verwarmingsinstallatie, het verschil tussen aanvoer – en retourtemperatuur van de verwarmingsinstallatie en de benodigde inhoud van een buffervat.

Als bijvoorbeeld een warmtepomp een verwarmingsvermogen heeft van 5 kW en de verwarmingsinstallatie werkt bij aanvoer en temperatuur van 40/30 ( $\Delta T = 10$  °C). De gewenste doorlooptijd is bijvoorbeeld 30 minuten. De benodigde bufferinhoud is dan:

$$5 \text{ [kW]} * 43 \text{ [litr/kW]} = 215 \text{ liter.}$$

Het is duidelijk dat er veel bufferinhoud nodig is om de warmtepomp enige flexibiliteit met betrekking tot het schakelgedrag te geven. Die flexibiliteit kan overigens ook komen uit de bandbreedtes ten aanzien van het comfort en de thermische massa van het gebouw, zoals hiervoor al is beschreven.

Bij woningen is er veel warm tapwater nodig. Bij een warmtepompinstallatie wordt daarvoor meestal een voorraadvat gebruikt. Dit voorraadvat biedt mogelijkheden om flexibiliteit te realiseren bij het schakelgedrag van de warmtepomp. Het voordeel van dit voorraadvat is dat het te overbruggen temperatuurverschil groter is, bijvoorbeeld van 10 °C koud drinkwater naar 60 °C warmwater in het voorraadvat, waardoor er meer flexibiliteit is bij het schakelgedrag van de warmtepomp. Een belangrijke randvoorwaarde is dat het voorraadvat vol is op het moment van de piekbehoefte voor warmtapwater.

Een voorraadvat voor drinkwater (een boiler) kan in de zomer gebruikt worden om een teveel aan duurzame energieproductie (lokaal of op het net) te gebruiken. Zo kan het voorraadvat ook gebruikt worden om de zelfconsumptie te vergroten.

#### 6.4.2. Phase changing materials (PCM)

In de faseovergang van vloeibaar naar vast en vice versa kan veel energie opgeslagen worden. Met name als deze faseovergang plaats vindt bij een bruikbare temperatuur kan dit goed benut worden. Dit zijn meestal PCM's op basis van zouten. PCM's kunnen gebruikt worden om de actieve thermische massa, en daarmee de traagheid, van een gebouw te vergroten. Actieve thermische massa (in combinatie met passieve koeling) speelt vooral een rol bij het verlagen van de koelbehoefte. Voor de rol van actieve thermische massa bij energieflexibiliteit zie paragraaf 6.1.2.

Er zijn verschillende toepassingen met PCM's die in gebouwen nuttig kunnen zijn, zoals koelconvectoren, koelplafonds of als toevoeging aan beton.



Bij toepassen van PCM's is het van belang dat cyclus van smelten en stollen in evenwicht is. Soms zijn speciale maatregelen nodig om dat evenwicht te bewerkstelligen, bijvoorbeeld door het toepassen van nachtventilatie om PCM-koelplafonds te regenereren.

PCM's met hogere smelt/stoltemperaturen kunnen gebruikt worden in warmtebuffers om warmtepieken te spreiden of kunnen gebruikt worden in tapwatervoorraadvaten om de warmtecapaciteit te vergroten. Dit kan bijvoorbeeld relevant zijn voor het vergroten van de flexibiliteit van het schakelregime van een warmtepomp. In paragraaf 6.4.1 is beschreven dat een het nut van een warmwaterbuffer bij een warmtepomp beperkt is vanwege het kleine temperatuurverschil tussen aanvoer en retour. Omdat de energieopslag in een faseovergang van een PCM equivalent is met een temperatuurverschil van water van circa 60 °C kan er ook bij een klein temperatuurverschil een forse hoeveelheid energie opgeslagen worden. Inmiddels zijn er kant-en-klare producten op de markt voor deze toepassing, zoals de Flamco Flextherm Eco, zie Figuur 22.



*Figuur 22: Thermische batterij van Flamco*

### **6.4.3. Zouthydraat warmteopslag**

Warmteopslag in zouthydraat werkt met een zout; als het zout in contact komt met waterdamp bindt de waterdamp aan het zout en ontstaat er een nieuw zoutkristal. Bij deze reactie komt warmte vrij, die via een warmtewisselaar aan het verwarmingscircuit kan worden afgegeven. Wanneer vervolgens warmte wordt toegevoegd, dan ontbindt het kristal weer in water en zout en is het vat weer opgeladen.

De zouthydraat warmteopslag is een recente ontwikkeling en nog geen marktrijp product. Volgens de onderzoekers kan er met eenzelfde volume van dit mengsel minimaal 10 keer meer energie opgeslagen worden dan in water. De warmte wordt chemisch gebonden, waardoor er gedurende de opslagperiode geen warmteverliezen zijn. De warmtedichtheid van het systeem is ongeveer 1 GJ/m<sup>3</sup>. Ter vergelijking, in een waterbuffervat kan bij een temperatuurverschil van 50°C (typisch voor een warmtapwaterboiler) 0,2 GJ opgeslagen worden.

Dit systeem biedt potentieel de mogelijkheid om warmte in de zomer op te slaan ten behoeve van het voorzien in ruimteverwarming in de winter.

De eerste toepassing die de onderzoekers in gedachten hebben is het met behulp van containers transporteren van restwarmte naar plekken waar de warmte nuttig gebruikt kan worden.



Figuur 23: werking zouthydraat warmteopslag. Links het laden van de opslag met warmte (bijvoorbeeld met een zonnecollector), rechts het ontladen, het gebruik van warmte in het gebouw.

### 6.4.4. Waterstof

Door elektrolyse kan elektriciteit omgezet worden in waterstof. Waterstof is zonder noemenswaardige opslagverliezen op te slaan en op een later moment te gebruiken om bijvoorbeeld warmte of, met behulp van een brandstofcel, elektriciteit en warmte mee te maken. De verbrandingswaarde van waterstof is 120 MJ/kg, bijna drie keer zo veel als de verbrandingswaarde van aardgas (45 MJ/kg).

Waterstof kan ingezet worden als brandstof voor verwarmen of als middel om energie op te slaan waarna het via een brandstofcel omgezet kan worden in elektriciteit (en warmte). Om waterstof efficiënt op te kunnen slaan moet het gecomprimeerd worden. Kosteneffectieve en veilige opslag is één van de belangrijkste uitdagingen bij de toepassing van waterstof in gebouwen. Het rendement van elektrolyse is circa 75%, het rendement van comprimeren circa 90% en het elektrisch rendement van de brandstofcel is ongeveer 50%. Het totaal (elektrisch) rendement is dan ongeveer 34%. Dit houdt in dat voor het produceren van 1 kWh waterstofstroom bijna 3 kWh (groene) stroom nodig is. Het direct en optimaal gebruiken van groene stroom (onder andere door het inzetten van flexibiliteit) heeft altijd de voorkeur boven de productie van waterstofgas. Als ook de warmte van de brandstofcel gebruikt wordt, is het totaalrendement circa 65%.

Een interessante ontwikkeling voor gebouwgebonden productie van waterstof zijn solar hydrogen panels. Dit zijn panelen waar direct waterstof geproduceerd wordt uit zonlicht (kunstmatige fotosynthese) met een rendement van 15%. De (systeem)verliezen die gepaard gaan bij elektrolyse worden hierbij voorkomen. Een belangrijk voordeel van het gebruik van waterstof voor verwarmen in gebouwen is dat er geen stroom gebruikt wordt voor verwarming. Eén van de problemen in de duurzame energievoorziening is de mismatch tussen de hogere elektriciteitsvraag in het stookseizoen en de hogere elektriciteitsproductie in zomer. Waterstof als energiedrager voor verwarmen maakt dit twee communicerende vaten. Als waterstof in brandstofcellen gebruikt wordt bij het verwarmen van gebouwen is dit effect nog sterker omdat er dan ook meer duurzame energieproductie in de winter plaats vindt<sup>9</sup>.

Warmtepompen zijn zeer geschikt voor het leveren van een basislast bij het verwarmen. In bestaande gebouwen waar lastig een lage temperatuur warmte-afgiftesysteem te realiseren is, kan de warmtepomp met een waterstofketel een interessante hybride optie zijn.

Gebouwgebonden productie van waterstof lijkt voorlopig niet haalbaar. De relevante succesfactor voor de toepassing van waterstof in de gebouwde omgeving is het gebruik van de (bestaande) infrastructuur voor de distributie van waterstof. De technische mogelijkheden voor gebouwgebonden toepassing zijn overigens wel bewezen in een demonstratieproject met woningen in Goeree-Overflakkee.

<sup>9</sup> Rongé, J., KU Leuven, 2021, Use of Hydrogen in buildings BatHyBuild-2904202



### 6.5. Elektrisch vervoer

De capaciteit van de accu van een elektrische auto is gemiddeld circa 50 kWh. Een gemiddeld huishouden kan je daarmee enkele dagen van elektriciteit voorzien. Met zo'n 300.000 elektrische auto's in Nederland bieden elektrische auto's dan ook enorm potentieel ten aanzien van energieflexibiliteit. Voornamelijk kennen de accu's van auto's geen technische mogelijkheid voor bidirectioneel laden. Auto's kunnen dus nog niet gebruikt worden om energie te leveren. Met name ook juridische problemen vormen een grote belemmering voor de doorbraak van auto's als actieve participant in de duurzame energievoorziening. Van wie is de energie die in de accu zit? Wat als ik mijn auto op mijn werk oplaad en die vervolgens gebruik om mijn huis draaiende te houden?

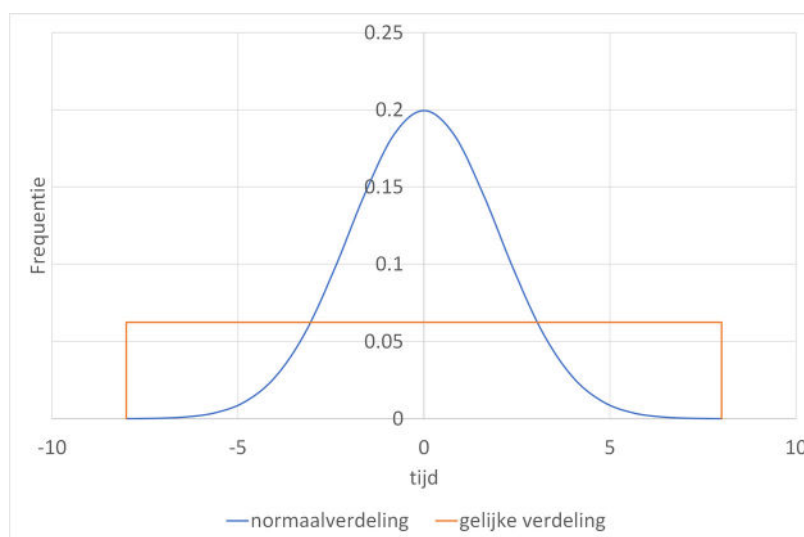
Ook als de accu niet kan terugleveren kan de elektrische auto al een bijdrage leveren door het laden te optimaliseren in relatie tot de duurzame energievoorziening. Deze toepassing wordt, in combinatie met dynamische energietarieven, ook al toegepast.

### 6.6. Clusteren

Veel gebeurtenissen zijn normaal verdeeld. Dat wil zeggen dat de frequenties van het optreden van deze gebeurtenissen uitgezet tegen de tijd een klokkromme vormen. Als deze gebeurtenissen betrekking hebben op het aan- en uitschakelen van elektrische apparaten, dan heeft ook de energiebehoefte de vorm van deze klokkromme.

Als het optreden van deze gebeurtenissen niet persé gebonden is aan een zeer specifieke tijd, maar bijvoorbeeld aan een bepaalde periode, dan kunnen deze gebeurtenissen anders verdeeld worden over de tijd, waardoor de energiebehoefte ook over de tijd gespreid wordt, waardoor het totale afgenomen vermogen minder wordt.

Dit is geïllustreerd in Figuur 24. De klokkromme van de normaalverdeling en de gelijke verdeling worden gekenmerkt door dezelfde energiebehoefte. De piek is echter 60% lager.



Figuur 24: Piekreductie door clusteren.

Deze clustermethode kan gebruikt worden om schakelgedrag van apparaten (en ook warmtepompen, of laadgedrag van elektrische auto's) bij vele huishoudens tegelijk te coördineren.

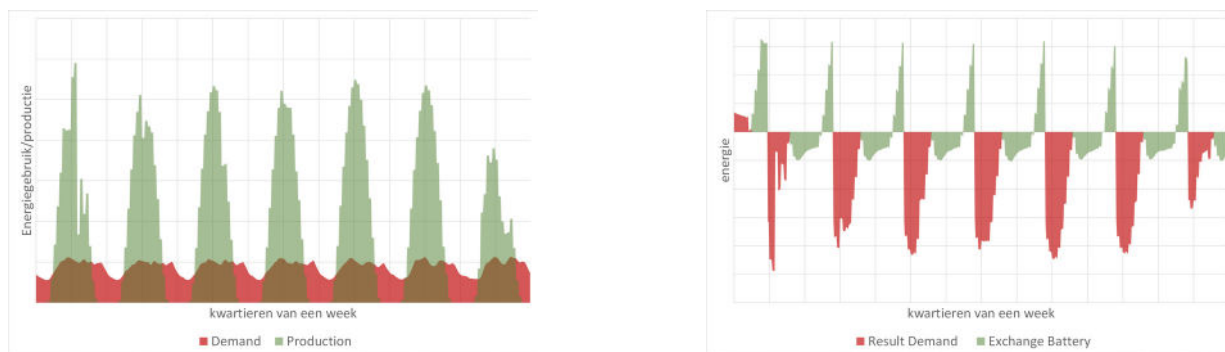


## HOOFDSTUK 7 - ZELFCONSUMPTIE ZON-PV VERGROTEN

Als bij een gebouw zonnepanelen aanwezig zijn is het vaak zinvol om de teruggeleverde hoeveelheid energie zo klein mogelijk te houden. De technieken die hier beschreven zijn lenen zich daar goed voor. In zijn algemeenheid wordt er met het inzetten van die technieken naar gestreefd om het energiegebruik zoveel mogelijk te verplaatsen naar momenten dat de zonopwek groot is. Bij kantoorgebouwen is er al een vrij grote gelijktijdigheid tussen energiegebruik en zonopwek, bij woningen is die gelijktijdigheid veel minder.

### 7.1. Batterij

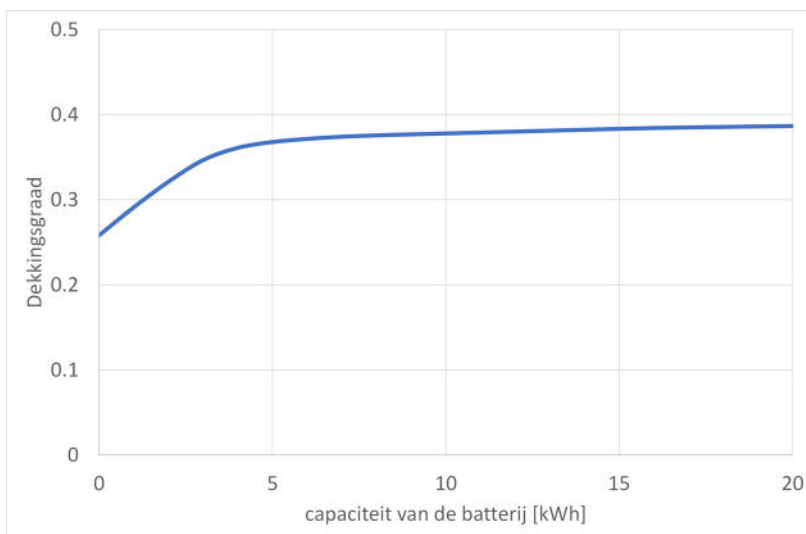
De duurzame energieopwekking door zonnecellen draagt bij uitstek bij aan het verduurzamen van energievoorziening. De energie-opwek door zonnecellen moet dan ook als een niet flexibele energiebron gezien worden. Vaak is het voor de gebouwgebruiker interessant om zoveel mogelijk van de duurzame energieopwekking zelf te benutten. Dit kan door batterijen toe te voegen. Met name bij woningen is het toevoegen van batterijen zinvol omdat de energiebehoefte minder samenvalt met energieproductie door zonne-energie. Bij woningen is een batterij die de duurzame productie overdag kan gebruiken om te voorzien in de energiebehoefte in de avond en nacht de meeste zinvolle toepassing. Een batterij met een opslag van maximaal 5 kWh is daarvoor voldoende. In Figuur 25 is dit geïllustreerd.



Figuur 25: Een woning<sup>10</sup> met zonnecellen en een batterij van 5 kWh. Links afname (rood) en productie (groen) zonder inzet van batterij. Rechts na inzet van de batterij (groen is laden/ontladen batterij, rood is energiebehoefte, teruglevering in dit geval).

In Figuur 25 is links het gemiddelde afnamepatroon gegeven van woningen in rood. In groen is het productieprofiel gegeven van de zonnecellen bij een vrij zonnige periode. Het is duidelijk dat de opbrengst van de zonnecellen de energiebehoefte overtreft. Na inzet van de batterij (met een capaciteit van 5 kWh) is er geen energielevering meer nodig. Er vindt nog wel teruglevering plaats. Dit is rechts weergegeven in Figuur 25. Om een indruk te krijgen wat de batterij bijdraagt aan de eigen consumptie van duurzaam opgewekte energie kan gekeken worden naar de zelfconsumptie. Dit is de hoeveelheid duurzame energie die in de woning zelf gebruikt wordt gedeeld door de totale energiebehoefte van de woning. In Figuur 26 is weergegeven wat de relatie is tussen de dekkingsgraad en de capaciteit van de batterij bij de gegeven woning.

<sup>10</sup> Een woning met elektriciteitsverbruik van 3000 kWh, elektriciteitsverbruik voor verwarmen van 2500 kWh en opbrengst van zonne-energiesysteem van 2500 kWh.

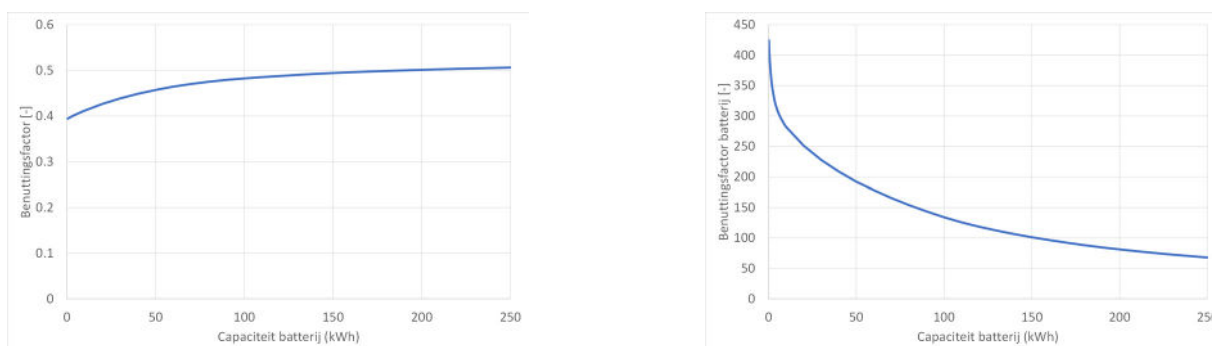


Figuur 26: Effect van de batterij op de zelfconsumptie van de lokale duurzame energie-opwek met zonnecellen bij een woning.

Te zien is dat de batterij de zelfconsumptie ongeveer 10 procentpunten laat toenemen. Het effect van een batterij met een capaciteit van meer dan 5 kWh is gering. Ter vergelijking: de capaciteit van de Tesla Powerwall is 13,5 kWh.

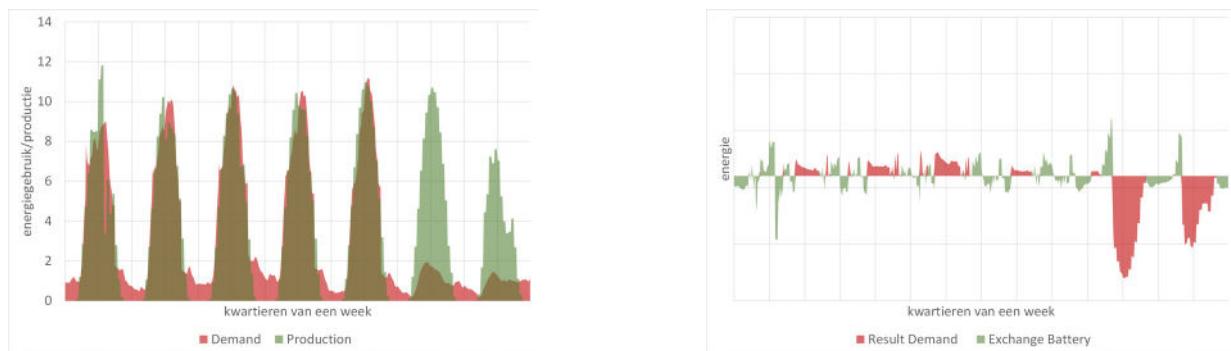
Bij kantoren is er op werkdagen over het algemeen juist een tamelijk grote gelijktijdigheid tussen energiebehoefte en energieproductie door zonnecellen. Een batterij bij kantoren kan zich richten op het opslaan van de duurzame energieproductie ten behoeve van de energiebehoefte in de nacht met een kleine batterij of het opslaan van de duurzame energieproductie in het weekend ten behoeve van de energiebehoefte op de daaropvolgende werkdagen met een grotere batterij.

Om voor deze situatie een keuze te maken voor de capaciteit van kan gekeken worden naar de benuttingsfactor van de lokale duurzame opwek en de benuttingsfactor van de batterij. De benuttingsfactor van de lokale opwek is het aandeel van de lokaal opgewekte energie dat in het gebouw zelf gebruikt wordt ten opzichte van de totale energiebehoefte van het gebouw. De benuttingsfactor van de batterij is de totale onttrekking aan de batterij gedeeld door de capaciteit van de batterij. Dit is gegeven in Figuur 27.



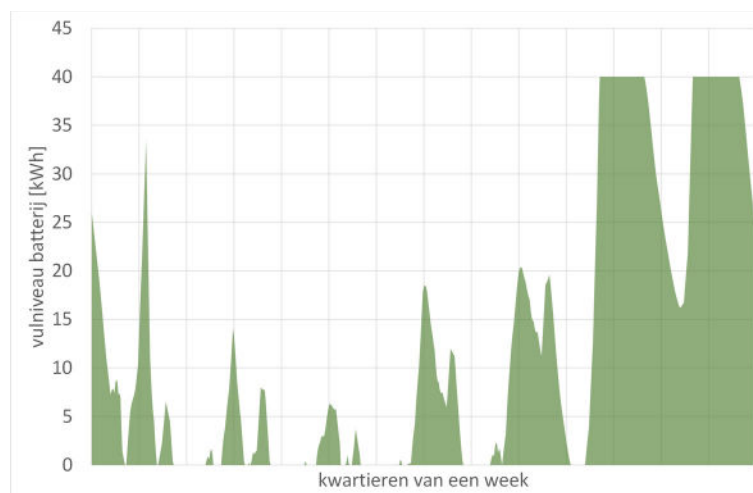
Figuur 27: Links de on-site benuttingsfactor van de duurzame opwek in relatie tot de capaciteit van de batterij. Rechts de benuttingsfactor van de batterij.

Op basis van figuur 27 kan bijvoorbeeld gekozen worden voor een batterij met een capaciteit van 40 kWh.



Figuur 28: Een kantoor<sup>11</sup> met zonnecellen en een batterij van 40 kWh. Links afname (rood) en productie (groen) zonder inzet van batterij. Rechts na inzet van de batterij (groen is laden/ontladen batterij, rood is energiebehoefte, inclusief teruglevering in dit geval).

In Figuur 29 is de bij de hierboven beschreven week behorende vulniveau van de batterij gegeven.



Figuur 29: Vulniveau (State Of Charge, SOC) van de batterij.

### 7.2. Warmwatervoorraadvat

Met name in woningen is het gebruik van het warmwatervoorraadvat voor warmtapwater in te zetten als instrument om de zelfconsumptie te vergroten. Dit gaat enigszins ten koste van de voortdurende beschikbaarheid van warmwater. Het voorraadvat wordt (in de zomer) dan niet direct opgeladen na de gebruikelijke ochtendpiek, maar pas als er teruglevering plaats gaat vinden.

Bij een de woning met een warmtepomp met een totaal jaarverbruik van 5500 kWh en een zon-opwek van 2500 kWh heeft het inzetten van het warmwatervoorraadvat een vergelijkbaar effect op de zelfconsumptie als een batterij van 5 kWh. Het aanvullend inzetten van een batterij blijft daarbij nog steeds een interessant om de zelfconsumptie te vergroten, alhoewel de benuttingsfactor van de batterij zelf dan wel wat lager is dan zonder het gebruik van het voorraadvat.

<sup>11</sup> Een kantoor van 2500 m<sup>2</sup> met elektriciteitsverbruik van 150000 kWh (inclusief verwarmen en koelen), en opbrengst van zonne-energiesysteem van 100000 kWh.

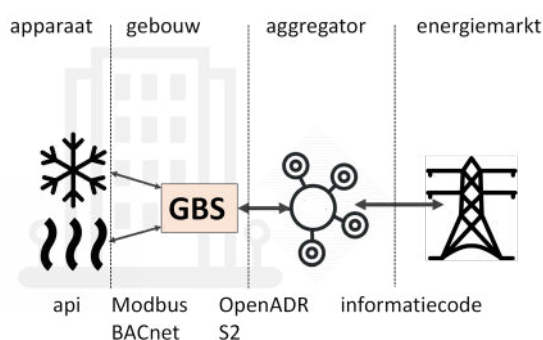




## HOOFDSTUK 8 - PROTOCOLLEN

Om energieflexibiliteit in een gebouw te ontsluiten voor het gebruik in de duurzame energievoorziening is het nodig dat de elementen in het gebouw die kunnen bijdragen aan de flexibiliteit (comfort, opwekinstallaties, batterijen, thermische opslag) samenhangend beschouwd en aangestuurd worden. Het gebruik van een gebouwbeheersysteem is daarbij onontbeerlijk. Omdat energieflexibiliteit ook een voorspellend element heeft zijn voorspellende regelingen zeer geschikt. Model predictive control (MPC) is een methode die hiervoor bij uitstek geschikt is. MPC werkt op met behulp van een fysisch model van het gebouw.

Het gebouwbeheersysteem vormt dan de schakel tussen de aan te sturen apparaten, waarmee de communicatie vaak gaat met specifieke, fabrikantgebonden API's (Application Programming Interfaces) en de duurzame energievoorziening. In Figuur 30 is aangegeven welke werkingsgebieden de verschillende protocollen hebben.



Figuur 30: Verschillende protocollen voor informatie-uitwisseling en de daarbij horende scope.

De essentie van energieflexibiliteit is dat er vanuit de duurzame energievoorziening een behoefte bestaat om de energielevering aan gebouwen te verminderen of juist op te voeren. Als gebouwen actief meewillen aan deze duurzame energievoorziening door het leveren van flexibiliteitsdiensten moet er informatie uitgewisseld worden. De meest eenvoudige manier om dat te doen is een prijsprikkel of een biedingssysteem. Er is dan geen twee-richtingencommunicatie nodig. Als het leveren van flexibiliteitsdiensten gefaciliteerd gaat worden door een aggregator, dan zal de aggregator controle willen hebben over de te leveren (geaggregeerde) flexibiliteitsdienst. Er moet dan ook een informatiestroom zijn van de gebouw naar de aggregator die bijvoorbeeld wil weten:

- De snelheid waarmee een flexibiliteitsdienst beschikbaar is.
- Hoe groot het te reduceren/te vergroten vermogen is.
- En gedurende welke tijd dat vermogen beschikbaar is.

Er zijn een aantal protocollen ontwikkeld die specifiek gericht zijn op (of geschikt zijn voor) deze communicatie tussen de leverancier van de energiedienst (het gebouw, via een aggregator) en de duurzame energievoorziening. De belangrijkste worden hier kort omschreven.

EEBus (SPINE) (Smart Premises Interoperable Neutral-message Exchange). Dit is een vrij generiek protocol waarin verschillende use cases met betrekking tot energieflexibiliteit opgelost kunnen worden. Voor verschillende use cases zijn al use case specifications uitgewerkt. Het protocol wordt gebruikt door producenten van huishoudelijke apparaten (met name witgoed).

### BACnet, Building Automation and Control network

BACnet is een generiek, uitgebreid en open communicatieprotocol voor de uitwisseling van informatie tussen een gebouwbeheersysteem en de gebouwvoorzieningen.





EFI. Het Energy Flexibility Interface protocol wordt beheerd door de Flexible power Alliance Network (FAN). Dit is een vrij specifiek protocol gericht op energieflexibiliteit waarin de verschillende toepassingsmogelijkheden al in het protocol zelf uitgewerkt zijn. EFI is in ontwikkeling en wordt, uitgezonderd van pilotprojecten, nog niet in de markt gebruikt.

S2 is een protocol dat als doel heeft een gemeenschappelijke interface te beschrijven tussen energie-intensieve apparaten en het energiesysteem. S2 is een doorontwikkeling van EFI en waarschijnlijk wordt S2 een Europese standaard op dit gebied. S2 kan op een geüniformeerde manier verbruikschemas doorgeven aan de verschillende apparaten. Het energiemanagementsysteem communiceert via S2 naar de apparaten, die de instructies gebruiken om meer of minder energie te gebruiken, of juist om terug te leveren. S2 kan zowel in bedrade als draadloze toepassingen gebruikt worden.

KNX. KNX is een generiek, autonoom, gedecentraliseerd systeem voor gebouwautomatisering. KNX wordt ook veel gebruikt voor smart home automation. Het protocol wordt gebruikt door vele fabrikanten.

SEP 2.0. Het SEP 2.0 (IEEE standard 2030.5-2013) protocol is specifiek gericht op de communicatie tussen de duurzame energievoorziening en consumenten/aansluitingen. Informatie die wordt uitgewisseld met behulp van de standaard omvat prijzen, vraagresponso en energieverbruik, waardoor de integratie van apparaten zoals slimme thermostaten, meters, plug-in elektrische voertuigen, slimme omvormers en slimme apparaten mogelijk wordt.

OpenADR. De OpenADR, Open Automated Demand Response standard is gericht op het automatiseren van flexibiliteit, het ondersteunt het veranderen van vermogen of productie van hulpbronnen aan de vraagzijde. Deze norm kan bijvoorbeeld worden gebruikt door netbedrijven om vraagresponssignalen te verzenden op basis van netbehoeften (bijvoorbeeld via tarief- of noodsignalen). Er zijn al veel gecertificeerde OpenADR-producten, zoals thermostaten of verlichtingsproducten.

### OCCP, Open charge point protocol

OCCP is een JSON gebaseerd protocol voor de communicatie tussen elektrisch vervoer en laadstations. Het protocol bevat ook flexibiliteitsaspecten en een beschrijving van de communicatie tussen een laadsysteem en een centraal beheerssysteem.

### **8.1. Aggregator**

Ook de aggregator zal hulpmiddelen gebruiken om met behulp van het flexibiliteitsaanbod in zijn eigen pool van gebouwen de beste propositie te maken voor de vragende duurzame energievoorziening. Een voorbeeld hiervan is de powermatcher (zie ook <http://flexiblepower.github.io>), die op basis van een automatisch biedsysteem deze propositie maakt. Dit biedsysteem is te vergelijken met bijvoorbeeld de manier waarop de google ads werkt. Interacties tussen de aggregator en andere marktpartijen zijn ook beschreven in het USEF Universal smart energy framework. USEF is een ontwerp voor de werking van de energiemarkt met een accent op de levering van flexibiliteitsdiensten. In het framework worden de verschillende marktrollen met taken en verantwoordelijkheden beschreven. Het framework is in te passen in de huidige Europese marktmodellen. De USEF Flex Trading protocol (UFTP) maakt deel uit van USEF. Dit protocol beschrijft de interacties tussen de aggregator en de netwerkbeheerder met als doel de gebruikte capaciteit op het netwerk te kunnen beheersen.



### HOOFDSTUK 9 - VOORBEELDEN

Veel demonstratieprojecten hebben betrekking op huishoudens. Uit de gedocumenteerde proefprojecten kunnen een aantal terugkerende knelpunten gesignaleerd worden:

- Er is nog geen goede businesscase voor het inzetten van energieflexibiliteit bij de eindgebruiker.
- Bij projecten spelen vaak administratieve –, technische innovaties en systeeminnovatie een rol. Dit maakt de projecten complex en de faalkans groot.
- Bij vrijwel elk project wordt er een nieuw softwareplatform ontwikkeld. Blijkbaar zijn de bestaande protocollen nog ongeschikt.
- Het realiseren van een robuuste en autonome internetverbinding blijkt in de praktijk lastig.
- De verschillende communicatieprotocollen zorgen voor een moeizame koppeling van alle assets.
- In de praktijkexperimenten vallen de prestaties van batterijen vaak tegen.

Hieronder volgt de beschrijving van een aantal demonstratieprojecten.

#### Powermatching city II

<https://projecten.topsectorenergie.nl/projecten/powermatching-city-ii-17307>

#### Partners

2014, Essent Energy, DNV KEMA, HUMIQ, TNO, Enexis, Gasunie, TU/e, TUD, Hanzehogeschool.

#### Doel

Onderzoeken hoe intelligente netwerken administratief inpasbaar zijn in de energie-infrastructuur.

#### Project

PowerMatching City I was het eerste slimme netwerk proefproject in Europa. In dit vervolg met 40 woningen met zonnecellen, warmtepompen, elektrische voertuigen en 2 slimme netwerktransformatoren ligt de nadruk op hoe een slim energienet geïntegreerd kan worden in de bestaande energie-infrastructuur en welke energiediensten relevant zijn voor de eindgebruikers.

#### Resultaat

Er is inzicht gekregen in hoe consumenten de slimme huishoudelijke apparaten gebruiken. Ook het inzicht in de relevantie (duurzaamheid en financieel) bij de eindgebruikers is van belang om deze actief te kunnen betrekking bij het project. Verder is ervaring opgedaan met de rol van de aggregator.

#### Couperus smart grid

<https://data.rvo.nl/subsidies-regelingen/projecten/couperus-smart-grid>

#### Partners

2013, Stedin Netbeheer, Itho Daalderdorp, Staedion, SWY, (Vestia), Eneco, TNO, IBM, Provincie Zuid-Holland.

#### Doel

Energieflexibiliteit door clustering van warmtepompen.

#### Project

In een appartementencomplex met 233 woningen met individuele warmtepompen worden de warmtepompen aangestuurd met de powermatcher. Het onderzoek richt zich op de flexibiliteit die je kunt creëren zonder in te grijpen in het gedrag en met behoud van het comfort van de bewoners. Een bandbreedte van de comforttemperatuur van 0,8 °C is daarbij gehanteerd.



### Resultaat

Aangetoond is dat flexibiliteit gecreëerd kan worden zonder actieve betrokkenheid van de bewoner. Het schakelen van de warmtepomp kon (met een comfortbandbreedte van 0,8 °C) zes tot acht uur uitgesteld worden. Bewoners geven zelf aan dat ze liever zelf de controle willen. In de praktijk blijkt dat als bewoners de mogelijkheid hebben, ze deze niet vaak gebruiken. Een zinnige businesscase kon voor de bewoners ook niet opgesteld worden.

### **Onbalansreductie door energy pooling E-boilers<sup>12</sup>**

#### Partners

2017. Peeeks, Eneco Installatiebedrijven Groep, Eneco Energy Trade

#### Doel

Flexibiliseren van de energievraag van elektrische boilers.

#### Project

Experimentele setting bij ongeveer 100 huishoudens. Er is een module ontwikkeld waarmee de conventionele boilers tot slimme boilers worden omgebouwd.

#### Resultaat

Technische haalbaarheid is aangetoond. De flexibiliteit werd ingezet als onbalansvermogen via Eneco Energy Trade.

Met name de communicatiemodule bleek technisch lastig. Gekozen is voor een UTP kabel, maar dit bleek ook kwetsbaar. Een autonome, draadloze IOT-oplossing zou beter zijn, maar bleek te kostbaar in dit project.

### **Onbalansreductie door het ontsluiten en slim laden van elektrische auto's in de blockchain**

#### Partners

2019, Tennenet, VandeBron, IBM

#### Doel

Ontsluiten van het flexibiliteitspotentieel bij het laden van elektrische auto's.

#### Project

Ontwikkelen van een platform voor het leveren van slimme laaddiensten voor elektrische auto's.

#### Resultaat

Via een app kunnen gebruikers randvoorwaarden opgeven voor het slim laden van de auto. Besparingen tot 250 € zijn daarbij mogelijk. Een les die tijdens dit project geleerd is, is dat voor de koppeling van de auto's er een sterke afhankelijkheid is van de automotive. Daarom

wordt er een oplossing ontwikkeld waarbij het stoppen/starten met laden niet alleen via de auto maar ook via de laadpaal wordt aangestuurd. Het voordeel is dat laadpalen gebruikmaken van openbare communicatie protocollen en dus beter toegankelijk zijn.

Het project wordt vervolgt met een uitbreiding van de toepassing naar flexibiliteit van huishoudelijke apparatuur.

---

<sup>12</sup>Goes Minke et. al. Navigant/ TKI Urban Energy, 2019 Energieflexibiliteit in de gebouwde omgeving.



### Hermans smart grid

#### Partners

2019, BeNext, DGM, Energieonderzoek Centrum Nederland, Generic Media, Local Energy Networksystems & Services (LENS); Net2Grid; Top Systems

#### Doel

Vergroten van zelfconsumptie van zon-PV door het slim inzetten van batterijen en flexibiliteit bij huishoudens.

#### Project

Door middel van bestaande domoticasystemen het ontwikkelen van een regeling om de zelfconsumptie van zon-PV te maximaliseren.

#### Resultaat

De ontwikkeling van de beoogde functionaliteit bleek in de praktijk lastig door ingewikkelde koppeling met de apparatuur. Ook de robuustheid van (meet) apparatuur bleek onvoldoende. In de praktijk bleek een zelfconsumptie van meer dan 50% lastig haalbaar.



## LITERATUUR

ISSO, 2022, Handreiking energieopslag en netinpassing

RVO, 2022, Inspiratiegids oplossingen voor zonne-energie en netinpassing

TKI Urban Energy, 2020, In-Home Energy flexibility protocols

<https://capaciteitskaart.netbeheernederland.nl/>

www.USEF.energy, Usef Energy – Universal Smart Energy Framework

<https://annex67.org> Home (annex67.org) (diverse documenten)

S. Kurvers en J. Leijten, 2022, Binnenklimaat en adaptief thermisch comfort

G. Reyners et al, 2018, Energy flexible buildings: An evaluation of definitions and quantification methodologies applied to thermal storage

T. Weiss, 2020, Energy flexibility and shiftable heating power of building components and technologies

C. Papachristou, 2021, Investigating the energy flexibility of Dutch office buildings on single building level and building cluster level

J. Rongé en I. François, 2021, Use of hydrogen in buildings (BatHybuild study)

J. Slijm et al, (ECN), 2017, The demand for flexibility of the power system in the Netherlands, 2015-2050

B. de Wildt, Bo en R. Quirke en J. Sijm, (TNO), 2022, Barriers to demand response

J. Sijm, G. Morales-España and R. Hernández-Serna (TNO), 2022, The role of demand response in the power system of the Netherlands, 2030-2050

C. Papachristou, et al, 2021, Investigating the energy flexibility of Dutch office buildings on single building level and building cluster level

Airò Farulla, G.; Tumminia, G.; Sergi, F.; Aloisio, D.; Cellura, M.; Antonucci, V.; Ferraro, M. A Review of Key Performance Indicators for Building Flexibility Quantification to Support the Clean Energy Transition. In *Energies* 2021, 14, 5676.

S. Verbeke et al (VITO), 2020, final report on the technical support to the development of a smart readiness indicator for buildings



Korenmolenlaan 4  
3447 GG Woerden  
Telefoon: 088 401 06 00

[info@tvvl.nl](mailto:info@tvvl.nl) | [www.tvvl.nl](http://www.tvvl.nl)

