

Eindrapport

Missiegedreven Onderzoek, Ontwikkeling en Innovatie



Digitale Aggregatie en Collectieve Sturing van Hybride Warmtepompen – DACS-HW

Referentienummer: MOOI322001

Openbare versie

Auteurs:

Erwin Bisschop (Inversable & Voorstroom)

Hylco de Boer (Samen Energie Neutraal)

Raymond van Hooijdonk (Enexis)

Rowan Hormann (Enablemi)

Xin Li (TU/e)

Erik Matien (Enablemi)

Nikos Paterakis (TU/e)

Tom van Urk (Enablemi)

Louis Visser (Intergas)

Gerjan Wolterink (Intergas)

Inhoudsopgave

01

Algemene gegevens project

02

Beschrijving project

- 2.1. Aanleiding
- 2.2. Doel
- 2.3. Verantwoordelijkheden projectpartners
- 2.4. Locatie van het project
- 2.5. Schematische weergave project

03

Resultaten

- 3.1. Projectorganisatie
- 3.2. Projectopbouw
- 3.3. Behaalde resultaten en beantwoording onderzoeksvragen
- 3.4. Perspectief voor toepassing
- 3.5. Doelgroep
- 3.6. Geleerde lessen

04

Bijdrage aan doelstelling regeling

05

Spin-off binnen en buiten de sector

06

Kennisdisseminatie

07

Slotwoord

1. Algemene gegevens project

Voor u ligt het openbare eindverslag met betrekking tot het project Digitale Aggregatie en Collectieve Sturing van Hybride Warmtepompen (DACS-HW). Het project is uitgevoerd met subsidie van het ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG), met ondersteuning van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO). De specifieke subsidie voor dit project is afkomstig uit de MOOI subsidieronde 2022.

Projecttitel

Digitale Aggregatie en Collectieve Sturing van Hybride Warmtepompen – DACS-HW

Penvoerder

Enablemi B.V.

Projectpartners

Enexis Personeel B.V.

Intergas Verwarming B.V.

Inversable B.V.

The Code Crew B.V. (h.o.d.n. Voorstroom)

Stichting Samen Energie Neutraal

Technische Universiteit Eindhoven

Projectperiode

01-01-2023 tot en met 31-12-2025

Referentienummer

MOOI322001

Contactpersoon voor meer informatie

Projectleider

Erik Matien (Erik@enablemi.com)

Projectondersteuning

Rowan Hormann (rowan@enablemi.com)

Tom van Urk (tom@enablemi.com)

Dit rapport is opgesteld door penvoerder Enablemi B.V. Een digitaal exemplaar van dit rapport is verkrijgbaar via e-mail (gratis). Deze kan worden aangevraagd via info@enablemi.com.

2. Beschrijving project

2.1. Aanleiding

De oorspronkelijke aanleiding voor het project DACS-HW was de verwachting dat de snelle groei van hybride warmtepompen, mede gestimuleerd door hoge energieprijzen en overheidsbeleid, zou leiden tot toenemende congestie op het laagspanningsnet (LS-net). Dit risico neemt verder toe door de bredere trend van elektrificatie en verduurzaming van huishoudens, waaronder de groei van elektrisch vervoer, elektrische apparaten en lokale opslag.

Congestie op het LS-net wordt in belangrijke mate veroorzaakt door kleinverbruikers (KV), oftewel huishoudens. Dit segment kent specifieke uitdagingen: het betreft grote aantallen aansluitingen met uiteenlopende woningtypen, installaties en gebruikspatronen, waardoor de belasting op het net moeilijk voorspelbaar is. Tegelijkertijd beschikken netbeheerders over beperkte wettelijke instrumenten om actief regie te voeren op het gedrag van kleinverbruikers. Om hier invulling aan te geven heeft de Autoriteit Consument & Markt (ACM) het codebesluit congestiemanagement vastgesteld, waarin de rol van Congestion Service Provider (CSP) is geïntroduceerd om ook flexibiliteit vanuit het KV-segment te kunnen ontsluiten. DACS-HW sluit direct aan bij deze ontwikkeling.

Tegen deze achtergrond hebben Enablemi, Enexis, Intergas, Inversable, Samen Energie Neutraal, TU/e en Voorstroom de samenwerking gezocht binnen dit project, ondersteund door onder meer de Nederlandse Verwarmingsindustrie (NVI), FAN, OpenTherm, ElaadNL, de gemeente Coevorden, Duurzaam Dalen, Netbeheer Nederland en Energie van Ons. Het consortium is samengesteld op basis van complementariteit in expertise, variërend van netbeheer en warmtepomptechnologie tot data-analyse, sturing en bewonersparticipatie.

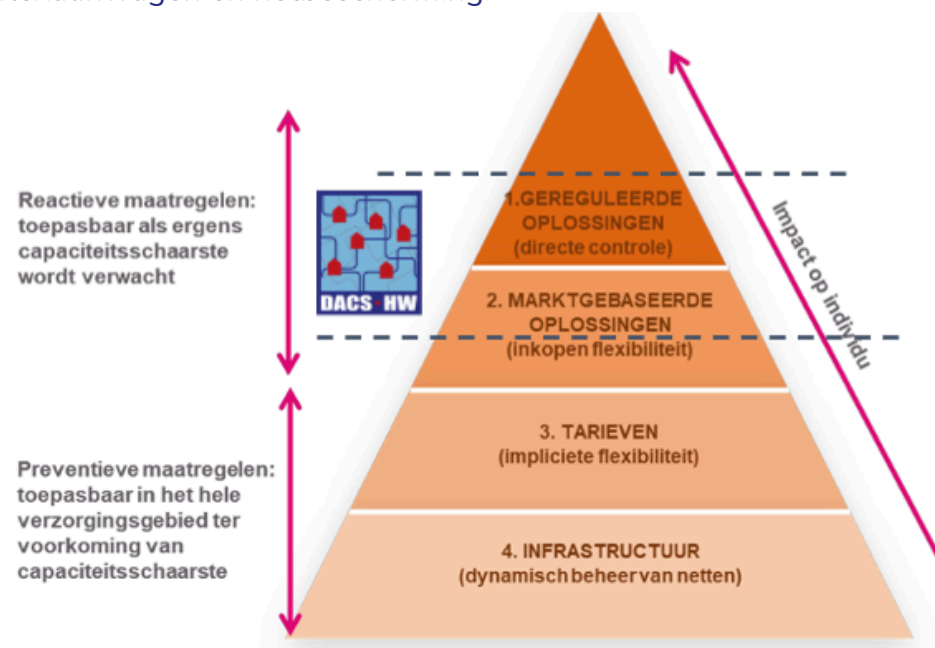
In het project is onderzocht hoe flexibiliteit van hybride warmtepompen achter de meter collectief kan worden ingezet om bij te dragen aan congestiemanagement op wijkniveau. Daarbij is uitgegaan van ontwerpprincipes die aansluiten bij (opkomende) open standaarden, met als doel het technische werkingsconcept in de praktijk te beproeven en de randvoorwaarden voor opschaling inzichtelijk te maken.

2.2. Doel

De doelstelling van het project DACS-HW was het technisch ontwikkelen en in de praktijk valideren van een werkingsprincipe voor netbewuste, collectieve aansturing van hybride warmtepompen op laagspanningsniveau. Het project richtte zich op het aantonen dat hybride warmtepompen, die oorspronkelijk niet aanstuurbaar waren vanuit het net, op een gecontroleerde en voorspelbare manier kunnen bijdragen aan het voorkomen van congestie op wijkniveau.

Dit technische werkingsprincipe is geplaatst binnen de bredere doelstelling om de verdere uitrol van hybride warmtepompen mogelijk te maken zonder dat dit leidt tot overschrijding van de vermogensgrenzen van wijktransformatoren en laagspanningskabels. Door collectieve aansturing kan de netbelasting worden beheerst, terwijl het comfort voor bewoners behouden blijft.

De onderliggende filosofie van het project is weergegeven in de flexpiramide (figuur 1). Daarbij wordt uitgegaan van een gelaagde aanpak: in eerste instantie sturen op prijsprikkels via dynamische energietarieven om het gedrag van gebruikers te beïnvloeden. Wanneer dit onvoldoende effect sorteert, kan flexibiliteit actief worden ingezet via sturing. In uiterste situaties kunnen netbeschermingsmaatregelen, zoals vermogensbegrenzing, worden toegepast. DACS-HW richtte zich primair op het technisch operationeel maken en beproeven van deze tweede en derde laag: flexaanvragen en netbescherming.



Figuur 1: Flexpiramide

Om dit te bereiken richtte het project zich op de ontwikkeling en praktijkvalidatie van een technologische aanstuurvoorziening voor hybride warmtepompen, ontworpen volgens de principes van een open standaard. Omdat de beoogde open standaard (S2) tijdens de projectperiode nog niet beschikbaar was, is gewerkt met een afgeleide van het S2-communicatieprincipe om het beoogde werkingsconcept in de praktijk te kunnen toetsen. Deze benadering maakte het mogelijk om te onderzoeken hoe collectieven van kleinverbruikers technisch kunnen bijdragen aan congestiemanagement op wijkniveau, via de rol van een Congestion Service Provider (CSP), met een conceptuele aansluiting op marktplatformen voor congestie-oplossingen zoals GOPACS.

Binnen het project is dit werkingsprincipe gerealiseerd en getest via verschillende vormen van aansturing, waaronder vaste vermogenskaders, noodstopsturing en dynamische sturing op basis van netbelasting en prognoses.

De focus lag daarbij nadrukkelijk op de technische haalbaarheid, voorspelbaarheid en schaalbaarheid van collectieve aansturing op laagspanningsniveau. Het project had expliciet niet tot doel om een open communicatiestandaard of een marktimplementatie te realiseren, maar om het technische concept en de bijbehorende randvoorwaarden te valideren in een realistische praktijksituatie.

Naast de technische validatie is aandacht besteed aan de financieel-economische randvoorwaarden voor toepassing op grotere schaal, waaronder vermeden netkosten, bewonersacceptatie, samenhang met bestaande stimuleringsmechanismen en de mogelijke rol en organisatorische invulling van de CSP als nieuwe schakel in het energiesysteem.

2.3. Verantwoordelijkheden projectpartners

Zoals beschreven in de aanleiding (2.1) is het consortium van DACS-HW samengesteld op basis van complementariteit, expertise en slagvaardigheid. De betrokken partijen brachten elk hun eigen kennis, ervaring en netwerk in om gezamenlijk de doelstelling van het project te realiseren: het ontsluiten van flexibiliteit door collectieve aansturing van hybride warmtepompen achter de meter, op basis van een open standaard. Hieronder wordt de specifieke rol en verantwoordelijkheid van iedere partner samengevat.



2.3. Verantwoordelijkheden projectpartners



2.3.1. Enablemi (penvoerder)

Enablemi verzorgde het projectmanagement en de algehele coördinatie van het project. Vanuit haar businessunit Energie bracht zij kennis in van de elektriciteitssector en ervaring met de uitrol van hybride warmtepompen in proeftuinen binnen het Programma Aardgasvrije Wijken (PAW). Als penvoerder bewaakte zij de voortgang, hield toezicht op de begroting en onderhield de relatie met de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland. Daarnaast droeg zij vanuit haar positie in het netwerk bij aan de kennisdisseminatie en communicatie, onder meer door het organiseren van bijeenkomsten en het verbinden van de DACS-HW-pilot met andere relevante voorbeeldprojecten, zoals bijvoorbeeld NO GIZMOS en GENIUS.



2.3.2. Enexis (netbeheerder)

Enexis bracht cruciale kennis en data in over congestiescenario's op het laagspanningsnet. Binnen dit project heeft Enexis in Dalen een representatieve wijk geselecteerd met voldoende aangeslotenen achter één wijktransformator en een divers woningtype, geschikt om collectieve aansturing van hybride warmtepompen te onderzoeken. Voorts leverde Enexis de meetinfrastructuur bij de wijktrafo en valideerde zij de technische effecten van collectieve aansturing. Ook bracht de afdeling Innovatie expertise in vanuit het DALI-concept (Distributie Automatisering). Daarnaast vervulde Enexis een verbindende rol richting Netbeheer Nederland en ElaadNL. ElaadNL is de gezamenlijke innovatie- en kennisorganisatie van de Nederlandse netbeheerders en richt zich met name op innovatie en standaardisatie van componenten achter de meter, in het niet-gereguleerde deel van het energiesysteem, waar de regionale netbeheerder geen uitvoerende rol heeft. Via deze route konden projectresultaten direct worden gekoppeld aan bredere sectorinitiatieven rond flexibiliteit en open standaarden. Hierdoor ontstond ook de verbinding met het vervolproject binnen ElaadNL, waarin open standaarden voor onder meer batterijen, warmtepompen en elektrische voertuigen verder worden ontwikkeld.



2.3.3. Intergas (fabrikant hybride warmtepompen)

Intergas ontwikkelde en leverde de hybride warmtepompen die binnen het project zijn toegepast. Het R&D-team ontwierp en implementeerde op de besturingsunit de firmware die nodig was voor de collectieve aansturing, en zorgde voor de technische koppeling met het platform van Inversable. In totaal zijn 97 toestellen in Dalen geplaatst en getest. Intergas nam tevens actief deel aan de standaardisatie-discussies en toonde bereidheid om de toekomstig te ontwikkelen standaard te integreren in toekomstige productlijnen. Ook onderhield Intergas contact en verbinding met de verwarmingsindustrie, via welke kennis is gedeeld over de voortgang. Hierbij heeft Intergas gebruik gemaakt van de infrastructuur van het Demonstratieproject Hybride Warmtepompen (in de gebouwde omgeving).

2.3. Verantwoordelijkheden projectpartners

inversable

2.3.4. Inversable (dataplatform & slimme aansturing)

Inversable ontwikkelde het dataplatform en de rekenkern van het systeem. Het bedrijf realiseerde de koppelingen met slimme meters en wijktrafo's, ontwierp de data-architectuur en implementeerde algoritmen voor de real-time berekening en aansturing van flexcapaciteit. Inversable bouwde voort op haar ervaring met open-source technologie, open standaarden en dataveiligheid, en speelde een centrale rol bij het waarborgen van privacy en AVG-conformiteit.

 **voorstroom**
Collectief goed geregeld

2.3.5. Voorstroom (energieplatform)

Voorstroom ontwikkelde het digitale bewonersplatform waarmee gebruikers hun voorkeuren konden instellen en inzicht kregen in prestaties en opbrengsten van hun warmtepomp. De app werd tijdens de pilot meerdere keren aangepast op basis van bewonersfeedback. Daarmee leverde Voorstroom niet alleen een functionele interface, maar ook inzicht in de gebruikerservaring en de voorwaarden voor succesvolle betrokkenheid van bewoners bij collectieve flexibiliteitsdiensten.

samen +
energie -

neutraal

2.3.6. Samen Energie Neutraal (bewonersparticipatie)

SEN fungeerde als de schakel tussen het project en de bewoners in Dalen. De organisatie verzorgde de werving van deelnemers, organiseerde bewonersbijeenkomsten en ondersteunde de communicatie gedurende de pilot. Dankzij haar lokale netwerk, haar zelf-ontwikkelde QuickFIT-methode en samenwerking met Duurzaam Dalen wist SEN een representatieve groep huishoudens in de wijk te mobiliseren en te begeleiden. SEN droeg daarmee direct bij aan de maatschappelijke inbedding en acceptatie van de technologie.

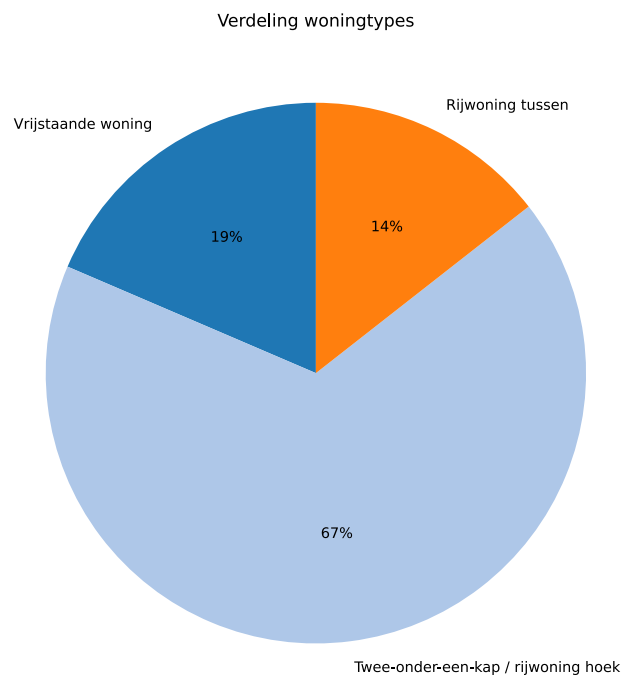
TU/e EINDHOVEN
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY

2.3.7. Technische Universiteit Eindhoven (onderzoek & innovatie)

De groep Electrical Energy Systems (EES) van de TU/e leverde het wetenschappelijke fundament van het project. Onderzoekers uit de onderzoekslijn Intelligent Power Grids modelleerden de flexibiliteit van hybride warmtepompen, analyseerden de effecten op het laagspanningsnet en ontwikkelden besturingsmechanismen om de impact van de pilot in termen van gecreëerde netcapaciteit en maatschappelijke kosten te kwantificeren. De TU/e publiceerde de resultaten in wetenschappelijke artikelen en droeg bij aan waarde modellen voor congestiemanagement, waarmee de resultaten van DACS-HW ook academisch zijn geborgd (zie H6).

2.4. Locatie van het project

De ontwikkelactiviteiten hebben bij de projectpartners grotendeels op eigen locaties plaatsgevonden. Alle projectpartners zijn gevestigd in Nederland. Een fysieke pilot heeft plaatsgevonden in het dorp Dalen (gemeente Coevorden). In de desbetreffende wijk zijn 255 woningen aangesloten via laagspanningskabels op 1 wijktransformator. Deze wijktransformator heeft een totaal vermogen van 400kVA.



Figuur 3: Verdeling woningtypes DACS-HW



Figuur 2: Locatie fysieke pilot DACS-HW

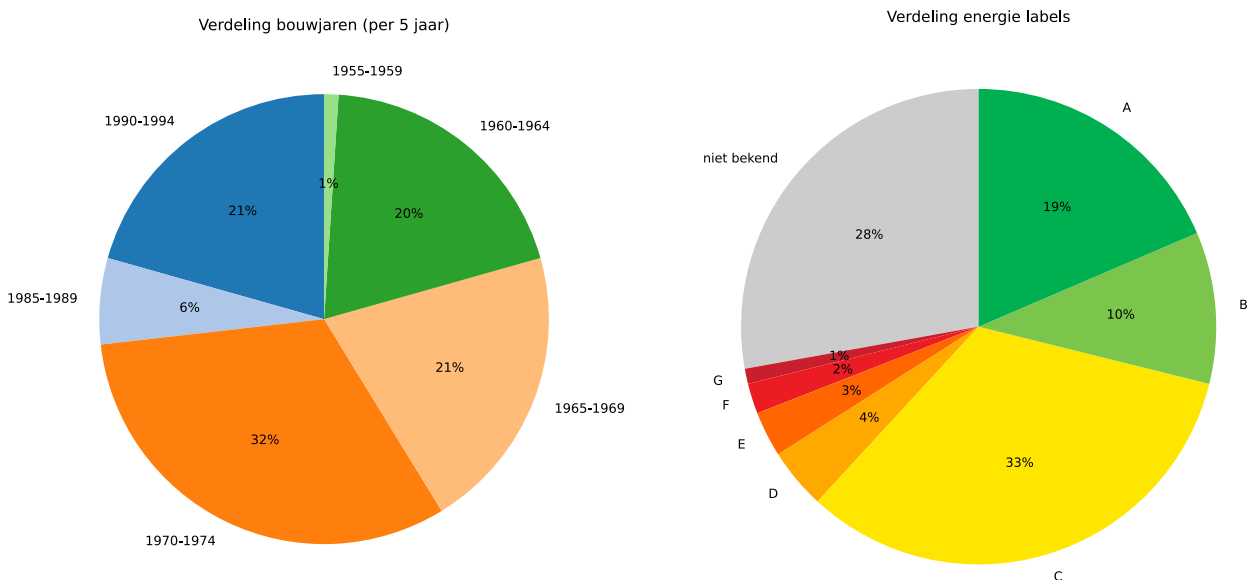
Kenmerken van de pilotlocatie

De pilotlocatie wordt gekenmerkt door een brede variatie in woningen en bouwjaren en vormt daarmee een realistische afspiegeling van een gemiddelde Nederlandse woonwijk. De woningen zijn gebouwd in de periode van circa 1959 tot 1994, met een duidelijke spreiding over de jaren zestig, zeventig en negentig.

Deze diversiteit vertaalt zich in verschillen in isolatieniveau, installaties en energetische prestaties. Juist deze variatie maakt de pilotlocatie geschikt voor het analyseren van effecten van collectieve aansturing in een context die representatief is voor een groot deel van de bestaande woningvoorraad.

Ook wat betreft woningtypen is sprake van een divers en herkenbaar beeld (zie figuur 3). Binnen de wijk komen zowel tussenwoningen en twee-onder-een-kapwoningen als vrijstaande woningen voor.

Daarnaast bestaat de wijk uit een mix van koop- en huurwoningen, met uiteenlopende energielabels en bouwjaren (zie figuur 4). Deze combinatie van eigendomsvormen en energetische kenmerken weerspiegelt de heterogeniteit die in veel Nederlandse woonwijken wordt aangetroffen.



Gezamenlijk zorgen deze kenmerken ervoor dat de pilotlocatie een representatieve dwarsdoorsnede vormt van de gebouwde omgeving. Hierdoor zijn de inzichten en resultaten uit DACS-HW goed bruikbaar voor toepassing en opschaling in andere wijken met vergelijkbare diversiteit.

Figuur 4: Bouwjaren en energielabels DACS-HW

2.5. Schematische weergave project

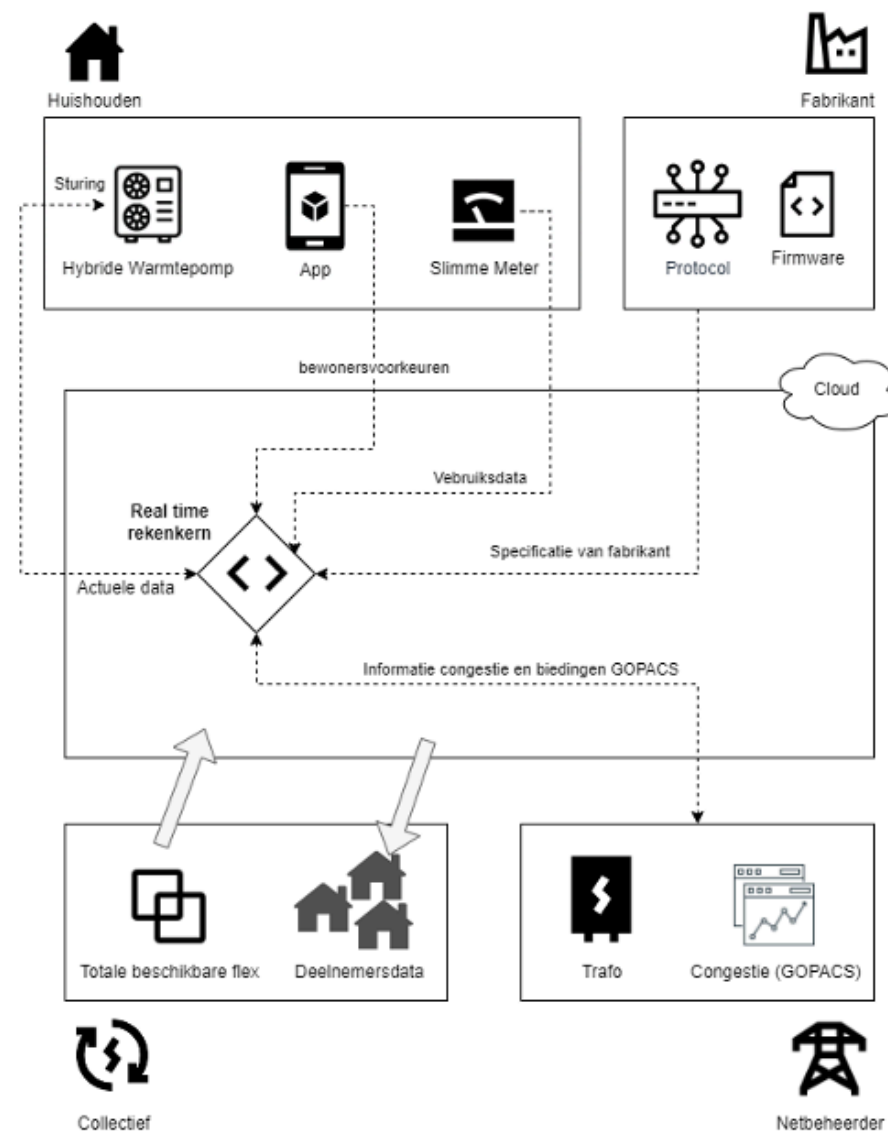
Onderstaand wordt het oorspronkelijke technologische concept beschreven dat bij aanvang van het project werd beoogd. In hoofdstuk 3 worden de daadwerkelijke resultaten en bevindingen nader toegelicht.

In het project is een systeem ontworpen waarmee een groep bewoners hun warmtepompen gezamenlijk kan inzetten om het elektriciteitsnet te ondersteunen. De gedachte achter dit concept is dat de netbeheerder, wanneer zij een tijdelijke overbelasting van het net voorspelt, via een landelijk platform (zoals GOPACS) een verzoek kan doen om het net te ontlasten. Het ontwikkelde cloudplatform zou vervolgens berekenen hoeveel flexibiliteit de aangesloten woningen op dat moment kunnen leveren.

Bewoners met een hybride warmtepomp zouden kunnen deelnemen door hun voorkeuren, zoals comfortinstellingen en tijdsvoorkeuren, via een app of interface vast te leggen. Deze voorkeuren worden vervolgens gecombineerd met meetgegevens, zoals energieprofielen en lokale netinformatie. Op basis hiervan bepaalt het platform hoeveel elektrische capaciteit de groep warmtepompen tijdelijk kan verhogen of verlagen.

Wanneer een verzoek van de netbeheerder wordt geaccepteerd, stuurt het platform de warmtepompen collectief aan binnen de grenzen die door de bewoners zijn opgegeven. Op deze manier kan flexibel vermogen worden geleverd zonder dat het bewonerscomfort merkbaar wordt aangetast.

Dit concept vormde het uitgangspunt van de pilot; in hoofdstuk 3 wordt besproken in hoeverre dit in de praktijk is gerealiseerd, welke onderdelen zijn getest en welke inzichten dit heeft opgeleverd.



Figuur 5: Schematische weergave DACS-HW

3. Resultaten

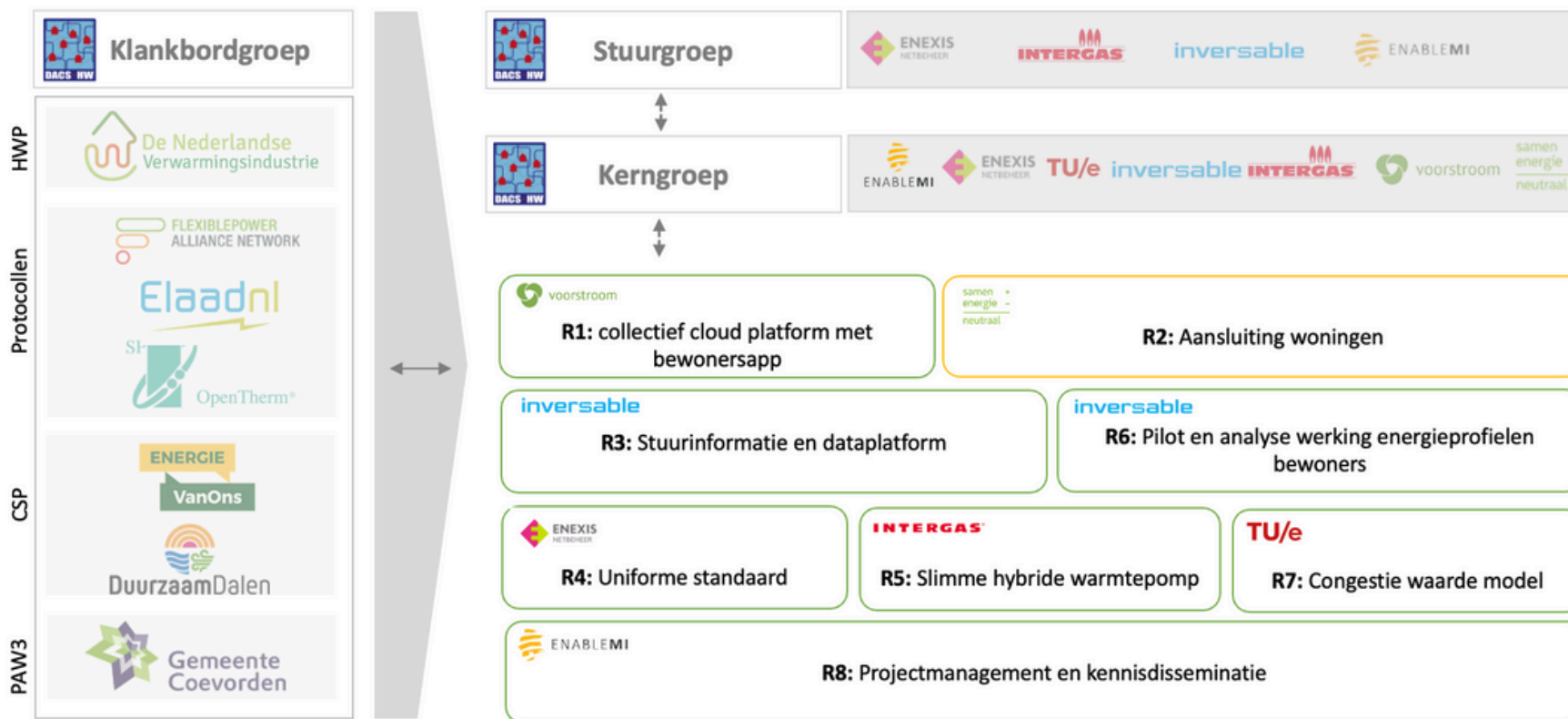
3.1. Projectorganisatie

De algehele projectleiding lag bij penvoerder Enablemi. Een senior projectleider was continu verantwoordelijk voor de coördinatie en begeleiding van het project, het bewaken van de planning en het ondersteunen van de partners bij de uitvoering. Het project is binnen het beoogde tijdsplan en budget uitgevoerd en succesvol afgerond.

Voor de operationele aansturing werd een kerngroep gevormd, waarin alle projectpartners vertegenwoordigd waren met ten minste één afgevaardigde. Deze kerngroep kwam eens per twee weken bijeen om de voortgang te bespreken, besluiten te nemen over inhoudelijke of organisatorische vraagstukken en de samenhang tussen de werkpakketten te bewaken. De bijeenkomsten werden geleid door de projectleider van Enablemi. Wanneer de projectleider verhinderd was, werd de leiding van de bijeenkomst vooraf overgedragen aan een van de kerngroepleden.

De afstemming op resultaatniveau vond primair plaats tussen de partijen die direct betrokken waren bij het betreffende werkpakket. Alleen wanneer resultaten wederzijds afhankelijk waren of besluiten een bredere impact hadden op het project, werd het onderwerp voorgelegd aan de kerngroep. Voor ieder resultaat werd bij aanvang een resultaatleider aangewezen, verantwoordelijk voor de uitvoering binnen het betreffende werkpakket en voor de eventuele escalatie van vraagstukken richting de kerngroep.

Naast de kerngroep werd bij de start van het project een stuurgroep ingesteld, bestaande uit een deelverzameling binnen het consortium. De stuurgroep was ingericht om toezicht te houden op de hoofdlijnen van het project en het bewaken van de strategische koers. In de praktijk kwam de stuurgroep slechts enkele keren bijeen, aangezien de voortgang en onderlinge samenwerking daar geen aanleiding toe gaven.

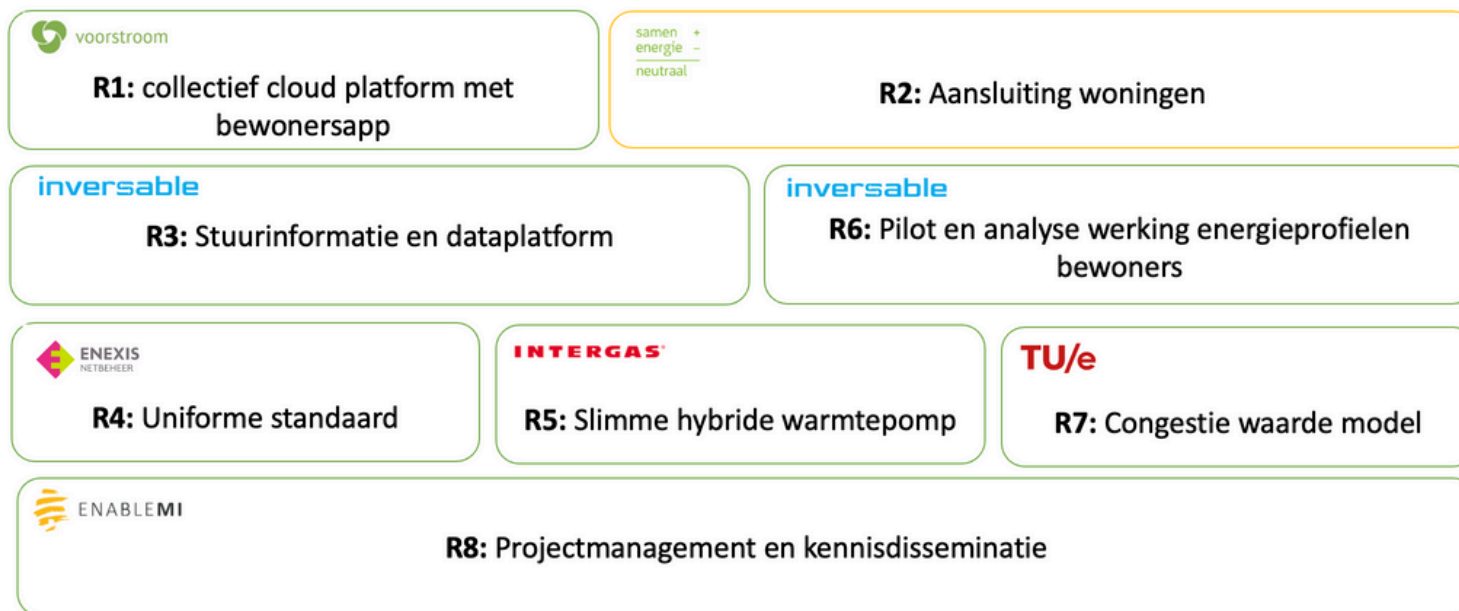


Figuur 6: Organisatiestructuur DACS-HW

In figuur 6 is ook de klankbordgroep zichtbaar. Gedurende de looptijd van het project is op verschillende manieren in meer of mindere mate geschakeld met individuele leden binnen deze groep, om de resultaten van het project te analyseren dan wel te presenteren. Projectpartners hebben dit vooral individueel gedaan.

3.2. Projectopbouw

DACS-HW is opgebouwd uit zeven inhoudelijke resultaten en één overkoepelend resultaat waarin het projectmanagement en de kennisdisseminatie waren ondergebracht. Alle projectpartners waren betrokken bij één of meerdere resultaten en leverden daar een actieve bijdrage aan. Daarnaast droeg iedere partner verantwoordelijkheid voor ten minste één inhoudelijk werkpakket binnen het project. In figuur 7 is deze verdeling van verantwoordelijkheden per resultaat weergegeven.



Figuur 7: Verantwoordelijkheden per resultaat

3.3. Behaalde resultaten en beantwoording onderzoeksvragen

Het project DACS-HW richtte zich op de centrale vraag hoe collectieve aansturing van hybride warmtepompen kan bijdragen aan het verminderen van netcongestie op laagspanningsniveau, met behoud van comfort voor bewoners en met voordelen voor zowel gebruikers als netbeheerders. Deze hoofdvraag is uitgewerkt aan de hand van vijf deelvragen, gericht op flexibiliteit, aansturing, marktinzicht, incentive-structuur en technische integratie via GOPACS (zie tabel 1).

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de onderzoeksvragen die richtinggevend waren voor de uitvoering van het project. In de daaropvolgende paragrafen worden deze vragen beantwoord op basis van de gerealiseerde resultaten.

Tabel 1: Onderzoeksvragen DACS-HW

Hoofdvraag	Op welke wijze kan een collectief van individuen door de inzet van hybride warmtepompen gezamenlijk de vermogensbelasting van trafostations in een wijk op LS-niveau, dusdanig beïnvloeden, dat congestie wordt vermeden en een WIN-WIN situatie wordt gecreëerd voor bewoner en netbeheerder?
Deelvraag 1	Hoeveel flexibiliteit kan collectief ontsloten worden achter een LS-trafo middels HWP's en is dit voldoende om de aldaar aanwezige of op handen zijnde congestie te mitigeren? (Wat is de (gemiddelde) ratio tussen de som aan netcapaciteit ontsloten via het collectief aan HWP's versus het congestievermogen op dezelfde locatie)?
Deelvraag 2	Hoe verhoudt het ontsluiten van flex door marktpartijen op consumentenniveau (bijv. dynamische tarieven) zich tot het sturen op congestievermijding? (= waardemodel).
Deelvraag 3	Op welke wijze dient de aansturing van de HWP op gestandaardiseerde wijze plaats te vinden om het trafohuisje te ontlasten? Hoe dienen de communicatieprotocollen eruit te zien? En met welke assets en actoren dient te worden gecommuniceerd?
Deelvraag 4	Welke incentive is nodig om een kritische massa huishoudens te creëren waarmee (lokale) congestie significant verminderd kan worden? En is dat haalbaar?
Deelvraag 5	Op welke wijze kan congestie worden afgeroepen via GOPACS en door een CSP worden aangegaan? Hoe dient dit technisch en organisatorisch te worden ingericht?

3.3.1. Hoofdvraag

Op welke wijze kan een collectief van individuen door de inzet van hybride warmtepompen gezamenlijk de vermogensbelasting van trafostations in een wijk op LS-niveau, dusdanig beïnvloeden, dat congestie wordt vermeden en een WIN-WIN situatie wordt gecreëerd voor bewoner en netbeheerder?

Het project DACS-HW heeft aangetoond dat collectieve aansturing van hybride warmtepompen op wijkniveau zowel technisch haalbaar als effectief is in het verminderen van belastingpieken op het laagspanningsnet. In het pilotgebied Dalen zijn 97 hybride warmtepompen geplaatst en continu gemonitord. De gezamenlijke gelijktijdige belasting bleef gedurende de gehele onderzoeksperiode onder de tachtig kilowatt, wat neerkomt op een gemiddelde van circa 0,8 kilowatt per woning. Wanneer de warmtepompen collectief werden aangestuurd, kon tijdens piekmomenten tussen de tien en vijftientig kilowatt aan vermogen worden gereduceerd. Dit komt overeen met een vermindering van ongeveer tien procent van de piekbelasting, en in uitzonderlijke situaties, zoals tijdens een noodsturing, zelfs met een kwart.

De proef heeft duidelijk gemaakt dat een groep huishoudens via slimme, gecoördineerde aansturing daadwerkelijk kan bijdragen aan het voorkomen van congestie, zonder dat dit leidt tot merkbaar comfortverlies voor bewoners.

De regeling van de hybride warmtepompen maakt het mogelijk om tijdelijk het elektrische vermogen te beperken, terwijl de gasketel automatisch bijspringt om de gewenste binnentemperatuur te behouden. Hierdoor blijft het comfortniveau constant, terwijl het net merkbaar wordt ontlast.

Deze resultaten zijn bereikt dankzij een nauwe samenwerking tussen de projectpartners en de ontwikkeling van een uniforme aansturingsketen, ondersteund door een gemeenschappelijk dataplatform. Binnen dit platform werden data over netbelasting, warmtepompgedrag en sturingssignalen geïntegreerd, waardoor partners gezamenlijk konden analyseren, bijsturen en optimaliseren. De praktijkervaringen in Dalen laten zien dat deze aanpak technisch betrouwbaar, organisatorisch uitvoerbaar en maatschappelijk goed inpasbaar is. Daarmee vormt DACS-HW een concreet bewijs dat collectieve sturing van hybride warmtepompen een realistische en schaalbare oplossing biedt voor het beheersen van netcongestie in woonwijken.

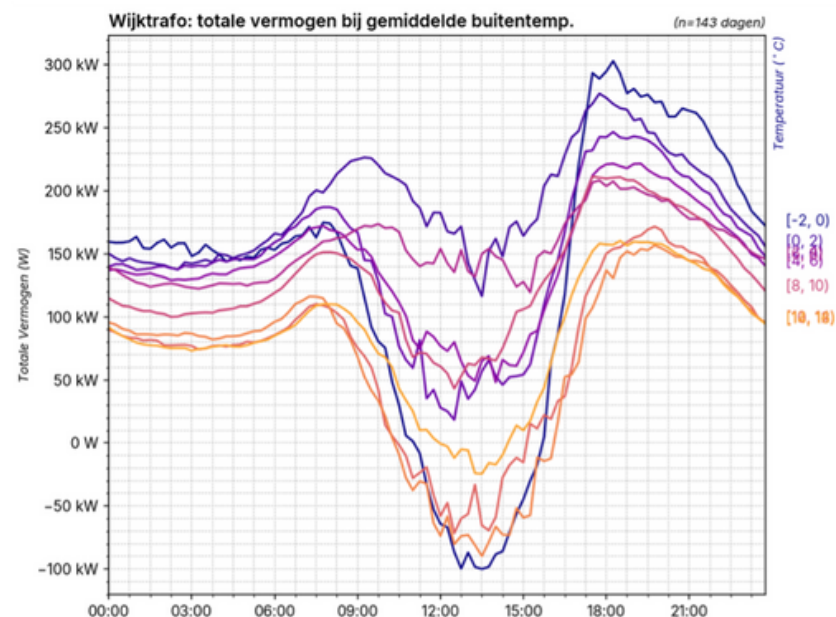
3.3.2. Deelvraag 1

Hoeveel flexibiliteit kan collectief ontsloten worden achter een LS-trafo middels HWP's en is dit voldoende om de aldaar aanwezige of op handen zijnde congestie te mitigeren? (Wat is de (gemiddelde) ratio tussen de som aan netcapaciteit ontsloten via het collectief aan HWP's versus het congestievermogen op dezelfde locatie)?

Uit de metingen en simulaties binnen DACS-HW blijkt dat hybride warmtepompen een aanzienlijk potentieel aan flexibiliteit kunnen bieden op wijkniveau. Uit de metingen en simulaties binnen DACS-HW blijkt dat hybride warmtepompen een aanzienlijk potentieel aan flexibiliteit kunnen bieden op wijkniveau. Uitgaande van een gemiddeld maximaal opgenomen vermogen van circa 800 watt per warmtepomp onder koude omstandigheden, en een toegepaste vermogensbegrenzing van 500 watt tijdens aansturing, resulteert dit in een flexibel vermogen van ongeveer 300 watt per actieve warmtepomp. Bij een cluster van honderd woningen betekent dit een beschikbaar vermogen van circa 30 kilowatt dat tijdelijk kan worden verlaagd. Wanneer de buitentemperatuur rond het vriespunt ligt, loopt dit potentieel op tot ongeveer tachtig kilowatt bij volledig afschakelen op piekmomenten. Dit komt neer op ongeveer een kwart van de totale belasting van de betrokken wijktransformator. Daarmee is duidelijk dat collectieve aansturing van warmtepompen een merkbaar effect kan hebben op de vermogensvraag in de wijk.

Impact wijktransformator

Figuur 8 toont het totale elektrische vermogen op de wijktransformator bij een gemiddelde buitentemperatuur. De weergegeven belasting omvat zowel het afgenomen als het teruggeleverde vermogen van de 255 woningen die via de laagspanningskabels op deze transformator zijn aangesloten. De transformator heeft een nominale capaciteit van 400 kVA. Gedurende de projectperiode is deze capaciteitsgrens niet overschreden.



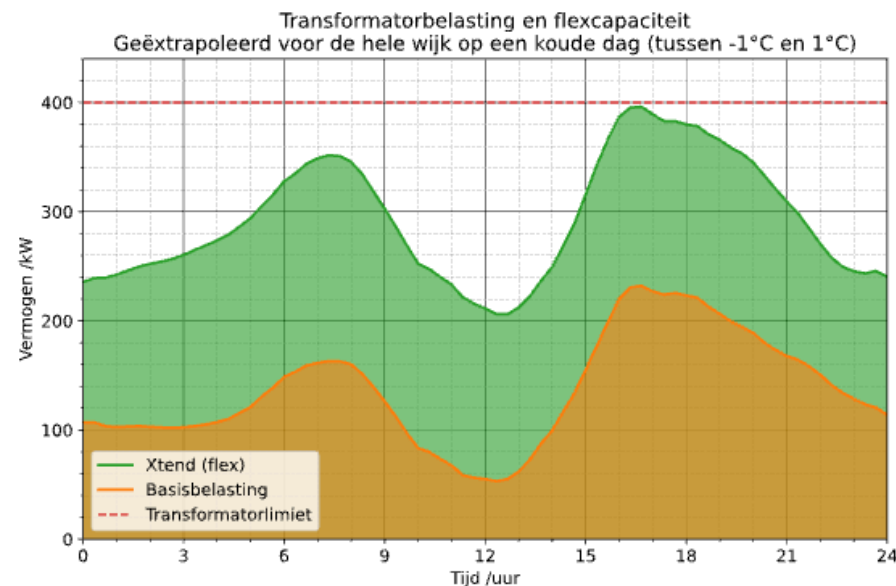
Figuur 8: Elektrisch vermogen wijktransformator bij gemiddelde buitentemperatuur

De gegevens uit figuur 8 zijn geëxtrapoleerd om inzicht te krijgen in de verwachte belasting van de wijktransformator en het beschikbare flexibiliteitspotentieel in een hypothetische situatie waarin alle woningen in de wijk zijn uitgerust met een hybride warmtepomp. Figuur 9 toont deze extrapolatie, waarbij de totale transformatorbelasting is opgesplitst in een basisbelasting en het aandeel van de hybride warmtepompen.

Het oranje deel van figuur 9 vertegenwoordigt de gemeten transformatorbelasting exclusief het elektriciteitsverbruik van de warmtepompen, terwijl het groene deel het geaggregeerde aandeel van de hybride warmtepompen weergeeft. Figuur 9 laat zien dat op een koude dag de belasting van de wijktransformator in deze hypothetische situatie zonder aansturing de capaciteitsgrens nadert. Bij toepassing van aansturing op de warmtepompen ontstaat daarentegen voldoende ruimte binnen de beschikbare transformatorcapaciteit.

Flexibiliteitspotentieel

De TU/e heeft het flexibiliteitspotentieel van hybride warmtepompen nader onderzocht met behulp van een modelmatige analyse (Li et al., 2025. Zie ook H6). Daarbij is een zogenoemd grey-boxmodel toegepast, waarmee het thermisch gedrag van woningen is gesimuleerd op basis van meetdata van 92 hybride warmtepompsystemen in Dalen. De thermische parameters van de woningen zijn geïdentificeerd en vervolgens geclusterd op basis van hun thermische weerstand (R), thermische capaciteit (C) en zinstraling (A), waardoor verschillende woningtypen met vergelijkbaar thermisch gedrag konden worden onderscheiden.



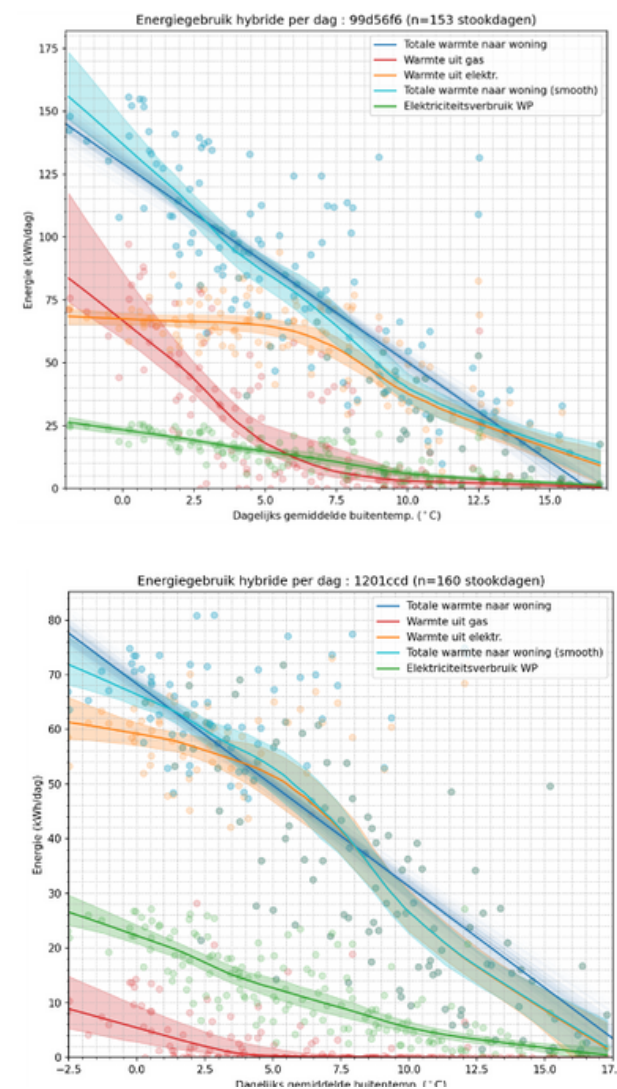
Figuur 9: Geëxtrapoleerde transformatorbelasting bij volledige uitrol van hybride warmtepompen

De clustering laat zien dat woningen binnen de onderzochte wijk verschillen in thermische eigenschappen en warmtebehoefte, maar dat een groot deel van de populatie kan worden ingedeeld in een beperkt aantal dominante clusters met vergelijkbaar thermisch gedrag. Doordat deze dominante clusters het grootste deel van de populatie vertegenwoordigen, wordt individuele variatie op geaggregeerd niveau uitgevlakt. Hierdoor ontstaat op wijkniveau een consistent en voorspelbaar beeld van het energiegebruik en het flexibiliteitspotentieel.

Binnen dit geaggregeerde beeld bestaan duidelijke verschillen tussen individuele woningen. Ter illustratie hiervan toont figuur 10 twee woningen met een uiteenlopende warmtevraag. Bij vergelijkbare buitentemperaturen verschilt de totale warmtevraag substantieel, wat zich uit in zowel de hoeveelheid benodigde energie als in de verdeling tussen warmtelevering door de warmtepomp en door de gasketel.

Deze voorbeelden laten zien dat woningkenmerken, afgiftesystemen en gebruikersinstellingen een sterke invloed hebben op het individuele energiegebruik. Tegelijkertijd bevestigen de clustering en metingen dat deze individuele variatie, bij voldoende schaal, niet ten koste gaat van de voorspelbaarheid van het collectieve gedrag van hybride warmtepompen.

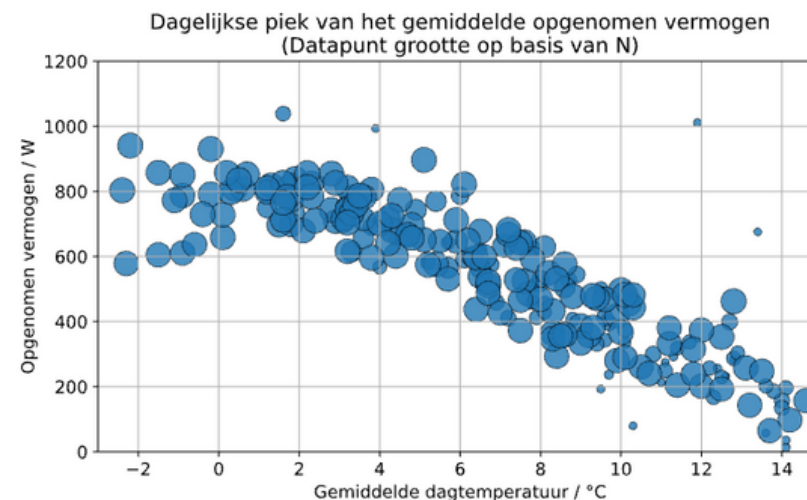
Wanneer deze individuele verschillen worden geaggregeerd, ontstaat echter een ander beeld. Figuur 11 toont de relatie tussen de gemiddelde dagtemperatuur (KNMI) en de dagelijkse piek van het gemiddeld opgenomen elektrische vermogen per warmtepomp. Elk datapunt vertegenwoordigt één dag, waarbij de grootte van het datapunt het aantal gelijktijdig actieve warmtepompen weergeeft. Grotere datapunten corresponderen daarmee met een grotere populatie en een robuustere statistische basis.



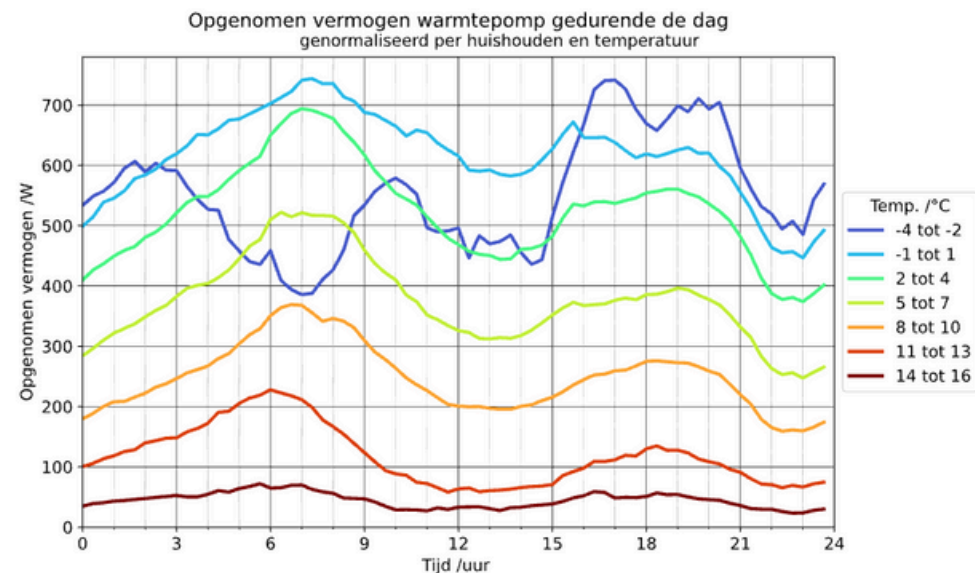
Figuur 10: Individuele variatie in energiegebruik van hybride warmtepompen

Figuur 11 laat zien dat bij afnemende buitentemperaturen het gemiddelde piekvermogen per warmtepomp stabiliseert rond circa 800 W. Hoewel incidenteel hogere waarden worden waargenomen, soms boven de 1000 W, zijn deze gebaseerd op dagen met een beperkt aantal actieve installaties. Bij kleine populaties kan het gemiddelde daardoor sterk worden beïnvloed door één of enkele woningen met een relatief hoog piekvermogen. Naarmate het aantal warmtepompen toeneemt, middelen deze uitschieters uit en ontstaat een stabiel en voorspelbaar gemiddeld gedrag. Voor grotere groepen warmtepompen ($n > 80$) laten de metingen zien dat het gemiddelde piekvermogen op koude dagen naar verwachting rond de 800 W per warmtepomp blijft.

Deze geaggregeerde relatie tussen buitentemperatuur en opgenomen vermogen is direct relevant voor het flexibiliteitspotentieel van hybride warmtepompen. Naarmate de buitentemperatuur daalt, neemt het gemiddeld opgenomen elektrische vermogen per warmtepomp toe, waardoor ook de beschikbare regelruimte voor vermogensbegrenzing groter wordt (zie figuur 12). Hoewel individuele woningen en installaties onderling sterk kunnen verschillen in absolute vermogens en gebruikspatronen, laat de aggregatie zien dat het collectieve gedrag zich reproduceerbaar ontwikkelt als functie van de buitentemperatuur. Hierdoor kan het effect van collectieve sturing op wijkniveau vooraf worden ingeschat en betrouwbaar worden ingezet voor congestiemanagement.



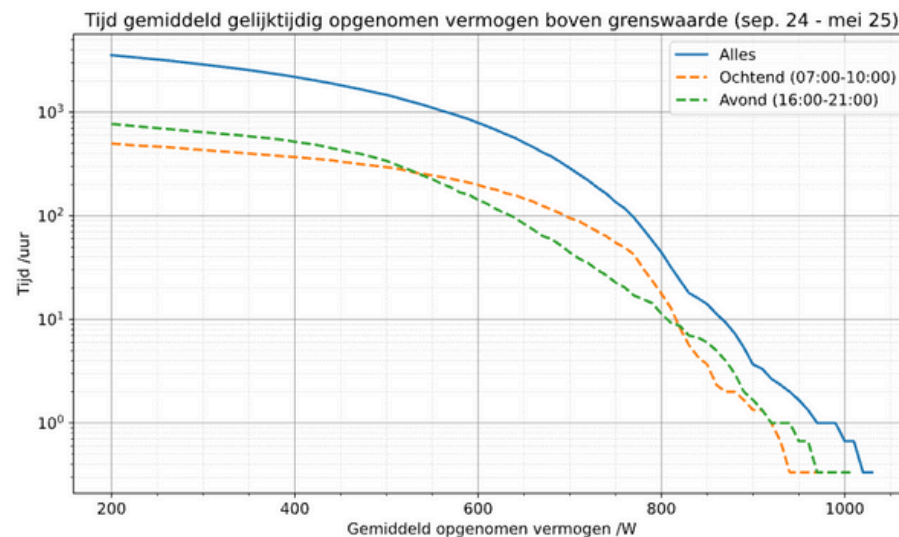
Figuur 11: Gemiddeld piekvermogen per hybride warmtepomp bij verschillende buitentemperaturen



Figuur 12: Temperatuurafhankelijke dagprofielen van het opgenomen vermogen van hybride warmtepompen

Waar figuur 12 inzicht geeft in de temperatuurafhankelijke dagprofielen van het opgenomen vermogen, laat figuur 13 zien hoe vaak bepaalde vermogensniveaus in de praktijk daadwerkelijk voorkomen gedurende het stookseizoen 2024–2025. Figuur 13 toont het aantal uren waarin het gemiddelde gelijktijdig opgenomen vermogen onder een gegeven vermogenswaarde blijft, gebaseerd op metingen met een resolutie van 20 minuten. Hieruit blijkt dat het gemiddeld gelijktijdig opgenomen vermogen gedurende het grootste deel van het stookseizoen ruim onder de hogere vermogensniveaus blijft en dat zowel de ochtend- als avondpieken slechts gedurende beperkte tijd optreden. Door de gehanteerde tijdsresolutie worden kortdurende pieken gedempt, waardoor zichtbaar wordt dat het gemiddelde gelijktijdige vermogen in de praktijk niet structureel boven circa 1 kW per warmtepomp uitkomt.

Aanvullende analyses op kabel- en faseniveau laten zien dat de benutting van de beschikbare netcapaciteit niet uitsluitend wordt bepaald door het totale opgenomen vermogen, maar ook door de verdeling daarvan over de fasen. In meerdere situaties is faseonbalans waargenomen, waarbij één fase relatief zwaar wordt belast terwijl op andere fasen nog capaciteit beschikbaar is. Dit laat zien dat, naast het benutten van flexibiliteit via collectieve aansturing, ook het verminderen van faseonbalans kan bijdragen aan een efficiëntere benutting van het laagspanningsnet, zonder dat het totale opgenomen vermogen hoeft te worden verlaagd.



Figuur 13: Aantal uren onder vermogensdrempels van het gemiddeld gelijktijdig opgenomen vermogen

De resultaten tonen aan dat de gezamenlijke inzet van hybride warmtepompen voldoende flexibiliteit kan opleveren om lokale congestie op wijkniveau te verminderen of zelfs te voorkomen. Voorwaarde is wel dat de aansturing gecoördineerd plaatsvindt via een centraal platform en dat de technische randvoorwaarden (zoals communicatie, dataverbinding en standaardisatie) goed zijn ingericht. In dat geval kan de hybride warmtepomp een effectieve bouwsteen vormen binnen het bredere palet aan oplossingen voor netcongestie in de gebouwde omgeving.

3.3.3. Deelvraag 2

Op welke wijze dient de aansturing van de HWP op gestandaardiseerde wijze plaats te vinden om het trafohuisje te ontlasten? Hoe dienen de communicatieprotocollen eruit te zien? En met welke assets en actoren dient te worden gecommuniceerd?

Tijdens het project is een volledige keten voor de aansturing van hybride warmtepompen ontwikkeld en getest (zie figuur 14). Enexis, via ElaadNL, leverde dagelijks voorspellingen van de verwachte belasting op de wijktransformator en stuurde dit via het OpenADR 3.0-protocol naar Inversable. Op basis van deze prognoses kon Inversable via Intergas met een custom-protocol vermogenslimieten doorgeven aan de hybride warmtepompen. De hybride warmtepompen vertaalden dit limiet vervolgens naar een aanpassing van het gedrag van het apparaat. Zo ontstond een functionele koppeling tussen de netbeheerder, het digitale aansturingssysteem en de installaties bij bewoners, waarmee vraag en aanbod op wijkniveau met elkaar werden verbonden en actief kon worden gereageerd op schommelingen in de belasting van het laagspanningsnet.

De weergegeven keten betreft een functionele weergave van de aansturing zoals deze binnen DACS-HW is beproefd. De feitelijke implementatie maakte daarbij gebruik van projectspecifieke uitbreidingen op bestaande communicatieprotocollen en systemen, met name aan de zijde van de warmtepompfabrikant. DACS-HW had als doel om het werkingsprincipe van collectieve aansturing binnen deze functionele architectuur in de praktijk te valideren.

Voor de aansturing van de warmtepompen is gekozen voor een uitbreiding van het bestaande communicatieprotocol van Intergas. Hoewel de S2-standaard inhoudelijk goed aansluit bij vermogensbegrenzing van energie-assets, biedt deze bij de aansturing van één specifiek type asset in deze fase beperkte toegevoegde waarde. De gekozen oplossing maakte het mogelijk om vermogenslimieten op een robuuste en transparante wijze te implementeren, passend bij de schaal en complexiteit van het project.

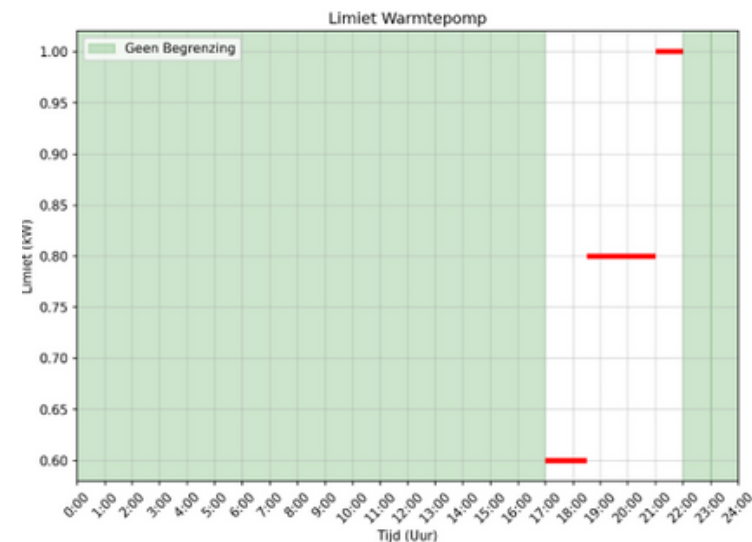
Binnen deze conceptuele aansturingsketen zijn verschillende vormen van sturing beproefd (zie ook figuur 1; flexpiramide in paragraaf 2.2.). Hiermee is inzicht verkregen in zowel de technische werking als de effecten op de netbelasting. In een eerste stap is gewerkt met vaste vermogenskaders, waarbij voor vooraf gedefinieerde tijdsblokken een maximaal elektrisch vermogen voor de warmtepompen werd ingesteld. Deze vorm van aansturing maakt het mogelijk om de belasting in perioden met een verwachte piek structureel te begrenzen, zonder dat continue bijsturing noodzakelijk is.

Figuur 14: Conceptuele aansturingsketen voor hybride warmtepompen zoals functioneel beproefd in DACS-HW



Vast vermogenskader

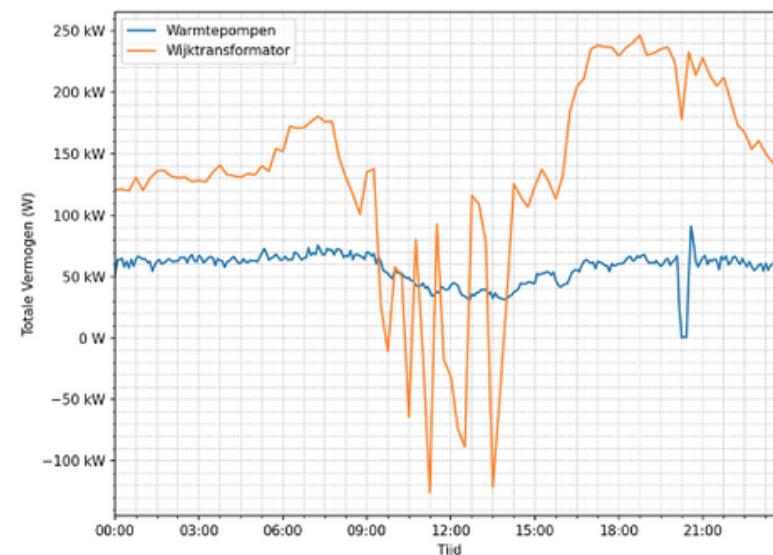
Figuur 15 illustreert een voorbeeld van een dergelijk vast vermogenskader, waarin gedurende de namiddag en avonduren het beschikbare elektrische vermogen van de warmtepomp tijdelijk wordt verlaagd. De metingen laten zien dat deze aanpak effectief is in het reduceren van de gelijktijdige belasting op de wijktransformator. Binnen DACS-HW resulteerde dit in een afvlakking van de piekbelasting met circa tien procent, terwijl het thermisch comfort voor bewoners behouden bleef.



Figuur 15: Voorbeeld van aansturing met vaste vermogenskaders voor hybride warmtepompen

Netbeschermingsscenario: noodstop van hybride warmtepompen

Naast aansturing met vaste vermogenskaders is binnen DACS-HW ook een netbeschermingsscenario beproefd voor uitzonderlijke situaties waarin de belasting op het laagspanningsnet plotseling sterk toeneemt. In dergelijke situaties kan de wijktransformator de grens van zijn capaciteit naderen of overschrijden, met een verhoogd risico op uitval. Om hierop voorbereid te zijn, is getest met een noodstopscenario. Hierbij zijn de warmtepompen binnen enkele minuten volledig uitgeschakeld. Figuur 16 laat het effect hiervan zien tijdens een avondpiek. De metingen tonen dat deze maatregel resulteerde in een directe en tijdelijke afname van het gevraagde vermogen van circa 25%. Hiermee wordt aangetoond dat noodsturing een effectief instrument kan zijn om acute overbelasting van de wijktransformator te voorkomen. Vanwege het ingrijpende karakter is dit scenario nadrukkelijk bedoeld als laatste vangnet, aanvullend op minder ingrijpende vormen van aansturing zoals vaste vermogenskaders.



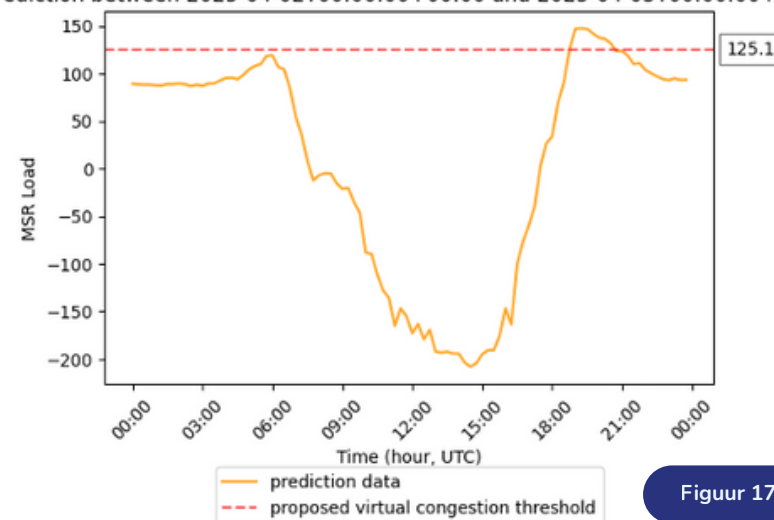
Figuur 16: Effect van een netbeschermingsscenario (noodstop) tijdens een avondpiek (20:00)

Dynamische sturing

In de laatste fase van DACS-HW is dynamische sturing toegepast als verdere verfijning van de aansturing van hybride warmtepompen. Bij deze sturingsvorm wordt gebruikgemaakt van dagelijkse voorspellingen van de verwachte belasting op de wijktransformatie, gecombineerd met real-time metingen. Op basis van deze data is voor elke dag een 24-uursprofiel opgesteld, waarin een virtuele vermogenslimiet is gedefinieerd die onder de verwachte piekbelasting lag.

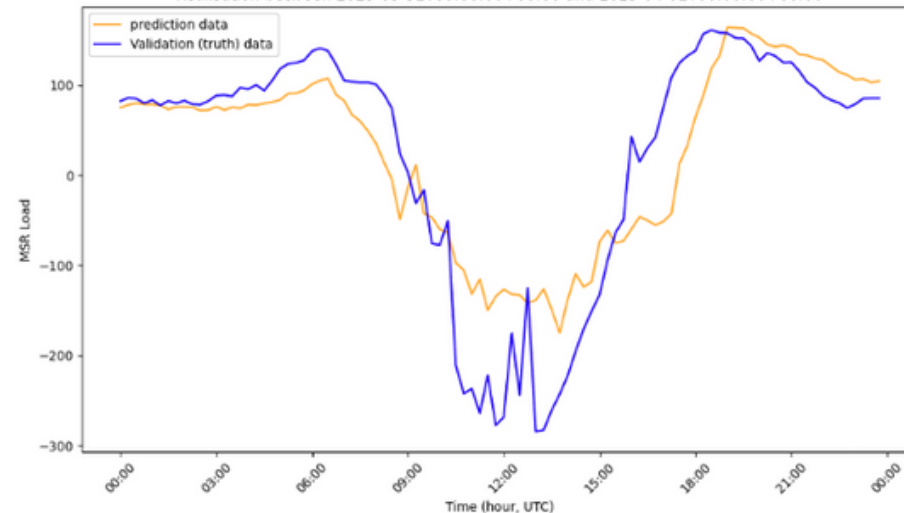
Figuren 17 en 18 illustreren deze werkwijze. In figuur 17 is de dagvoorspelling weergegeven die wordt gebruikt voor het bepalen van de virtuele vermogenslimiet. Figuur 18 toont de vergelijking tussen de voorspelde en de gemeten absolute belasting van de wijktransformator. Het verschil in schaal tussen beide panelen weerspiegelt daarmee het onderscheid tussen de voorspelling die wordt gebruikt voor limietstelling en sturingsruimte onder de verwachte piekbelasting (figuur 17) en de totale, gemeten netbelasting waarop realtime feedback plaatsvindt (figuur 18). De resultaten laten zien dat afwijkingen tussen voorspelling en werkelijkheid tijdig kunnen worden opgevangen, waardoor de belasting van de wijktransformator binnen de beschikbare capaciteit blijft.

Prediction between 2025-04-02T00:00:00+00:00 and 2025-04-03T00:00:00+00:00



Figuur 17

Realisation between 2025-03-31T00:00:00+00:00 and 2025-04-01T00:00:00+00:00

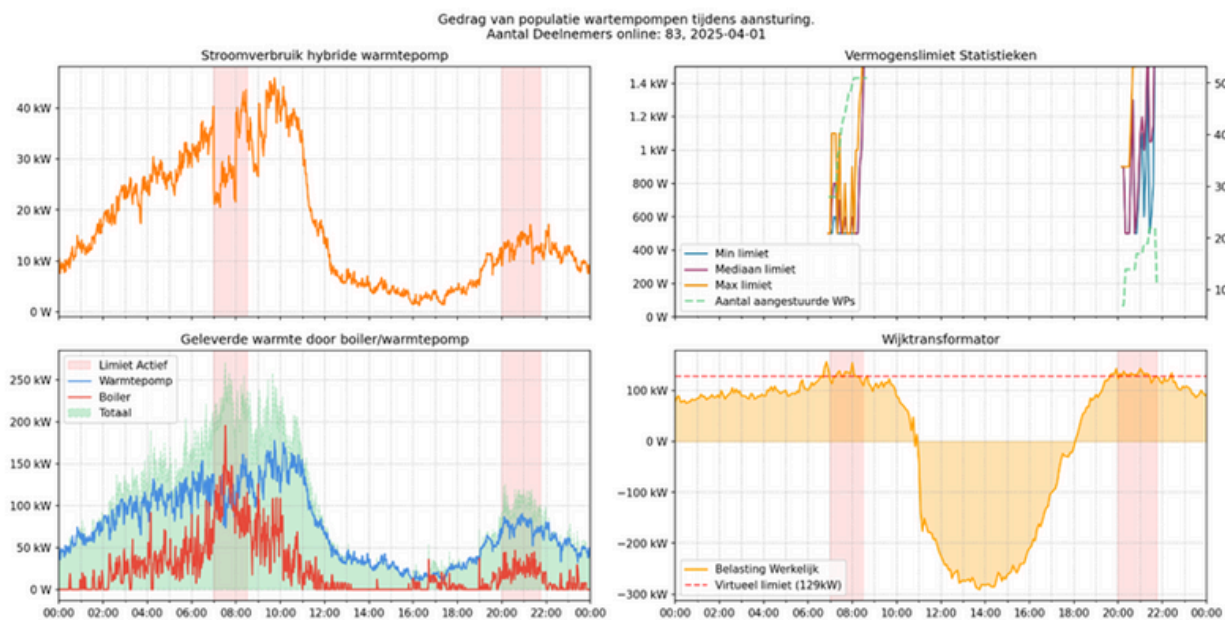


Figuur 18

Figuur 19 toont het gedrag van een populatie van 83 hybride warmtepompen tijdens dynamische aansturing op 1 april 2025, op basis van dagvoorspellingen en realtime metingen van de wijktransformator. In deze figuur is te zien hoe de ingestelde virtuele vermogenslimiet gedurende de dag dynamisch wordt aangepast en hoe individuele warmtepompen hierop reageren door hun elektrisch vermogen te begrenzen. De virtuele limiet is daarbij bewust lager ingesteld dan de fysieke afzekering van de transformator, om een situatie met flexbehoefte te simuleren. De effecten van deze dynamische aansturing zijn direct zichtbaar in de meetresultaten in figuur 19. Zodra de belasting van de wijktransformator de ingestelde virtuele vermogenslimiet naderde, werden de hybride warmtepompen aangestuurd. Tegelijkertijd blijft de warmtevraag gehandhaafd doordat de systemen tijdelijk meer warmte leveren via de gasketel.

Dit is zichtbaar in de gelijktijdige daling van het elektrisch vermogen van de warmtepompen en het stabiliseren van de transformatorbelasting, terwijl de totale warmtelevering op peil blijft.

Daarnaast laten de individuele vermogensmetingen zien dat de aansturing niet leidt tot een abrupte, gelijktijdige uitschakeling van alle warmtepompen, maar gespreid over de populatie plaatsvindt. Hierdoor wordt de belasting geleidelijk en gecontroleerd aangepast aan de actuele netsituatie. Deze meetresultaten laten zien dat dynamische aansturing op basis van realtime data fijnmazig kan ingrijpen en effectief bijdraagt aan het beheersen van piekbelasting op wijkniveau, met meer regelruimte dan vaste vermogenskaders en zonder de ingrijpendheid van een netbeschermingsscenario.



Figuur 19: Gedrag van 83 hybride warmtepompen bij dynamische sturing

Robuustheid en implementatie-aspecten van collectieve aansturing

DACS-HW heeft aangetoond dat de aansturing van hybride warmtepompen in de praktijk betrouwbaar functioneert, maar ook dat er operationele randvoorwaarden zijn die van invloed zijn op de effectiviteit. Zo veroorzaakten interne processen van de warmtepomp, zoals defrost- en oil-return-cycli, incidenteel korte vermogenspieken die tijdelijk boven de ingestelde vermogenslimieten uitkwamen. Deze pieken zijn echter van korte duur en treden niet gelijktijdig op bij meerdere systemen. Daardoor zijn zij op het niveau van de wijktransformator niet zichtbaar en hebben zij geen meetbaar effect op de netbelasting.

Daarnaast bleek de communicatiestructuur een aandachtspunt. De verbinding met de warmtepompen verliep via de wifi-infrastructuur van bewoners, wat in sommige gevallen leidde tot tijdelijke onderbrekingen in de communicatie tussen het aansturingsplatform en de installaties.

Tijdens het project is de firmware van Intergas daarom doorontwikkeld en uitgebreid getest, onder meer om de omgang met dergelijke verstoringen robuuster te maken. De functionaliteit voor vermogensbegrenzing via externe aansturing is inmiddels opgenomen in de standaardfirmware en via updates beschikbaar gesteld voor zowel bestaande als nieuwe hybride warmtepompsystemen.

Op basis van de opgedane ervaring concluderen de projectpartners dat een capaciteitskader, waarbij vooraf een maximale vermogensruimte per wijk of per type apparaat wordt vastgesteld, op dit moment de meest haalbare en robuuste vorm van aansturing vormt voor het laagspanningsnet. Deze aanpak maakt het mogelijk om piekbelasting effectief te beheersen met een beperkt aantal stuurparameters en zonder afhankelijk te zijn van complexe marktmechanismen. Een marktgebaseerde benadering via GOPACS blijkt voor toepassing op laagspanningsniveau vooralsnog te complex, zowel technisch als juridisch, om grootschalig en betrouwbaar te worden ingezet.

3.3.4. Deelvraag 3

Hoe verhoudt het ontsluiten van flex door marktpartijen op consumentenniveau (bijv. dynamische tarieven) zich tot het sturen op congestievermijding? (= waardemodel).

De resultaten van DACS-HW laten zien dat marktgestuurde prikkels, zoals dynamische energietarieven, en technische sturing gericht op netbescherming niet automatisch samenvallen. Dynamische tarieven stimuleren consumenten om hun energieverbruik te verschuiven naar momenten waarop elektriciteit goedkoper is, wat leidt tot een optimale kostenbesparing voor de gebruiker. Congestie management daarentegen richt zich primair op de veiligheid en stabiliteit van het elektriciteitsnet, waarbij soms sprake kan zijn van een tegengesteld belang als het om netbeheerder en gebruiker gaat en marktprijzen leidend worden en tot meer congestie kunnen leiden. Niet zonder reden worden er nu proposities ontwikkeld waarbij met behulp van een vergoeding netbewust gedrag wordt gestimuleerd (naast de energietarieven).

Binnen DACS-HW is bewust gekozen voor directe technische aansturing op basis van vermogens- of capaciteitslimieten. Deze benadering bood meer zekerheid dat piekbelastingen daadwerkelijk konden worden vermeden. De aansturing werd uitgevoerd op basis van realtime netinformatie en voorspellingen van de belasting, zodat de warmtepompen collectief konden reageren op dreigende overschrijdingen.

Kosten-batenanalyse van flexibiliteit op consumentenniveau

De TU/e heeft onderzocht hoe de kosten van het inzetten van flexibiliteit bij hybride warmtepompen zich verhouden tot de marktwaarde van deze flexibiliteit. Zie voor haar academische publicaties hierover ook hoofdstuk 6. Daarbij is gekeken naar de kosten die ontstaan wanneer een hybride warmtepomp tijdelijk overschakelt van elektrische verwarming naar gasverwarming als gevolg van aansturing. Voor deze analyse zijn gemiddelde energieprijzen voor 2025 als referentie genomen, met een elektriciteitsprijs van circa 0,27 €/kWh en een gasprijs van ongeveer 1,24 €/m³.

Uitgaande van een representatieve hybride warmtepomp, met variërende COP-waarden voor de warmtepomp en een gemiddeld rendement van de gasketel, blijkt dat het vervangen van 1 kilowattuur elektrische warmte door gasverwarming leidt tot extra kosten in de orde van grootte van circa 0,29 euro per kilowattuur in situaties met een hoge COP. Bij lagere COP-waarden valt dit bedrag lager uit, doordat de relatieve efficiëntie van elektrische verwarming afneemt. Dit betekent dat de kosten van flexibiliteit sterk afhankelijk zijn van de buitentemperatuur en het actuele prestatieniveau van de warmtepomp.

Naast deze kostenanalyse op apparaatniveau zijn ook verschillende stuurprocessen geanalyseerd om het effect van aansturing op de totale energie-efficiëntie van hybride warmtepompen te beoordelen. Hieruit blijkt dat de impact van tijdelijke vermogensbegrenzing en dynamische aansturing op de totale energie-efficiëntie beperkt is. De extra inzet van de gasketel blijft gering en leidt niet tot een wezenlijke verslechtering van de seizoenprestatie van de systemen.

Om de kosten van flexibiliteit bij eindgebruikers te kunnen plaatsen in een bredere context, is deze analyse afgezet tegen de marktwaarde van flexibiliteit zoals die tot uiting komt in herverdelingsopdrachten via GOPACS. Hiervoor zijn de op GOPACS gepubliceerde redispatch-opdrachten geanalyseerd, waarbij zowel het geactiveerde volume als de bijbehorende spreidingskosten zijn meegenomen. Figuur 20 toont de ontwikkeling van het geactiveerde flexibiliteitsvolume en de bijbehorende gewogen gemiddelde prijzen sinds 2024.

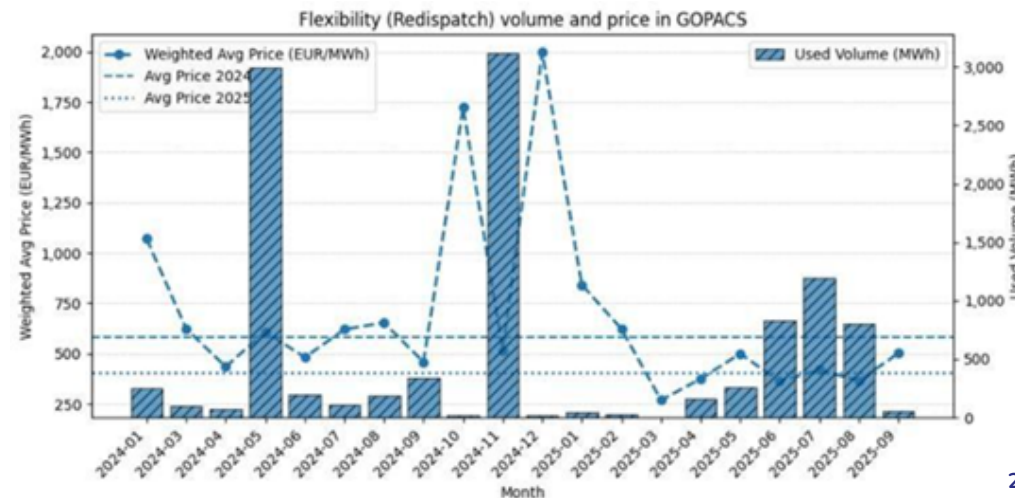
Op basis van deze gegevens is de gewogen gemiddelde prijs van flexibiliteit bepaald. Tabel 2 geeft een overzicht van het jaarlijks geactiveerde flexibiliteitsvolume en de bijbehorende gewogen gemiddelde prijs. In 2024 werd in totaal circa 7.409 MWh aan flexibiliteit geactiveerd tegen een gewogen gemiddelde prijs van ongeveer 581 euro per megawattuur. In de periode januari tot en met september 2025 bedroeg het geactiveerde volume circa 3.380 MWh, met een gewogen gemiddelde prijs van circa 406 euro per megawattuur.

De vergelijking tussen deze marktprijzen en de berekende marginale kosten van flexibiliteit bij hybride warmtepompen laat zien dat de kosten voor eindgebruikers relatief laag zijn in verhouding tot de marktwaarde van flexibiliteit die wordt ingezet om congestie te mitigeren. Daarmee wordt inzichtelijk dat flexibiliteit op consumentenniveau economisch relevant kan zijn binnen het bredere systeem van congestiemanagement. Tegelijkertijd onderstrepen deze resultaten dat marktmechanismen zoals GOPACS primair zijn ingericht voor toepassing op hogere netniveaus, en dat voor het laagspanningsnet eenvoudigere en robuustere vormen van sturing vooralsnog beter aansluiten bij de operationele praktijk.

Tabel 2: Jaarlijks overzicht van geactiveerd flexibiliteitsvolume en gewogen gemiddelde prijs via GOPACS

Jaar	Totaal geactiveerd volume (MWh)	Gewogen gemiddelde prijs (€/MWh)
2024	7.408,70	581,2
2025 (jan-sept)	3.379,70	405,6

Figuur 20: Geactiveerd flexibiliteitsvolume en gewogen gemiddelde prijs via GOPACS (sinds 2024)



Vergelijking tussen marktgebaseerde en technische flexibiliteit

De verschillen tussen marktgebaseerde flexibiliteit via GOPACS en technische flexibiliteit via hybride warmtepompen zijn samengevat in tabel 3. Deze vergelijking laat zien dat beide instrumenten een verschillende rol vervullen binnen congestiemanagement. Waar GOPACS primair geschikt is voor grootschalige herverdeling op hogere netniveaus, biedt directe aansturing van hybride warmtepompen een fijnmazige en locatie-specifieke oplossing voor het laagspanningsnet in de gebouwde omgeving.

Effectiviteit en kosten van sturingsstrategieën bij hybride warmtepompen

Een belangrijk inzicht uit zowel de economische analyse als de uitgevoerde simulaties is dat hybride warmtepompen door hun duale karakter, met zowel elektrische als gasgestookte warmteopwekking, snel en gecontroleerd kunnen reageren op aansturingssignalen zonder dat het comfort voor bewoners in het geding komt. De tijdelijke verschuiving van elektrische verwarming naar gas leidt tot een beperkt extra gasverbruik, afhankelijk van de buitentemperatuur en de duur van de aansturing, terwijl tegelijkertijd een substantiële reductie van de elektrische netbelasting kan worden gerealiseerd.

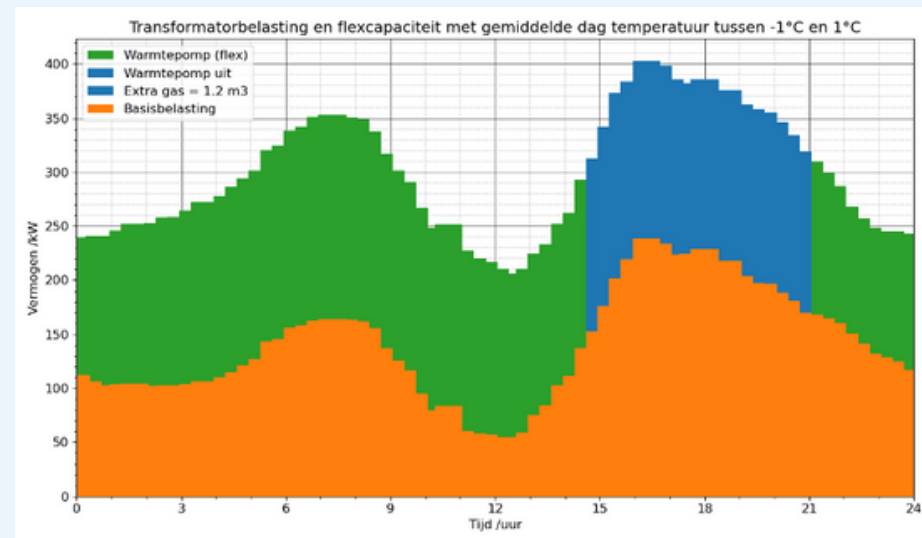
Aspect	GOPACS (marktgebaseerde herverdeling)	Flexibiliteit via HWP's
Type asset	Grote generatoren en industriële vraag	Huishoudelijke HWP's
Netvlak	Hoog- en middenspanning	Laagspanning
Kosten	400-600 €/MWh	<290 €/MWh
Schaalbaarheid	Hoog op industriële schaal, lage locatieprecisie	Hoog potentieel in gebouwde omgeving
Activatie	Markt-gebaseerd	Directe en/of geautomatiseerde sturing

Tabel 3: Vergelijking tussen flexibiliteit via GOPACS en hybride warmtepompen

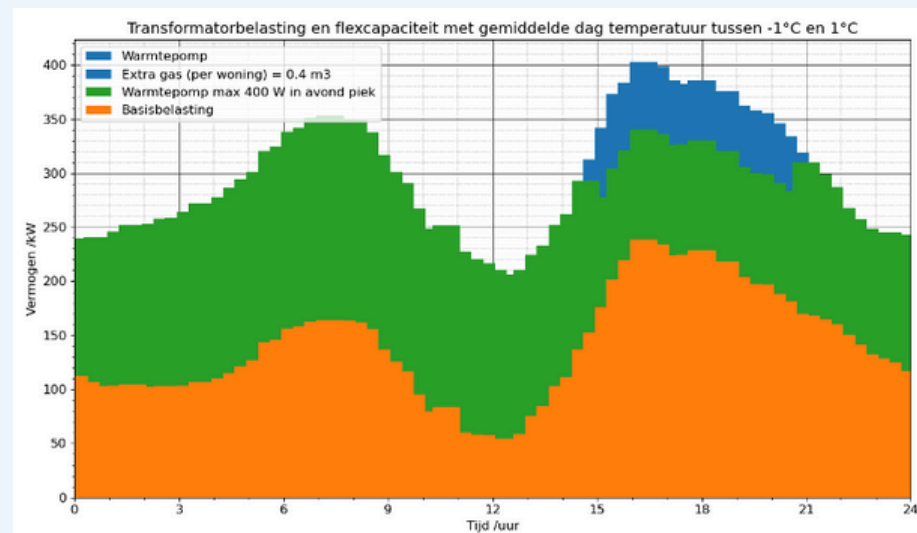
Figuur 21 toont een gesimuleerd aansturingsscenario voor een koude dag, uitgaande van een hypothetische situatie waarin alle woningen in de wijk zijn uitgerust met een hybride warmtepomp. In dit netbeschermingsscenario worden de warmtepompen gedurende de namiddag en het begin van de avond volledig uitgeschakeld. De simulatie laat zien dat het gasverbruik hierdoor toeneemt tot gemiddeld circa 1,2 m³ per huishouden op een koude dag. Hoewel deze maatregel effectief is in het reduceren van de elektrische belasting, blijkt zij relatief zwaar, aangezien in dit scenario nog voldoende beschikbare capaciteit op de wijktransformator aanwezig is.

Figuur 22 presenteert daarom een alternatief sturingsscenario waarin de warmtepompen niet volledig worden uitgeschakeld, maar via vermogensbegrenzing worden aangestuurd. In dit scenario wordt het elektrisch vermogen van de warmtepompen in de avonduren gemaximeerd op 400 W, terwijl de resterende warmtevraag door de gasketel wordt geleverd. Uit de simulatie blijkt dat het extra gasverbruik in dit geval gemiddeld beperkt blijft tot circa 0,4 m³ per huishouden op een koude dag. Met deze vorm van begrensde aansturing kan voldoende netcapaciteit worden vrijgespeeld, terwijl het additionele gasverbruik en de impact op de energie-efficiëntie tot een minimum worden beperkt.

De combinatie van de economische analyse en de praktijk- en simulatieresultaten laat zien dat sturing van hybride warmtepompen niet alleen technisch uitvoerbaar is, maar ook financieel aantrekkelijk en maatschappelijk doelmatig. De belangrijkste uitdaging voor verdere toepassing ligt in het zorgvuldig afstemmen van marktprikkels en technische capaciteitssturing, zodat flexibiliteit op een gecontroleerde, efficiënte en schaalbare wijze kan worden ingezet binnen de gebouwde omgeving.



Figuur 21: Gesimuleerd netbeschermingsscenario met volledige uitschakeling van hybride warmtepompen op een koude dag



Figuur 22: Gesimuleerd sturingsscenario met vermogensbegrenzing van hybride warmtepompen op een koude dag

3.3.5. Deelvraag 4

Welke incentive is nodig om een kritische massa huishoudens te creëren waarmee (lokale) congestie significant verminderd kan worden? En is dat haalbaar?

Figuur 23 geeft een schematische weergave van het werkingsprincipe van slimme aansturing van hybride warmtepompen zoals toegepast binnen DACS-HW. In deze aanpak worden bewonersvoorkeuren, meetgegevens van slimme meters, weersinformatie en de beschikbare netcapaciteit gecombineerd om warmtepompen collectief en netbewust aan te sturen, met behoud van comfort voor de eindgebruiker. Dit werkingsprincipe vormt de basis voor de in dit project onderzochte sturingsstrategieën en is bepalend voor de mate van acceptatie onder bewoners.

Deelnamebereidheid

De pilot binnen DACS-HW heeft laten zien dat het mogelijk is om een substantieel aantal huishoudens te betrekken bij collectieve aansturing van hybride warmtepompen, Van de benaderde particuliere woningeigenaren (achter hetzelfde transformatorhuisje) nam uiteindelijk ongeveer een kwart deel aan het project. In combinatie met de deelname van huurwoningen via woningcorporatie Domesta kon daarmee de populatie deelnemers binnen DACS-HW worden gerealiseerd. Deze populatie bleek voldoende om collectieve effecten op wijkniveau te meten en sturingsstrategieën in de praktijk te testen.

Slimme aansturing van warmtepompen met behoud van comfort



Figuur 23: Werkingsprincipe van slimme aansturing van hybride warmtepompen met behoud van comfort

Motivatie van bewoners

De belangrijkste motivatie voor bewoners om deel te nemen aan het project was financiële compensatie. Binnen het project ontving men bij deelname een bijdrage uit het PAW-project in Dalen als ook levering van een hybride warmtepomp tegen kostprijs en betaalde installatie. Daarnaast speelden nieuwsgierigheid naar nieuwe technologie en de wens om bij te dragen aan verduurzaming een aanvullende rol. Voor de meeste deelnemers was deelname geen doel op zich, maar een afweging tussen verwachte baten en mogelijke nadelen.

Gebruikerservaring

Tijdens het project konden bewoners via een gebruikersapp (zie figuur 24) inzicht krijgen in het functioneren van hun warmtepomp en, indien gewenst, de aansturing tijdelijk pauzeren. In de praktijk werd van deze mogelijkheid nauwelijks gebruikgemaakt. Slechts een beperkt aantal deelnemers (15) heeft de pauzefunctie incidenteel gebruikt (in totaal 29 keer), veelal uit nieuwsgierigheid (12 keer).

De meeste bewoners merkten weinig van de aansturing en ervoeren geen verlies aan comfort. Dit bevestigt dat acceptatie goed mogelijk is wanneer de techniek betrouwbaar functioneert en de regeling geen merkbare impact heeft op de leefomgeving. De mogelijkheid om in te grijpen werd door bewoners vooral gewaardeerd als waarborg, en minder als een functie die in het dagelijks gebruik daadwerkelijk nodig was.



Figuur 24: Interface gebruikersapp

Transparante communicatie en lokale betrokkenheid

Tijdens DACS-HW is ook gebleken dat bewoners positief hebben gereageerd op de transparante communicatie en lokale betrokkenheid. De bewoners werden actief geïnformeerd via bijeenkomsten en digitale updates, wat bijdroeg aan vertrouwen in het project. De positieve houding van de deelnemers geeft aan dat kleinschalige sturing van installaties in woningen maatschappelijk uitvoerbaar is, mits de voordelen duidelijk en tastbaar zijn.

Uitdaging voor de toekomst

DACS-HW heeft laten zien dat het creëren van een kritische massa huishoudens haalbaar is, mits deelname gepaard gaat met een duidelijke en structurele incentive. Voor de toekomst ligt de uitdaging vooral in het creëren van structurele prikkels om deelname aantrekkelijker te maken. Dat kan door bewoners financieel te laten meeprofiteren van de flexibiliteitswaarde die hun installaties leveren, bijvoorbeeld via korting op de netaansluiting, deelnamevergoedingen of dynamische beloningsmechanismen binnen capaciteitskaders. Op die manier kan een kritische massa worden bereikt die nodig is om collectieve flexibiliteit op grotere schaal te ontsluiten en congestie structureel te verminderen.

3.3.6. Deelvraag 5

Op welke wijze kan congestie worden afgeroepen via GOPACS en door een CSP worden aangegaan? Hoe dient dit technisch en organisatorisch te worden ingericht?

Aanvankelijk had DACS-HW als doel om te onderzoeken of flexibiliteit uit hybride warmtepompen kon worden aangeboden via GOPACS, het landelijke marktplatform waarop netbeheerders congestiecapaciteit kunnen inkopen. Tijdens de uitvoering bleek echter dat deze benadering in de praktijk niet geschikt is voor het laagspanningsnet. De vereisten voor deelname aan GOPACS – zoals een minimale aggregatiecapaciteit van honderd kilowatt, realtime-aansturing, registratie als erkende marktpartij en aansprakelijkheid bij niet-levering – vormen hoge drempels voor kleine aggregaties van huishoudens. Zelfs bij een grote deelnamegraad is het technisch en organisatorisch lastig om aan alle voorwaarden te voldoen.

Bovendien is GOPACS primair ontworpen voor congestiemanagement op hogere spanningsniveaus (met name middenspanning), terwijl de uitdagingen die DACS-HW adresseerde zich juist afspelen in de fijnmazige laagspanningsinfrastructuur. De uitrol van aanstuurbare hybride warmtepompen vraagt om oplossingen die direct kunnen worden toegepast binnen wijken, zonder complexe marktprocedures of licentievereisten.

In plaats van deelname aan GOPACS is daarom binnen DACS-HW gewerkt met een alternatieve aanpak: het zogenoemde capaciteitskader. Hierbij wordt vooraf een maximaal toegestaan vermogen vastgesteld voor een specifieke wijk of groep apparaten. Dit kader fungeert als technisch sturingsmechanisme waarmee overbelasting wordt voorkomen, zonder dat sprake hoeft te zijn van markttransacties. De sturing kan zowel statisch zijn – op basis van vaste dagprofielen – als dynamisch, waarbij het beschikbare vermogen in realtime wordt aangepast aan de actuele netbelasting.

De gezamenlijke conclusie van de projectpartners is dat het capaciteitskader op dit moment de meest realistische en toekomstbestendige manier is om congestie in het laagspanningsnet te beheersen. GOPACS blijft relevant voor hogere netvlakken, maar voor wijkniveau is een direct technisch sturingsmechanisme noodzakelijk. De inzichten uit DACS-HW vormen daarmee een belangrijke bouwsteen voor verdere standaardisatie van vermogensbegrenzing in de gebouwde omgeving en voor de ontwikkeling van landelijke richtlijnen rond netbewuste sturing. Zie tabel 4 voor de belangrijkste verschillen tussen het capaciteitskader en een marktbenadering.

Kenmerk	Capaciteitskader	Marktbenadering (zoals GOPACS)
Toepasbaarheid LS-net	Zeer geschikt	Beperkt
Complexiteit	Laag	Hoog
Implementatiesnelheid	Snel (softwarematig)	Traag (contracten, licenties, platform)
Geschikt voor kleinschalige assets	Ja	Nee
Sturing op wijkniveau	Direct mogelijk	Alleen via aggregatie
Behoefte aan marktpartij	Ja	Ja (CSP vereist)
Kosten voor implementatie	Laag – per wijk schaalbaar	Hoog – markttoegang en operationele kosten
Verantwoordelijkheid	Fabrikant, HEMS(-partij) of beheerder van het apparaat	Aggregator of CSP

Tabel 4: kenmerken capaciteitskader vs. Marktbenadering.

Rol CSP Om als CSP-flexibiliteit te kunnen aanbieden via GOPACS moet aan een aantal voorwaarden worden voldaan. Deze omvatten onder meer registratie als erkende marktpartij (conform ENTSO-E vereisten), het kunnen aanbieden van minimale geaggregeerde flexibiliteitscapaciteit van circa 100 kW, de beschikbaarheid van infrastructuur voor realtime aansturing en monitoring, het dragen van aansprakelijkheid bij niet-leveren (zoals balansverstoringen) en het beheersen van ongewenste neveneffecten, waaronder reboundeffecten.

Deze vereisten vormen in de huidige praktijk een hoge toetredingsdrempel voor partijen op wijk- en huishoudniveau. Met name individuele bewoners, kleine installateurs en kleinschalige groepen van warmtepompen beschikken doorgaans niet over schaal, organisatiegraad en technische infrastructuur die benodigd zijn om hieraan te voldoen.

Daarbij komt dat de huidige flexibiliteitsvolumevereisten binnen GOPACS, met name in het laagspanningssegment (orde van grootte: 100 kW), in de praktijk moeilijk realiseerbaar zijn voor één afzonderlijke CSP. Dit geldt zelfs in situaties waarin wordt gefocust op netdelen met een relatief hoge penetratie van flexibele technologieën, zoals hybride warmtepompen. Hierdoor blijft een groot potentieel aan decentrale flexibiliteit vooralsnog buiten bereik van bestaande marktmechanismen.

3.4. Perspectief voor toepassing

De resultaten van DACS-HW laten zien dat collectieve aansturing van hybride warmtepompen technisch haalbaar is en perspectief biedt voor toepassing in de praktijk, met name als instrument voor het verminderen van belastingpieken op het laagspanningsnet. De pilot in Dalen heeft aangetoond dat hybride warmtepompen, wanneer zij gecoördineerd worden aangestuurd, een betekenisvolle bijdrage kunnen leveren aan congestievermindering op wijkniveau. Daarmee ontstaat een aanvullend en potentieel kosteneffectief alternatief voor (of aanvulling op) traditionele netverzwaring.

De in DACS-HW beproefde aanpak is in de kern overdraagbaar naar andere woonwijken, maar grootschalige toepassing vraagt nog om verdere ontwikkeling. De gebruikte aansturingketen, communicatieprotocollen en systeemarchitectuur zijn binnen het project functioneel gevalideerd, maar nog niet sectorbreed gestandaardiseerd. Daarbij is gebleken dat niet alleen de aansturing zelf, maar ook de beschikbaarheid en resolutie van meetdata van invloed is op de mate waarin effecten zichtbaar en bestuurbaar zijn. Op apparaatniveau, waar met hoge meetfrequenties wordt gemeten, kunnen dynamische effecten zoals snelle vermogensreducties en herstartpieken nauwkeurig worden gevolgd, terwijl deze op netniveau door lagere meetfrequenties minder scherp zichtbaar zijn.

Dit vraagt bij opschaling om bewuste keuzes in meet- en datainfrastructuur, passend bij het gewenste detailniveau van sturing en monitoring. Daarnaast is het onzeker in hoeverre hybride warmtepompen van andere fabrikanten op dit moment extern en uniform aanstuurbaar zijn. Ook ontbreekt een generiek, breed toepasbaar platform waarmee signalen van netbeheerders structureel kunnen worden vertaald naar aansturing van individuele assets. In DACS-HW is deze schakelfunctie projectmatig ingevuld, wat onderstreept dat verdere standaardisatie en institutionalisering noodzakelijk is voor structurele toepassing.

Naast deze technische randvoorwaarden spelen ook juridische en beleidsmatige aspecten een belangrijke rol bij toepassing op grotere schaal. De huidige wet- en regelgeving biedt netbeheerders slechts beperkte ruimte om op aansluitniveau actief te sturen. Voor structurele toepassing van capaciteitssturing is verdere verduidelijking en aanpassing van het juridisch kader noodzakelijk, onder meer ten aanzien van bevoegdheden, verantwoordelijkheden en aansprakelijkheid tussen netbeheerders, marktpartijen, fabrikanten en bewoners. Deze randvoorwaarden bepalen in belangrijke mate in hoeverre collectieve aansturing kan worden ingebed in reguliere netbeheerprocessen.

De ervaringen in Dalen laten daarnaast zien dat bewonersacceptatie geen belemmering vormt, zolang comfort behouden blijft en de werking van de aansturing transparant is.

Dit maakt toepassing in de gebouwde omgeving maatschappelijk uitvoerbaar. Tegelijkertijd blijkt dat structurele toepassing gebaat is bij passende prikkels. Wanneer bewoners financieel kunnen meeprofiten van de flexibiliteitswaarde die hun installatie levert, neemt de bereidheid tot deelname toe. Denk hierbij aan deelnamevergoedingen, kortingen binnen capaciteitskaders of andere vormen van financiële compensatie. Dergelijke mechanismen zijn geen voorwaarde voor technische werking, maar wel van belang voor duurzame opschaling.

DACS-HW laat zien dat collectieve aansturing van hybride warmtepompen een realistisch perspectief biedt voor toepassing binnen het laagspanningsnet, mits wordt voldaan aan een aantal randvoorwaarden. Verdere standaardisatie van de aansturingsketen, duidelijke juridische kaders en passende incentive-structuren zijn bepalend voor succesvolle opschaling. Onder deze voorwaarden kan flexibiliteit uit de gebouwde omgeving uitgroeien tot een structureel en betrouwbaar instrument binnen congestiemanagement en de bredere energietransitie.

Tegelijkertijd maakt DACS-HW duidelijk dat grootschalige toepassing niet vanzelfsprekend is en verdere ontwikkeling vereist. De in het project beproefde aansturingsketen is projectmatig gerealiseerd en nog niet sectorbreed gestandaardiseerd. Dit geldt zowel voor de communicatieprotocollen als voor de functionele inrichting van de keten tussen netbeheerder, aansturingsplatform en individuele assets.

Bovendien beschikken op dit moment niet alle warmtepompfabrikanten over installaties die extern en uniform kunnen worden aangestuurd. Verdere harmonisatie en doorontwikkeling zijn daarmee noodzakelijke voorwaarden voor brede en merk-onafhankelijke opschaling.

Daarnaast ontbreekt op dit moment een generiek toepasbaar platform waarop signalen van netbeheerders structureel kunnen worden vertaald naar aansturing van assets op laagspanningsniveau. In DACS-HW is deze schakelfunctie projectmatig ingevuld, maar voor structurele toepassing is verdere ontwikkeling nodig, zowel technisch als organisatorisch. Dit onderstreept dat toepassing op laagspanningsniveau andere eisen stelt dan bestaande marktmechanismen voor congestiemanagement op hogere netniveaus.

De ervaringen in Dalen laten daarnaast zien dat bewonersacceptatie geen beperkende factor hoeft te zijn, mits comfort behouden blijft en de werking van de aansturing transparant is. Dit maakt toepassing in uiteenlopende wijken en woonvormen maatschappelijk uitvoerbaar. Tegelijkertijd is gebleken dat toepassing altijd maatwerk blijft en afhankelijk is van lokale omstandigheden, zoals netopbouw, de aanwezigheid van andere flexibele assets (bijvoorbeeld elektrische voertuigen of thuisbatterijen), alternatieve warmtevoorzieningen en de mate van organisatiegraad in een wijk.

3.5. Doelgroep

De resultaten van DACS-HW zijn relevant voor meerdere doelgroepen die ieder een eigen rol vervullen in de toepassing en opschaling van collectieve aansturing van hybride warmtepompen. In dit hoofdstuk wordt per doelgroep toegelicht welke betekenis de resultaten van DACS-HW hebben en hoe zij kunnen bijdragen aan verdere implementatie. Door samenwerking tussen deze doelgroepen kan collectieve flexibiliteit op wijkniveau worden opgeschaald tot een robuust onderdeel van het nationale energiesysteem.

Netbeheerders

Voor netbeheerders laat DACS-HW zien dat collectieve aansturing van hybride warmtepompen een effectief aanvullend instrument kan zijn om de belasting van het laagspanningsnet te beheersen. Door het toepassen van capaciteitskaders of vermogensbegrenzing kan de beschikbare netcapaciteit beter worden benut, waardoor piekbelasting wordt verminderd en netverzwaring kan worden uitgesteld. De pilotresultaten tonen aan dat deze vorm van sturing technisch uitvoerbaar is en operationeel beheersbaar blijft binnen een wijkcontext. Daarmee biedt DACS-HW netbeheerders concrete handvatten om flexibiliteit uit de gebouwde omgeving gericht te benutten.

Fabrikanten van hybride warmtepompen

Voor fabrikanten van hybride warmtepompen onderstreept DACS-HW het belang van aanstuurbaarheid en interoperabiliteit van installaties. Hoewel binnen het project geen open standaard is ontwikkeld, is wel aangetoond dat hybride warmtepompen technisch geschikt zijn voor collectieve en netbewuste aansturing. Dit benadrukt het belang van productontwikkeling waarin rekening wordt gehouden met externe aansturing, vermogensbegrenzing en gegevensuitwisseling. Fabrikanten kunnen deze inzichten benutten bij de doorontwikkeling van toekomstige productgeneraties.

Aggregators

Voor aggregators laat DACS-HW zien dat flexibiliteit op wijk- en huishoudniveau andere eisen stelt dan marktgebaseerde congestiediensten op hogere netniveaus. De huidige vereisten voor CSP's, zoals minimale flexibiliteitsvolumes en marktverantwoordelijkheden, vormen in de praktijk een hoge drempel voor toepassing op laagspanningsniveau. Hierdoor blijft een groot deel van de beschikbare flexibiliteit bij kleinverbruikers buiten bereik van bestaande marktmechanismen. DACS-HW maakt duidelijk dat het handelingsperspectief voor aggregators op laagspanningsniveau vooral ligt in een uitvoerende en coördinerende rol binnen netgerichte sturingsconcepten, zoals capaciteitskaders en directe aansturing in samenwerking met de netbeheerder, in plaats van een zuiver marktgebaseerde rol via platforms als GOPACS.

Bewoners en huiseigenaren

Voor bewoners en huiseigenaren biedt DACS-HW een laagdrempelig handelingsperspectief om bij te dragen aan een stabielere en toekomstbestendig energiesysteem. De pilot in Dalen laat zien dat deelname aan collectieve aansturing breed acceptabel is, zolang het wooncomfort behouden blijft en de werking van de sturing transparant is. Bewoners merken weinig van de aansturing en ervaren geen verlies aan comfort. Dit maakt duidelijk dat maatschappelijke acceptatie geen belemmering vormt wanneer de techniek betrouwbaar functioneert en bewoners voldoende inzicht en keuzevrijheid ervaren.

3.6. Geleerde lessen

Bij grootschalige innovatieprojecten is het gebruikelijk dat er gedurende de uitvoering van het project diverse knelpunten ontstaan. DACS-HW was hier geen uitzondering op. Dankzij de duidelijke projectstructuur (zie H4.1) en de intensieve samenwerking binnen het consortium konden de kritieke knelpunten tijdig worden gesignaleerd en opgevolgd. Waar nodig zijn maatregelen genomen om voortgang en de kwaliteit van het project te waarborgen.

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste geleerde lessen uit DACS-HW gepresenteerd, onderverdeeld in technische en organisatorische aspecten. De nadruk ligt nadrukkelijk niet op het benoemen van de knelpunten op zichzelf, maar op de inzichten die zijn opgedaan en de wijze waarop hiermee is omgegaan. Deze lessen bieden richting voor toekomstige projecten die zich richten op collectieve aansturing van energie-assets, congestiemanagement op laagspanningsniveau en de bijbehorende datacommunicatie.

Door de opgedane ervaringen expliciet te maken, draagt dit hoofdstuk bij aan het verder professionaliseren en opschalen van vergelijkbare initiatieven, met als doel een efficiëntere, robuustere en beter voorspelbare uitvoering van volgende generaties innovatieprojecten.

Technische aspecten

De uitvoering van DACS-HW heeft waardevolle technische inzichten opgeleverd over het ontwerpen, implementeren en testen van collectieve aansturing van hybride warmtepompen. Deze lessen hebben betrekking op de volledige keten, van apparaatniveau tot dataverwerking en systeemintegratie, en zijn relevant voor toekomstige grootschalige toepassingen.

Belang van robuuste end-to-end testen

In de latere projectfase lag de nadruk op het testen en valideren van de volledige aansturingsketen onder realistische omstandigheden. Hierbij is duidelijk geworden dat end-to-end testen over langere perioden noodzakelijk is om het gedrag van systemen in samenhang goed te begrijpen. Het doorlopen van meerdere scenario's, waaronder vaste vermogenskaders, noodsturing en dynamische aansturing, heeft bijgedragen aan inzicht in de onderlinge afhankelijkheden tussen netbelasting, platformlogica en apparaatgedrag. De ervaring leert dat voldoende tijd en ruimte voor iteratieve tests cruciaal zijn om complexe ketens betrouwbaar operationeel te krijgen.

Datakwaliteit als randvoorwaarde voor analyse en sturing

Ook op het gebied van dataverzameling zijn belangrijke lessen geleerd. Ruwe meetdata bevat in de praktijk onregelmatigheden en uitschieters, die zonder aanvullende verwerking kunnen leiden tot vertekende analyses of onjuiste conclusies. Binnen DACS-HW is gebleken dat systematische opschoning, validatie en continue monitoring van datastromen noodzakelijk is om tot representatieve en wetenschappelijk bruikbare datasets te komen. Deze ervaring onderstreept dat datakwaliteit geen vanzelfsprekendheid is, maar een actief te managen onderdeel van het systeemontwerp vormt.

Heldere samenwerking in de keten

Tot slot heeft het project duidelijk gemaakt dat heldere afbakening van verantwoordelijkheden en goed gedefinieerde samenwerking tussen ketenpartijen essentieel zijn. Technische projectpartners kwamen wekelijks bij elkaar, voor snelle besluitvorming en vroegtijdige bijsturing. Deze manier van samenwerken bleek een belangrijke succesfactor voor het tijdig oplossen van technische vraagstukken en het borgen van samenhang in de aansturingsketen.

Doorwerking naar vervolgpiloten

De opgedane technische lessen worden actief meegenomen in vervolginiciatieven, waaronder de EKKO-pilot van TNO en Intergas. Hierin wordt voortgebouwd op de inzichten uit DACS-HW om collectieve aansturing van hybride warmtepompen verder te verfijnen, met expliciete aandacht voor schaalbaarheid, robuustheid en datakwaliteit.

Organisatorische aspecten

Naast de technische inzichten heeft DACS-HW belangrijke organisatorische lessen opgeleverd over het uitvoeren van complexe, meerjarige innovatieprojecten met meerdere publieke en private partners. Deze lessen hebben met name betrekking op personele inzet, samenwerking in de keten en projectmatige afstemming.

Tijdige borging van kennis en capaciteit

Een eerste organisatorische les betreft het borgen van voldoende inhoudelijke capaciteit over de gehele projectduur. DACS-HW laat zien dat onderzoeks- en ontwikkelactiviteiten kwetsbaar kunnen zijn wanneer zij sterk afhankelijk zijn van individuele functies of posities. Het project heeft laten zien dat het organiseren van inhoudelijke back-up, bijvoorbeeld door tijdelijke herverdeling van werkzaamheden binnen een organisatie, bijdraagt aan continuïteit en voorkomt dat voortgang volledig stilvalt. Voor toekomstige projecten is het raadzaam om expliciet rekening te houden met personele doorlooptijden en om alternatieve inzet vooraf te organiseren.

Flexibiliteit in uitvoeringscapaciteit

Ook aan de uitvoerende kant zijn waardevolle lessen geleerd. De installatie van hybride warmtepompen bleek sterk afhankelijk van de beschikbare capaciteit bij installatiebedrijven. DACS-HW heeft aangetoond dat het werken met meerdere uitvoeringspartners en het behouden van flexibiliteit in de planning essentieel is om voortgang te waarborgen in een krappe arbeidsmarkt. Intensieve communicatie en regelmatige afstemming met uitvoerende partijen bleken cruciaal om knelpunten tijdig te signaleren en pragmatisch op te lossen.

Coördinatie bij complexe testfasen

In de latere projectfasen werd duidelijk dat het uitvoeren van testscenario's met meerdere configuraties en betrokken partijen meer coördinatie vraagt dan in de ontwerpfase vaak wordt voorzien. DACS-HW laat zien dat expliciete aandacht voor regievoering, duidelijke rolverdeling en vaste overlegstructuren noodzakelijk is om complexe ketentesten beheersbaar te houden. Structureel overleg tussen technische partners droeg bij aan snellere besluitvorming, betere informatie-uitwisseling en een gedeeld begrip van prioriteiten.

Samenwerking als succesfactor

Een overkoepelende organisatorische les is het belang van een hechte en transparante samenwerking binnen een consortium. Door korte communicatielijnen, frequente afstemming en een gezamenlijke focus op het projectdoel konden organisatorische vraagstukken worden omgezet in leerervaringen. Deze manier van samenwerken heeft niet alleen bijgedragen aan een succesvolle afronding van DACS-HW, maar vormt ook een waardevol samenwerkingsmodel voor toekomstige publiek-private innovatieprojecten.

Samenvattend

DACS-HW heeft laten zien dat zowel technische als organisatorische aspecten bepalend zijn voor het succes van grootschalige innovatieprojecten in de energietransitie. De opgedane lessons learned benadrukken het belang van flexibiliteit in personele inzet, robuuste samenwerkingsstructuren en expliciete aandacht voor ketenregie. Door deze inzichten expliciet mee te nemen, ontstaat een stevig fundament voor vervolgprojecten en voor de verdere opschaling van collectieve aansturing van hybride warmtepompen binnen de gebouwde omgeving.

4. Bijdrage aan doelstelling regeling

Het project DACS-HW heeft direct bijgedragen aan de doelstellingen van de MOOI-regeling, in het bijzonder aan Missie B – Gebouwde Omgeving, innovatiethema 2: duurzame collectieve warmtevoorziening op basis van volledig elektrische of hybride systemen. Binnen het project is aangetoond dat hybride warmtepompen op wijkniveau collectief kunnen worden aangestuurd, waardoor de belasting op het laagspanningsnet afneemt en congestie potentieel kan worden voorkomen.

Daarmee is een belangrijke stap gezet in het toekomstbestendig elektrificeren van de warmtevoorziening zonder dat grootschalige netverzwaring noodzakelijk is.

Daarnaast heeft het project bijgedragen aan Missie A – Elektriciteit, thema 4, door flexibiliteit uit kleinverbruikers technisch en organisatorisch te ontsluiten. De ontwikkeling van een open, uniforme standaard voor aansturing maakt opschaling door verschillende fabrikanten en marktpartijen mogelijk.

De resultaten van DACS-HW dragen concreet bij aan de subdoelen van de MOOI-regeling:

- **Betaalbaarheid:** vermeden of uitgestelde investeringen in netverzwaring en meer keuzevrijheid voor bewoners door nieuwe marktprikkels.
- **Leveringszekerheid:** bewezen reductie van piekbelasting op LS-niveau door collectieve aansturing.
- **Schoon en duurzaam:** efficiënter gebruik van warmtepompen, lagere CO₂-uitstoot en meer ruimte voor duurzame elektriciteits- en warmtesystemen.
- **Veiligheid:** toepassing van privacy-by-design en open standaarden voor veilige, transparante dataverwerking.

Met de succesvolle uitvoering van de pilot in Dalen is DACS-HW uitgegroeid tot een concreet voorbeeld van hoe flexibiliteit uit de gebouwde omgeving kan bijdragen aan een betrouwbaar, betaalbaar en duurzaam energiesysteem.

5. Spin-off binnen en buiten de sector

Tijdens het project DACS-HW is aandacht besteed aan het faciliteren van draagvlak van hybride warmtepompen en het voorkomen van congestie op het laagspanningsnet. Door technische innovatie te combineren met samenwerking tussen bewoners, netbeheerders en technologiebedrijven levert het project waardevolle kennis op over de praktische haalbaarheid van slimme aansturing en lokale flexibiliteit in de gebouwde omgeving.

Voortgang en positionering

Tijdens de uitvoering van DACS-HW is duidelijke vooruitgang te zien. In 2023 is het project van start gegaan met de eerste 33 aangesloten hybride warmtepompen, deze fase richtte zich op het testen van de technische werking, dataverzameling en de samenwerking tussen de betrokken partijen. In de loop van 2024 is het aantal deelnemers uitgebreid naar bijna 100 huishoudens. Met deze groep huishoudens zijn realistische praktijktesten uitgevoerd voor de werking van slimme aansturing op wijkniveau.

Tijdens meerdere bewonersbijeenkomsten, georganiseerd in samenwerking met SamenDalen, zijn bewoners actief geïnformeerd over de voortgang, resultaten en vervolgstappen. Deze bijeenkomsten droegen bij aan vertrouwen en betrokkenheid onder de deelnemende bewoners.

Ook binnen de energiesector kreeg het project brede erkenning. Tijdens bijeenkomsten zoals de Kennisbijeenkomst Netcongestie van de Vereniging Warmtepompen werd DACS-HW gepresenteerd als voorbeeld van innovatieve netontlasting via hybride warmtepompen. Zowel het Landelijk Actieprogramma Netcongestie, TKI Urban Energy als Techniek Nederland hebben het project genoemd als relevante casus binnen de warmtetransitie.

Spin-off en vervolgininitiatieven

De opgedane kennis en ervaringen hebben geleid tot meerdere vervolgininitiatieven binnen én buiten de sector:

- **Open-standaardenontwikkeling via ElaadNL**

De resultaten van DACS-HW vormden input voor een vervolgproject binnen stichting ElaadNL, gericht op de doorontwikkeling van een open source-taal voor het slim aansturen van meerdere technologieën. Deze standaarden worden nu doorontwikkeld voor toepassingen met batterijen, hybride warmtepompen, laadpalen voor elektrische voertuigen en andere flexibele apparaten, waardoor interoperabiliteit binnen de keten wordt verbeterd. Ook DACS-HW projectpartner Inversable vervult hier een actieve rol in, door de implementatie van het S2-protocol.

- **Toepassing in nieuwbouwprojecten door Enexis**

Enexis past de inzichten rond vermogensbegrenzing en flexibele aansturing inmiddels breder toe. Samen met Heijmans is een project uitgevoerd in nieuwbouwwijken waarbij vermogenskaders op gebouwniveau worden vastgesteld. De leerervaringen uit DACS-HW (zoals het effect van vermogenslimieten en het belang van vroegtijdige afstemming in de keten) dragen direct bij aan deze nieuwe aanpak.

- **Doorontwikkeling van warmtepompaansturing (EKOO-pilot)**

Daarnaast zijn de lessen uit de pilot benut in de EKOO-pilot van TNO en Intergas, waarin de collectieve en individuele aansturing van hybride warmtepompen verder wordt verfijnd.

Met deze spin-off laat DACS-HW zien dat pilotprojecten niet alleen lokale waarde creëren, maar ook direct bijdragen aan landelijke innovatietrajecten en nieuwe praktijktoepassingen binnen zowel de bestaande gebouwde omgeving als nieuwbouw.

Communicatie en kennisdeling

Gedurende uitvoering van het project is DACS-HW een relevant gespreksonderwerp gebleken binnen de warmetransitie voor de gebouwde omgeving. Via de communicatiekanalen van de projectpartners, zoals LinkedIn, zijn regelmatig updates gedeeld die hebben geleid tot kennisuitwisseling over de toepasbaarheid van het project. In 2025 werd de communicatiecampagne ‘De Slimste Buurt’ gelanceerd (zie ook H6). Deze campagne was bedoeld om de opgedane kennis breed te delen met burgers, beleidmakers, netbeheerders en technologieontwikkelaars. De campagne is afgesloten met een publiek eindevenement waar de belangrijkste conclusies en aanbevelingen zijn gepresenteerd. De opgebouwde kennis en samenwerking bieden aanknopingspunten voor verdere toepassing van slimme aansturingconcepten in praktijken, binnen en buiten de energiesector

Potentie buiten de energiesector

Hoewel DACS-HW primair is ontwikkeld binnen de context van de energietransitie, reiken de inzichten en resultaten verder dan de energiesector. De opgedane kennis over data-gedreven sturing, lokaal eigenaarschap en de samenwerking met bewoners biedt ook aanknopingspunten voor andere maatschappelijke onderwerpen waarin flexibiliteit, gedrag en technologie samenkomen. Denk bijvoorbeeld aan toepassingen binnen gebouwbeheer of mobiliteitsnetwerken.

DACS-HW laat zien dat nauwesamenwerking met bewoners cruciaal is om draagvlak te creëren voor technologische vernieuwing. Door bewoners actief te betrekken bij de uitvoering van het project is niet alleen begrip maar ook acceptatie ontstaan waardoor sterke bereidheid om deel te nemen aan maatschappelijke projecten ontstaat.

Call-to-action

Om de in DACS-HW ontwikkelde aanpak succesvol op te schalen, is verdere standaardisatie van de aansturingsketen essentieel. Met name een eenduidige en open communicatie tussen netbeheerder en aggregator (bijvoorbeeld via OpenADR) en tussen aggregator en apparaten (bijvoorbeeld via standaarden zoals S2) is een noodzakelijke randvoorwaarde voor brede toepassing.

Daarbij is het van belang dat marktpartijen actief worden gestimuleerd en gefaciliteerd om gezamenlijk toe te werken naar breed gedragen standaarden die zijn verankerd in beleid en regelgeving. Deze standaardisatie moet zich niet uitsluitend richten op één type flexibel asset, zoals hybride warmtepompen, maar op een bredere set van technologieën, waaronder thuisbatterijen en laadinfrastructuur voor elektrische voertuigen. Alleen door deze integrale benadering kan flexibiliteit in de gebouwde omgeving op een schaalbare, interoperabele en toekomstbestendige manier worden ontsloten.

6. Kennisdisseminatie

Tijdens de uitvoering van DACS-HW is veel aandacht besteed aan het delen van kennis, ervaringen en inzichten met zowel professionals, beleidsmakers en bewoners. Dit gebeurde o.a. via wetenschappelijke publicaties en publieksgerichte communicatiemiddelen. Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de belangrijkste uitingen.

Wetenschappelijke publicaties

Er zijn twee wetenschappelijke publicaties verschenen op basis van het project DACS-HW.

Li, X., Markus, J. J., de Lange, S., Jin, L., Kok, K., & Paterakis, N. G. (2025, July). Hybrid Heat Pump Flexibility Allocation: Quantified Thermal Comfort-Based Congestion Management. In 2025 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2025 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe) (pp. 1-6). IEEE.

Jin, L., Li, X., de Lange, S., Sloopweg, H., & Paterakis, N. G. (2024 October). Response allocation of domestic hybrid heat pumps flexibility for congestion management. In 2024 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe) (pp. 1-5). IEEE.

Daarnaast zijn twee wetenschappelijke papers die op het moment van schrijven nog niet gepubliceerd zijn.

Li, X., Zhang, H., Kok, K., & Paterakis, N. G. "Flexibility Estimation of Hybrid Heat Pumps based on Grey-Box Model Identification." IEEE PES ISGT Asia, 2025.(in press)

Li, X., Zhan, S., Zhang, H., Kok, K., & Paterakis, N. G. "A Privacy-Preserving Distributed Congestion Management Framework via Implicit Differentiation Bilevel Optimization." Electric Power Systems Research, 2025. (in review)

Audiovisuele publicaties

Gedurende het project is er audiovisueel materiaal (zie ook hoofdstuk 5) ontwikkeld om het proces en de resultaten inzichtelijk te maken voor een breder publiek. Dit materiaal bestaat uit een podcastserie en een mini-documentaire.

Podcast DACS-HW

Er is een podcastserie gemaakt die het project volgt van idee tot uitvoering. De serie bestaat uit vijf afleveringen:

1. Het idee en het samenstellen van het team
2. Bewonersparticipatie
3. Uitvoering van het project
4. Data en resultaten
5. Visie en tastbare producten
6. De afleveringen zijn te beluisteren via Spotify.

Mini-documentaire

Tijdens het project is een mini-documentaire gemaakt om een beter beeld te geven over de activiteiten van het project en de betrokken partijen. Daarnaast worden de ervaringen van bewoners besproken. Deze mini-documentaire is via [deze link](#) te bekijken.

DACS-HW is ook onderwerp van gesprek geweest in de Podcast Heat Pump Talks. In deze podcastserie bespreekt Louis Visser (vanuit Intergas) het project DACS-HW. De focus van deze podcastserie ligt op het aansturen van 100 hybride warmtepompen om het elektriciteitsnet te ondersteunen. Daarbij wordt aandacht besteed aan de inzichten die opgedaan zijn tijdens het project en hoe innovatie en samenwerking bijdragen aan de ontwikkeling van duurzame oplossingen.

De Technische Universiteit Eindhoven heeft een workshop georganiseerd over congestiemanagement. Tijdens deze workshop is DACS-HW gepresenteerd, voor vertegenwoordigers uit zowel het bedrijfsleven als uit het onderzoek. De website van deze workshop is te vinden via deze [link](#).

Klik hier voor de link naar de podcast:



Inhoudelijke publicaties

Bouwwereld.nl

Op de website van BouwWereld verscheen een webinar waarin het DACS-HW project wordt toegelicht als praktijkvoorbeeld van hoe slimme aansturing van hybride warmtepompen kan bijdragen aan het verminderen van netcongestie.

Algemeen Dagblad (AD)

Het Algemeen Dagblad publiceerde een [nieuwsartikel](#) over het DACS-HW-project, waarin wordt bericht over een succesvolle proef met op afstand aangestuurde hybride warmtepompen. De resultaten laten zien dat het spitsverbruik van elektriciteit met circa een kwart kan worden verminderd, wat bijdraagt aan het verminderen van netcongestie.

BouwMagazine

In juli 2025 verscheen er een interview in BouwMagazine over het DACS-HW project, waarin Intergas laat zien hoe slimme aansturing van 100 hybride warmtepompen zorgt voor minder gasverbruik en helpt netcongestie te voorkomen.

Duurzaam Ondernemen

Op de website van Duurzaam Ondernemen verscheen een [artikel](#) over het DACS-HW-project, waarin onderzoeksresultaten laten zien hoe slimme aansturing van hybride warmtepompen kan bijdragen aan het voorkomen van netcongestie.

Netbeheer Nederland

Netbeheer Nederland publiceerde een [artikel](#) over het DACS-HW-project, waarin wordt beschreven hoe slimme aansturing van hybride warmtepompen in de pilot bijdraagt aan het verminderen van piekbelasting op het elektriciteitsnet en het voorkomen van netcongestie.

Energieia

Energieplatform Energieia publiceerde een [artikel](#) over het DACS-HW-project, waarin wordt ingegaan op hoe slimme aansturing van hybride warmtepompen piekbelasting op het elektriciteitsnet kan afvlakken. Daarbij wordt benadrukt dat opschaling van deze aanpak regie en samenwerking tussen marktpartijen en netbeheerders vraagt.

Persbericht

Na het eindevenement is een persbericht gepubliceerd. Deze is onder andere te vinden via deze [link](#).

Installatie.nl

Installatie.nl publiceerde een [artikel](#) over het DACS-HW-project, waarin wordt toegelicht dat hybride warmtepompen bij slimme aansturing geen netcongestie veroorzaken en juist kunnen bijdragen aan een stabiel elektriciteitsnet.

7. Slotwoord

Met het DACS-HW-project is waardevolle kennis opgedaan over de mogelijkheden om netcongestie op wijkniveau te voorkomen door middel van slimme, gezamenlijke aansturing van hybride warmtepompen. In een realistische praktijksituatie is onderzocht hoe flexibiliteit in warmtevoorziening kan bijdragen aan een stabiel elektriciteitsnet, zonder dat dit ten koste gaat van het comfort van bewoners. De resultaten laten zien dat dergelijke oplossingen technisch haalbaar zijn en perspectief bieden voor toepassing in andere woonomgevingen.

Het project laat tevens zien dat de energietransitie vraagt om meer dan alleen technologische innovatie. Effectieve oplossingen ontstaan juist in de samenwerking tussen bewoners, marktpartijen, netbeheerders, kennisinstellingen en overheden. Het gezamenlijk optrekken, het delen van data en inzichten en het zorgvuldig afwegen van belangen blijken cruciale randvoorwaarden voor succes. DACS-HW heeft hiermee niet alleen technische inzichten opgeleverd, maar ook waardevolle lessen over samenwerking en opschaling.

De partners spreken hun grote waardering uit voor het ministerie van Economische Zaken en Klimaat en de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) voor de financiële ondersteuning die dit project mogelijk heeft gemaakt. Zonder deze subsidie hadden de betrokken partijen dit onderzoek in deze vorm en omvang niet kunnen uitvoeren. De ondersteuning heeft ruimte geboden om te experimenteren, te leren en gezamenlijk te werken aan oplossingen voor een maatschappelijk urgente opgave.

De inzichten uit DACS-HW vormen een stevige basis voor vervolgonderzoek, verdere doorontwikkeling en mogelijke toepassing in andere wijken en regio's. Het project draagt daarmee bij aan de bredere ambitie om de energietransitie op een betaalbare, betrouwbare en sociaal verantwoorde manier vorm te geven.

Voor meer informatie over dit project, de resultaten of de mogelijkheden voor vervolg of kennisdeling, kunt u contact opnemen via info@enablemi.com.

