

Auteur Prof.ir. W. (Wim) Zeiler – TU Eindhoven

Energie Flexibele gebouwen kunnen zorgen voor stabilisatie van energienet

De energietransitie leidt ertoe dat de samenleving meer duurzame energie moet benutten en die ook meer lokaal wordt opgewekt op buurt en gebouwniveau. Er ontstaan voor gebruikers in toenemende mate economisch verantwoorde mogelijkheden voor het zelf opwekken van elektriciteit door zonnepanelen. Dit heeft als gevolg dat de vraag van de centrale energievoorziening minder voorspelbaar wordt. Soms is er zelfs lokaal een teveel aan vermogen in het net. Dan kan een teveel aan opgewekte energie lokaal opgeslagen worden. Die lokale opslag van thermische en elektrische energie verandert rol van de gebruikers. Zij kunnen zelf produceren, consumeren maar dus ook lokaal opslaan. Daarnaast speelt de toenemende toepassing van elektrische warmtepompen in de bestaande bouw een rol en de groei van elektrische auto's.

Deze ontwikkelingen hebben verregaande gevolgen de vraag aan het elektriciteitsdistributienet wat hierdoor aan zijn maximale capaciteit komt. De pieken in belasting kunnen door netverzwaring worden opgelost, maar dat is erg kostbaar. In een wijk zijn er ook mogelijkheden om gebruik te maken van de flexibiliteit die er aan de gebruikers kant aanwezig is. Flexibiliteitsopties aan de vraagzijde zijn cruciaal voor het optimaliseren van de elektriciteitsmarkt. Dit kunnen naast tijdelijke vraagvermindering ook opties zijn als het benutten van de thermische massa van het gebouw of de inzet van thermische buffers zoals opslagvaten [1] is gebleken.

Door de juiste bufferstrategie en combinatie van Demand Side Management aan de gebruikers zijde kan de energieflexibiliteit van een gebouw of een groep gebouwen worden geoptimaliseerd naar CO₂-besparing, energiekosten of de bijdrage aan het matchen van vraag en aanbod alsmede daardoor aan de stabiliteit van het net op buurtniveau.

IEA Annex 67

Het International Energy Agency (IEA) is in 1974 opgericht in het kader van de Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD) om een internationaal georiënteerd programma op het gebied van energie te ontwikkelen. Het IEA diende de samenwerking te bevorderen tussen de destijds 28 IEA lidstaten om veiligheid omtrent energie te bewerkstelligen, via energiebesparing, demonstraties en onderzoek naar en de ontwikkeling van alternatieve energiebronnen.

Nederland is lid van het IEA en neemt deel aan het IEA-netwerk, waar zestien van de 41 Implementing Agreements (IA's) onder vallen. Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) verzorgt grotendeels de deelname namens het Rijk opdrachtgever is het ministerie van Economische Zaken. Het gaat bij de IA's om een samenwerkingsverband tussen landen – en partijen daaruit – op het gebied van energieonderzoek, -technologie en -beleid. Het werk binnen een IA vindt plaats in apart gedefinieerde taak, annex genoemd. Door de deelname aan het IA kunnen bedrijven en kennisinstellingen meedoen aan een annex.

Meer achtergrond de betekenis van de IEA EBC is te vinden in [5]. Vele reports, artikelen in tijdschriften en voor conferentie zijn gepubliceerd door de deelnemers aan de IEA EBC Annex 67. Deze zijn te vinden op annex67.org/Publications en annex67.org/Deliverables.

Deze complexe thematiek is in internationaal verband aangepakt door de Internationale Energie Associatie programma Energy in Buildings and Communities (IEA EBC) (zie kader). In totaal deden er 16 landen mee aan het IEA EBC Annex 67 Energie Flexibele Gebouwen onderzoek met bijna honderd wetenschappers. Vanuit Nederland deden de TU Delft en de TU Eindhoven mee. Na de voorbereidingsfase van juni 2014 tot juni 2015, liepen de onderzoeken tot juni 2018 met een rapportage fase tot juni 2019. Twee keer per jaar werd een bijeenkomst georganiseerd om de resultaten met elkaar te delen en te bespreken. Het project richtte zich op de definitie van energieflexibiliteit van gebouwen en onderzocht mogelijkheden voor het integraal benutten van energieflexibiliteit van gebouwen en energieopslag. Het project was verdeeld in 3 deeltaken:

- A. Definitie en context bepaling
- B. Analyse, ontwikkeling en testen
- C. Demonstratie en gebruikersperspectief

De energieflexibiliteit van gebouwen wordt doorgaans verkregen door ontkoppeling van energievraag en energieruglevering door de gebruiker met opslag in of met het gebouw om de piek in het energiegebruik te verschuiven en af te vlakken.

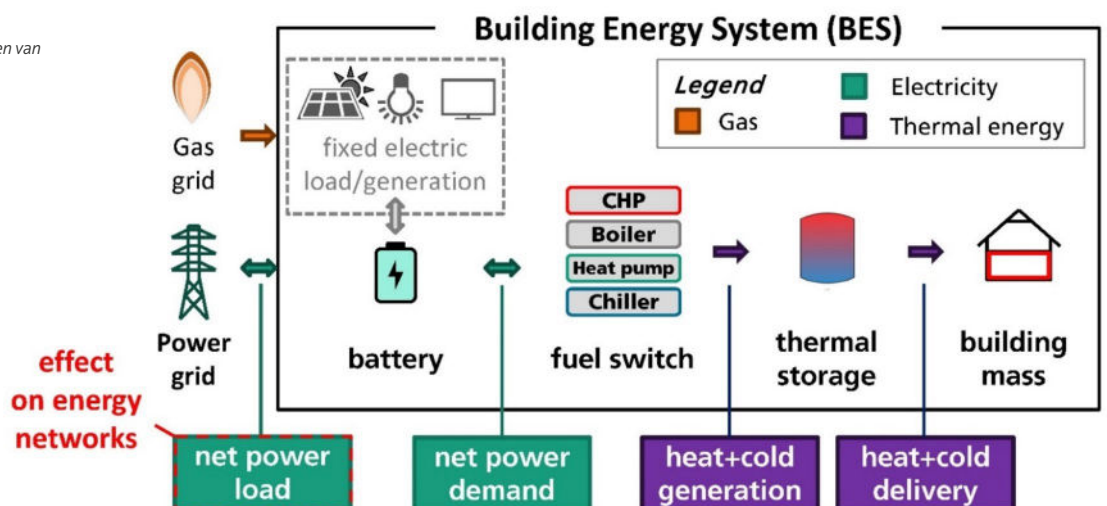
Energieflexibiliteit kan bijvoorbeeld worden verkregen door het verlagen van de piek van de energievraag, zonder een latere noodzaak om de situatie te herstellen, met extra energieverbruik bijvoorbeeld het dimmen van lampen of het gedeeltelijk uitschakelen van de algemene verlichting.

Figuur 1 geeft verschillende manieren om energieflexibiliteit te verkrijgen. Van rechts naar links gezien:

Building mass/Gebouwmassa:

muren, vloeren, plafonds van gebouwen bevatten een bepaalde thermische massa, die kan worden gebruikt om energie op te slaan. Het gaat hierbij om het effect dat bijvoorbeeld bij betonkernactivering wordt toegepast maar het gaat ook om de totale gebouw massa. Tijdens een tekort aan energie kan het verwarmings- of koelsysteem daarom voor een periode worden uitgeschakeld zonder het comfort van de gebruikers te veel te verminderen. Hoe lang een periode afhankelijk is van de thermische massa en het warmteverlies van de gebouwen, maar kan van tientallen minuten tot een paar uur bedragen. Er moet echter voor gezorgd worden dat het thermisch comfort niet in gevaar mag worden gebracht en binnen tijdelijk acceptabele grenzen blijft.

Figuur 1: bronnen voor het verkrijgen van energieflexibiliteit [2].



Thermal storage/Thermische opslag:

Dit kan water of PCM (Phase Change Materials)'s of TCM (Thermo Chemical Material)'s [2] zijn in buffertanks tussen aanvoer en retour bij een warmtepomp en radiatoren of vloerverwarming van het verwarmingssysteem.

Fuel switch/Omschakeling brandstof:

Als een gebouw warmte-opwekkers heeft die verschillende brandstoffen gebruiken (bijv. een gasketel en een elektrisch warmtepomp), kan energieflexibiliteit worden verkregen door de gasketel te gebruiken tijdens perioden waarin de elektriciteitsvraag kritisch is en het gebruik van de warmtepomp wanneer overtollige elektriciteit beschikbaar is.

Battery/Accu's:

Hier wordt elektriciteit direct opgeslagen. Accu's kunnen de accu zijn van een elektrisch voertuig of de accu van een PV-systeem. De accu wordt opgeladen tijdens periodes dat er voldoende vermogen beschikbaar is in het net en ontladen tijdens periodes dat er een tekort is. De accu kan ook worden gebruikt voor bijvoorbeeld het verhogen van het zelfverbruik van elektriciteit uit een PV-systeem. Dit geeft een financieel voordeel door de afname van verrekening van energiebelasting.

Generation/Opwekking:

veel gebouwen worden prosumers – dat wil zeggen: ze verbruiken niet langer alleen energie, ze produceren ook energie via PV, micro windturbine of warmtekrachtunit.

Networks/energienetwerken:

een gebouw kan worden aangesloten op een of meer energienetwerken. Gebouwen zijn altijd verbonden met een elektriciteit netwerk, maar kunnen ook worden aangesloten op een laag, midden of hoog temperatuur warmtenet of het (bio)gasnet.

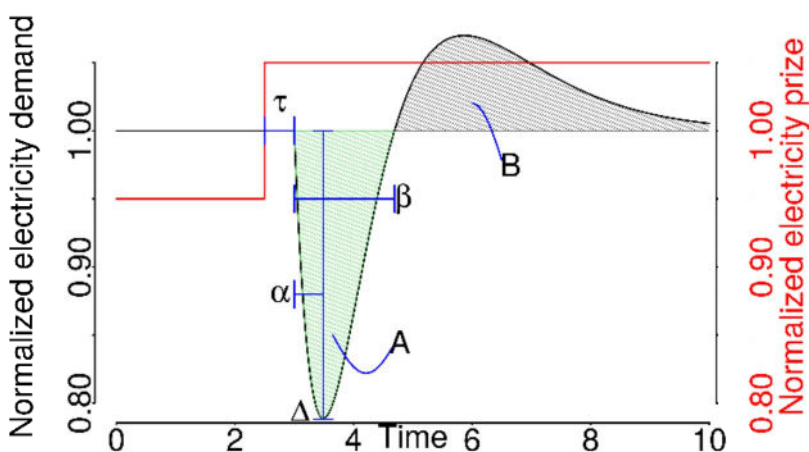
Om bovengenoemde mogelijkheden voor energieflexibiliteit te benutten, is er behoefte aan innovatieve procesbesturing. De in Annex 67 onderzochte gevallen maken gebruik van verschillende soorten regelingen, variërend van zeer eenvoudige tot zeer complex;

- tijdprogramma's zoals een warmtepomp die elke dag tijdens een vooraf bepaalde periode wordt uitgeschakeld,
- complexe regelgebaseerde regelstrategieën (rule based control) waarbij meerdere restricties worden meegenomen (bijvoorbeeld dat de warmtepomp wordt uitgeschakeld, tenzij de binnentemperatuur te laag is en alleen als de prijs van elektriciteit boven een bepaald niveau ligt),
- modelgestuurde voorspellende regelingen (model based predictive control) op basis van weersvoorspellingen, bezettingsgraad en fluctuerende energieprijzen.

Definities

Er bestaan veel definities voor energieflexibiliteit in gebouwen. Annex 67 definieert energieflexibiliteit in gebouwen als:

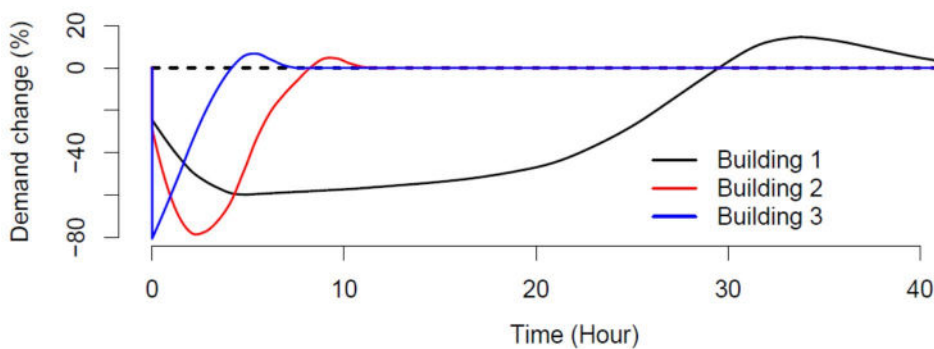
De energieflexibiliteit van een gebouw is de mogelijkheid om zijn vraag en productie aan te passen naar de lokale klimaatomstandigheden, gebruikersbehoeften en distributienetwerk vereisten.



Figuur 2: Voorbeeld van een geaggregeerde reactie wanneer sommige gebouwen een penaltysignaal ontvangen – bijvoorbeeld een prijssignaal [3].

Legenda:

- τ is de tijd van het signaal wordt verzonden naar een actie begint,
- α is de periode vanaf het begin van de respons tot de maximale respons,
- Δ is de maximale respons,
- β is de duur van de respons,
- A is de verschoven hoeveelheid energie
- B de hoeveelheid energie (het rebound-effect) benodigd voor terug brengen naar de «referentie» situatie.



Figuur 3: De flexibiliteitsfunctie voor drie verschillende gebouwen [3].

De energieflexibiliteit van gebouwen zorgt dus aan de vraagzijde voor Demand Side Control en stemt daarmee de vraagrespons af op basis van de vereisten ten gevolge van de verwachte netbelastingen.

Figuur 2 toont een voorbeeld van de reactie van gebouwen bij het ontvangen van een controlesignaal gebaseerd op prijsniveau. Het maakt duidelijk dat de energieflexibiliteit door verschillende specifieke fysieke kenmerken kan worden gedefinieerd zoals, zie figuur 2;

- de periode vanaf het begin van de respons tot de maximale respons,
- de maximale respons,
- de duur van de respons,
- de verschoven hoeveelheid energie,
- de benodigde energie voor het terug brengen naar de 'referentie' situatie

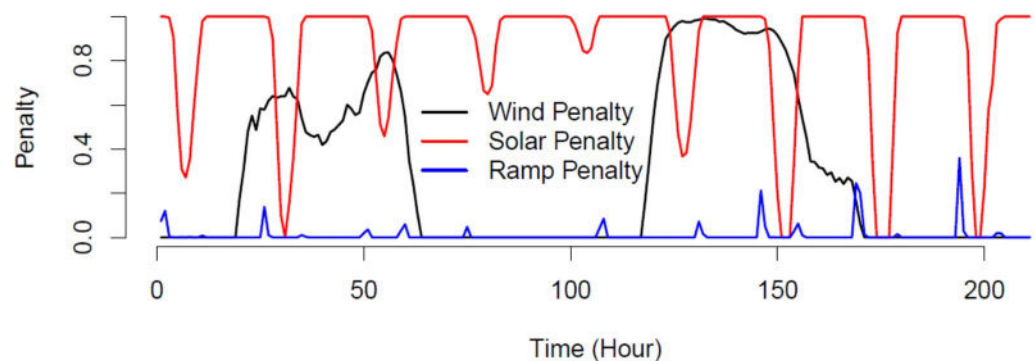
Flexibiliteits Functie

De flexibiliteit van een gebouw kan worden weergegeven door een dynamische Flexibiliteits Functie (FF). Deze grafiek beschrijft hoe het

gebouw reageert op een penalty signaal als bijvoorbeeld een prijssignaal, de CO₂-productie of de inzet van de hoeveelheid duurzame energie. Figuur 3 toont de theoretische FF voor de drie gebouwen met verschillende reactietijden. Afhankelijk van het type gebouw van licht tot zwaar zal het snel of traag reageren op veranderingen. In Figuur 3 zien we dat een thermisch licht gebouw, gebouw 3, sneller reageert dan een zwaar gebouw, gebouw 1. De thermische massa traagheid geeft een karakteristiek snelheidsverloop van de vraagverandering.

Afhankelijk van de capaciteit van het netwerk en specifiek gebruiks- en opwekkingskarakteristiek is het mogelijk om voor de momenten dat er te veel of te weinig duurzame energie, uit wind en zon, geproduceerd wordt afzonderlijke penalties te definiëren. Hierbij wordt dus als het ware het teveel aan duurzame productie beboet. Een negatieve prijssprikkel moet ervoor zorgen dat juist op die momenten gebouwen extra vermogen vragen. Of op momenten als er te weinig aanbod is juist de vraag verminderen. Belangrijk is ook om het op- of afschakelen geleidelijk te laten verlopen. Dit veroorzaakt een helling (ramp) in de vermogenskarakteristiek die liefst ook beperkt blijft, vandaar dat er ook daarvoor een prijssprikkel kan worden gegeven. Dit lijkt bijvoorbeeld tot het penaltyprofiel, zoals dat gegeven is voor de situatie in Denemarken in Figuur 4 [3].

Figuur 4: Penaltysignalen gebaseerd op wind- en zonne-energieproductie in Denemarken tijdens 2017. Helling omschakeling (ramp) op basis van verbruik in Noorwegen in dezelfde periode [3].



Op basis van de FF en het dynamische penaltysignaal, zie figuur 4, is het mogelijk om een Energie Flexibiliteits Spaar Index (EFSI) te berekenen in % besparingen. Tabel 1 toont de potentiële besparingen in kosten of CO₂, afhankelijk van het toegepaste penalty signaal.

Gebouw	Wind (%)	Zon (%)	Ramp up & down (%)
1	11.8	4.4	6.0
2	3.6	14.5	10.0
3	1.0	5.0	18.4

Tabel 1: Verwachte EFSI voor elk van de drie gebouwen gebaseerd op de dynamische penalties van figuur 4 [3].

Een thermisch traag reagerend gebouw, gebouw 1, scoort beter bij wind, opdat het effect van de wind over een langere periode geldt dan die van de zonbelasting, zie figuur 4, en daardoor meer kan bijdragen. De thermische responsie karakteristiek van gebouw type 2 is meer in lijn met de zon karakteristiek, waardoor deze het hoogste scoort bij de zon.

Gebouw	Wind (%)	Zon (%)	Ramp (%)
1	35.1	7.2	18.9
2	10.2	24.0	37.5
3	4.9	11.1	71.0

Tabel 2: Verwachte FI voor elk van de drie gebouwen op basis van de in figuur 5 getoonde dynamische penalty [3].

De netbeheerders zijn echter meestal meer geïnteresseerd in het weten hoeveel van de problemen in het netwerk de gebouwen kunnen helpen oplossen. Op basis van de FF (figuur 3) en de penalty signalen zoals weergegeven in Figuur 4, kan de Flexibiliteits Index (FI) worden berekend voor het netwerk. Hiermee wordt beschreven in hoeverre elk van de gebouwen in staat is om bij te dragen aan het oplossen van de problemen in het elektriciteitsnet. Tabel 2 geeft de FI in % voor de drie voorbeeld gebouwen van figuur 3.

Tabel 2 toont hoeveel de gebouwen in staat zijn om bij te dragen aan het verminderen van de problemen in het netwerk. Gebouw 3 is bijvoorbeeld in staat gedurende 71% van de tijd het elektriciteitsnet met snelle wisseling van benodigd vermogen te helpen. Gebouw 1 kan maar in 35% van de gevallen energieflexibiliteit bieden aan het netwerk met veel windenergie, omdat het veel sneller reageert en daardoor de doorwerking naar het thermisch binnenklimaat ook sneller is. De comfortbeperking voor het gebruiken van de energieflexibiliteit bereiken daardoor eerder hun grenswaarden.

Verder is gebleken dat de trend van tabel 1 en 2 vergelijkbaar is, behalve dat de waarden van tabel 2 circa 3 tot 4 keer hoger zijn dan in tabel 1. Dit betekent dat als een gebouw goed presteert vanuit het oogpunt van de netbeheerders, het ook de hoogste besparingen oplevert voor de klant. Dit is een zeer bemoedigend resultaat voor het daadwerkelijk meekrijgen van de klanten om deel te nemen aan de stabilisatie van de toekomstige energienetten.

Conclusies

In verschillende energienetwerken presteren sommige soorten gebouwen (van licht tot zwaar) beter. Zware gebouwen zoals type "gebouw 1" kunnen in het algemeen beter reageren op voorspelbare langdurig veranderingen, omdat ze meer energie kunnen opslaan zonder dat het directe consequenties heeft voor het binnenklimaat. Voor de zonne- en veranderingshelling sancties maakt het niet uit dat gebouw 1 de vraagverandering zo lang kan ondersteunen, aangezien deze twee boetes meer frequent veranderen. In feite is de reactie van gebouw 1 zo traag dat het meestal niet in staat is om te reageren op de veranderingen in de boete wanneer het is op basis van zonne-energie of veranderingshelling. Voor deze twee strafsignalen is een hogere snelheid waarop gebouw 2 en 3 kunnen reageren, van cruciaal belang.

Tot slot, de zon gerelateerde boete is langzamer dan de veranderingshellingsboete. Hierdoor zal gebouw 2 beter geschikt zijn omdat die met zijn reactie voor een tijdje kan ondersteunen, terwijl de zeer snelle variaties in veranderingshellingsboete alleen worden kan opgevangen door de snelle reactie van gebouw 3. Type gebouw 3, een licht gebouw, reageert beter op moeilijk voorspelbare situaties zoals snellere verandering in de hoeveelheid zoninstraling.

Dit type gebouw heeft een hoge Flexibiliteits Spaar Index (EFSI) en zijn dus meer geschikt om netwerken te stabiliseren, omdat ze immers snel kunnen reageren.

Om de nieuwe energie flexibiliteitsoptimalisering van het energiegebruiksgedrag van het gebouw te realiseren, moeten de effecten van het weer, bezettingsgraad en energiegebruik van elk bouwdeel worden

meegenomen. Belangrijk is verder dat multi-variabele systemen worden toegepast voor de regelingen zijn die de interacties tussen bepaalde situaties kunnen benutten. Alleen zo kunnen de prestaties worden geoptimaliseerd en de milieukosten worden verminderd. Bovendien helpt de informatie van sensoren om beter inzicht te krijgen in de bouwprestaties en het functioneren van airconditioning, verlichtings- en verwarmingssystemen. Dit zowel voor het energiegebruik als ook real-time de binnenmilieukwaliteit en het comfortniveau.

Experimenten

In Annex 67 zijn experimenten voor onderzoek naar de energieflexibiliteit van componenten en systemen met succes uitgevoerd in zes testfaciliteiten en enkele proefgebouwen.

Waardevol was het uitvoeren van hardware-in-the-loop simulaties voor inzicht in de energie-flexibiliteitsprestaties van verschillende systemen en gebouwen voor diensten aan de energienetwerken. Met betrekking tot de doelstellingen heeft Annex 67 tot meer inzichten:

- er is een methodologie ontwikkeld voor de kwalificatie van energieflexibiliteit van gebouwen, zodat er een gemeenschappelijke manier is om de energieflexibiliteit in gebouwen te kunnen bepalen,
- meer kennis is nodig over de acceptatie, motivatie en barrières voor de betrokken stakeholders rond energieflexibele gebouwen. Kennis die belangrijk is bij het introduceren van energieflexibiliteit in echte gebouwen voor draagvlak en acceptatie,

- energieflexibiliteit is gesimuleerd in Hardware-in-the-loop test-faciliteiten en getest in enkele veldstudies [Finck et al 2020]
- voornamelijk is de energieflexibiliteit in afzonderlijke gebouwen onderzocht, maar in sommige gevallen is ook de geaggregeerde energieflexibiliteit van clusters van gebouwen bestudeerd.
- verschillende soorten gebouwen (van licht tot zwaar) presteren in sommige energienetwerken beter Door dan in andere, afhankelijk van de aanwezige hernieuwbare energiebronnen in het eigenlijke netwerk. Door de Flexibiliteits Functie in combinatie van de dynamische penalty signalen kan Energie Flexibiliteits Spaar Index (EFSI) en de Flexibiliteits Index (FI) worden berekend voor het netwerk.

In Annex 67 is een belangrijke stap voorwaarts gezet om energie-flexibele gebouwen een belangrijke toegevoegde waarde te maken voor de stabiliteit van de toekomstige duurzame energienetwerken.

Referenties

1. Finck C., Li R., Kramer R., Zeiler W., 2018, Quantifying demand flexibility of power-to-heat and thermal energy storage in the control of building heating systems, *Applied Energy* 209: 409-425
2. Finck C., Li R., Zeiler W., 2020, Optimal control of demand flexibility under real-time pricing for heating systems in buildings: A real-life demonstration, *Applied Energy* 263: 114671
3. Junker R.G., Azar A.G., Lopes R.A., Lindberg K.B., Reynders G., Relan R., Madsen H., 2018, Characterizing the Energy Flexibility of Buildings and Districts, *Applied Energy* 225175-182. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191830730X
4. Klein K., 2017, Quantifying the energy flexibility of building energy systems, Evaluation of grid-supportive concepts for space heating and cooling in non-residential buildings, PhD thesis Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Germany
5. RVO, 2015, Internationale kennis gebouwde omgeving, Overzicht publicaties en resultaten projecten Internationale Energy Agency, Publicatienummer: RVO-047-1501/RP-DUZA
6. annex67.org/Publications
7. annex67.org/Deliverables