

Leeghwaterstraat 44

2628 CA Delft

Postbus 6012

2600 JA Delft

www.tno.nl

TNO-rapport

TNO 2018 R10291

Haalbaarheidsonderzoek Load Management Energie op
Bedrijventerreinen

T +31 88 866 22 00

Casus: Gebied 11, Delft (TU-campus, Technopolis, Delftechpark)

Openbaar eindrapport.

Datum 16 maart 2018

Auteur(s) F.G.H. Koene (TNO)
Cor Kleinveld (SWECO)
Adriaan Brebels (Porta Capena)

RVO Ref.nr. TES1216095

Project titel Haalbaarheidsonderzoek LoadManagement Energie op Bedrijventerreinen. Casus:
Gebied 11 (LEB)

Penvoerder TNO

Medeaanvragers SWECO (voorheen Grontmij), VVE Delftechpark

Projectperiode 01.09.2016 – 15.12.2017

Aantal pagina's 46 (incl. bijlagen)

Opdrachtgever RVO

Projectnaam Load Management Gebied 11

Projectnummer 060.24575

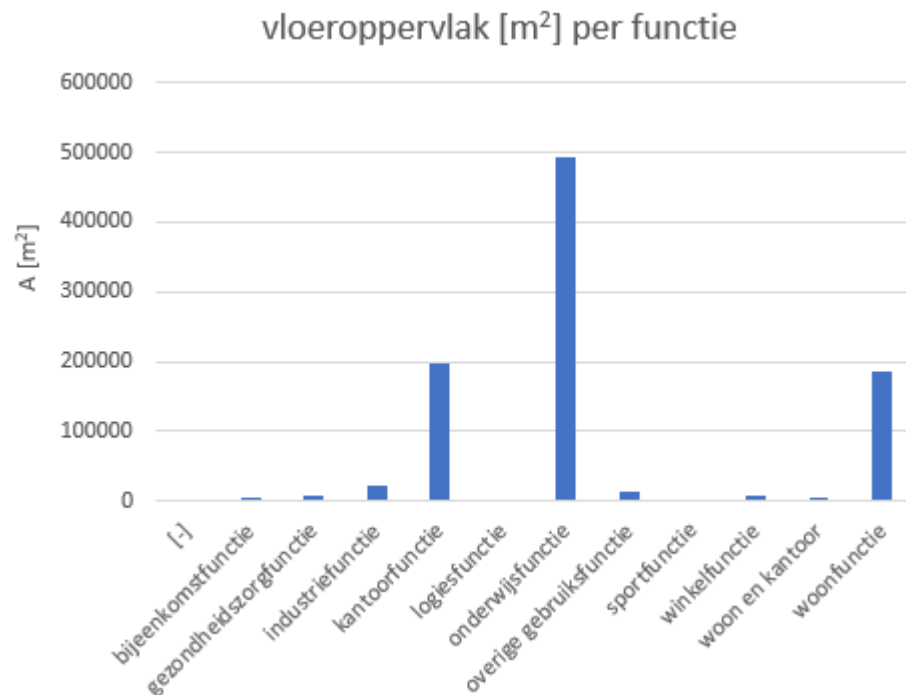
Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belang-hebbenden is toegestaan.

© 2018 TNO



Figuur 2 Functies van de gebouwen in Gebied 11 met bijbehorend totaal vloeroppervlak [m²]

Hieruit blijkt dat er drie veel voorkomende functies zijn: kantoorfunctie, onderwijsfunctie en woonfunctie. Gezien het doel van het project - vraag en aanbod van energie in bedrijventerreinen op elkaar afstemmen - zijn de gebouwen met een woonfunctie verder buiten beschouwing gebleven. Daarmee resteert een verzameling van 86 kantoorgebouwen en gebouwen met een onderwijsfunctie.

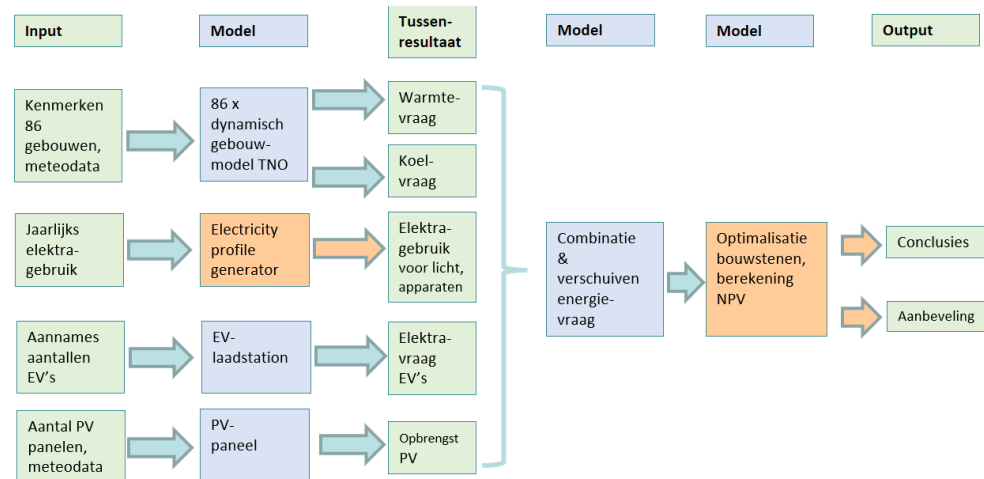
Om de analyse breder te trekken dan enkel de analyse van het huidige elektriciteitsgebruik, worden ook toekomstige ontwikkelingen meegenomen. Deze omvatten – naast een verwachte sterke toename van elektrisch vervoer – een verwachte elektrificatie van de energie-infrastructuur door het uitfaseren van aardgas.

De elektriciteitsvraag voor elk van de 86 gebouwen is bepaald door het sommeren van de elektriciteitsvraag voor:

1. Verwarming (via een warmtepomp)
2. Koeling (via een compressiekoelmachine)
3. Verlichting en apparatuur
4. Opladen van accu's van elektrische voertuigen (EV's)
5. Opbrengst van PV-panelen

Aanpak en modellen

Input van data, gebruikte modellen en output van data in het project zijn samengevat in Figuur 3. Blauwe modellen zijn door TNO gemaakt, oranje modellen door Porta Capena. Input data is grotendeels van SWECO afkomstig.



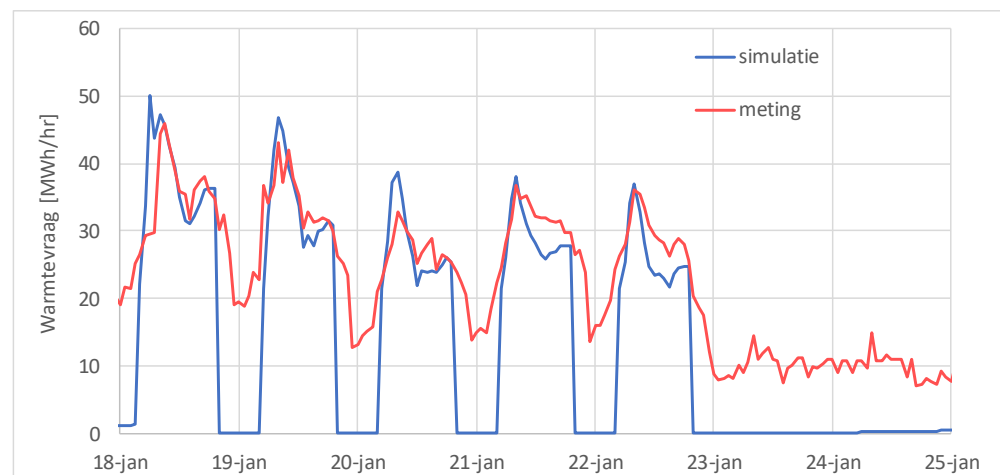
Figuur 3: Input van data, gebruikte modellen en output van data in het project.

Validatie vraagpatronen

Voor de analyse van de bestaande situatie (base case) is het belangrijk dat de vraagpatronen goed in kaart zijn gebracht. Met name indien het doel is om pieken in de elektriciteitsvraag te vermijden, is het cruciaal dat hoogte en de timing van de afzonderlijke bijdragen aan de elektriciteitsvraag correct zijn.

De warmtevraag van elk van de 86 gebouwen is met het gebouwmodel gesimuleerd en de geaggregeerde warmtevraag is vergeleken met de warmtevraag van een deel (ca. 75% van het BVO) van de TUD-gebouwen op de campus. Daarbij is verondersteld dat de gebouwen elk op een ander tijdstip beginnen met verwarmen, met een random trekking uit een interval van 2 uur rond het tijdstip van 5:00 uur 's ochtend van dinsdag-vrijdag en 4:00 uur op maandag.

Ter illustratie zijn in onderstaande figuur zijn de resultaten van de simulaties voor een week in januari 2016 vergeleken met de gemeten warmtevraag.



Figuur 4: Vergelijking tussen berekende geaggregeerde warmtevraag van de beschouwde 86 gebouwen en de gemeten warmtevraag van een deel van de TUD-gebouwen (gecorrigeerd voor BVO).

De hoogte en de positie van de berekende en gemeten pieken in de warmtevraag komen goed overeen, al kon de gemeten relatief hoge warmtelevering 's nachts en in het weekend niet worden verklaard met de aannames, i.h.b. ten aanzien van nachtverlaging en ventilatieregime.

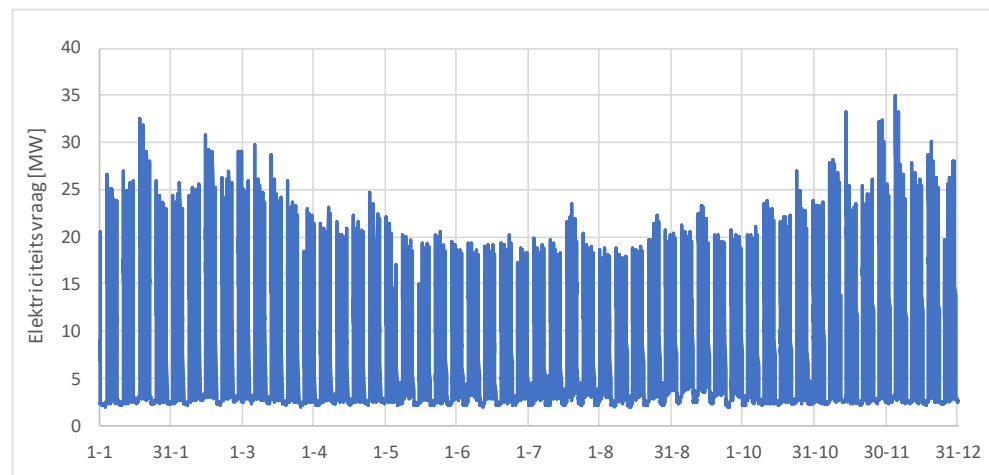
Voor de koelvraag zijn er geen uurlijkse waarden beschikbaar van elektragebruik voor koeling. Daarom is voor elk van de 86 gebouwen de jaarlijkse koelvraag berekend en vergeleken met waarden in de literatuur. De in de simulaties berekende koelvragen variëren tussen 0 en 25 kWh_{th}/m²/jr met een enkele uitschieter naar 40 kWh_{th}/m²/jr en lijken daarmee wat grootteorde betreft te kloppen.

De berekende tijdreeks voor verlichting en apparatuur van gebouw nr. 67 in Gebied 11 (zie Annex A) is vergeleken met de gemeten tijdreeks van het vergelijkbare NSI-gebouw in Ede. De berekende en gemeten tijdreeksen komen goed overeen.

De tijdreeksen van het laden van elektrische voertuigen zijn niet vergeleken met gemeten tijdreeksen omdat die niet voorhanden waren. De tijdreeks voor PV-panelen is recht evenredig met de zoninstraling, die uit de KNMI-database beschikbaar is. De jaarlijkse opbrengst komt uit op 156 kWh_e/m²/jr.

Resultaten bestaande situatie (systeemanalyse)

De totale elektriciteitsvraag van de 86 gebouwen bestaat uit de warmte- en koelvraag - omgezet naar een elektriciteitsvraag -, de compensatie van de ventilatieverliezen, elektriciteitsvraag door verlichting en apparatuur en voor het opladen van 4000 elektrische voertuigen. Uit Figuur 5 blijkt dat de hoogste (uurgemiddelde) pieken in het jaarlijkse elektriciteitsgebruik worden gevonden in het stookseizoen (november – maart).



Figuur 5 Uurgemiddelde elektriciteitsvraag van Gebied 11 in 2016

De elektriciteitsvraag is nader geanalyseerd voor een winterweek in januari en een zomerweek in juli, waar voorlopige conclusies uit zijn geformuleerd.

Optimalisatieconcepten

Er is vervolgens een aantal optimalisatieconcepten opgesteld om pieken in de elektriciteitsvraag te verlagen (te 'scheren'). Deze concepten bestaan uit een combinatie van de volgende bouwstenen:

1. Afstemmen warmtevraag. Dit voorkomt dat alle gebouwen 's ochtends in het stookseizoen tegelijk beginnen met verwarmen en voorkomt zo een piek in de warmtevraag 's ochtends.
2. Afstemmen koelvraag. Dit voorkomt dat alle gebouwen 's middags in de zomer tegelijk beginnen met koelen en voorkomt zo een piek in de warmtevraag 's middags.
3. Flexibele ventilatie. Door het tijdelijk verlagen van het ventilatiedebiet worden de elektriciteit voor de ventilatoren én de ventilatieverliezen verminderd. Dat laatste betekent dat de warmtepompen minder verliezen hoeven te compenseren om het gebouw op temperatuur te houden.
4. Slim opladen van elektrische voertuigen. Indien de voertuigen gelijk bij aankomst op vol vermogen worden geladen, geeft dat een forse ochtendpiek in de elektriciteitsvraag. De voertuigen later laden, wanneer de vraag van de overige gebruikers minder is, voorkomt of verlaagt de ochtendpieken.
5. Inzet van PV-panelen. De door de PV-panelen opgewekte elektriciteit kan worden benut om de van het net afgenomen elektriciteit te verminderen, liefst in tijden van vraagpieken.
6. Inzet van accu's. Deze kunnen elektriciteit van PV-panelen of uit het net (in tijden van lage vraag) bufferen en inzetten op momenten van piekvraag.
7. Power2Heat optimalisatie. Dit is een andere vorm van energiebuffering. Elektriciteit van PV-panelen die niet rechtstreeks kan worden benut kan worden omgezet in warmte ten behoeve van verwarming van gebouwen of het bereiden van een warm tapwater voorraad. Dit kan voordeliger zijn dan terug levering aan het net tegen een (te) lage elektriciteitsprijs.

Implementatie van deze bouwstenen kost geld. De financiële haalbaarheid van toepassing ervan hangt dus af van de mogelijke opbrengsten van piekscheren. Hiervoor is een aantal opties beschikbaar:

1. Verlaging contractvermogen (opbrengst à. € 1700 per kW per maand)
2. Vermijden van netverzwaring (opbrengst € 800,000 / 20 MW)
3. Gebruik van hoog en laag elektriciteitstarief
4. Flexibiliteit in vraag voor netstabilisatie
5. Handelen op de spotmarkt

Van deze lijst zijn enkel de eerste drie opties meegenomen. Voor de laatste twee is aanvullende informatie van de mogelijkheden en belemmeringen nodig, wat buiten het kader van deze opdracht valt.

Resultaten optimalisatieconcepten

Door het combineren van bouwstenen is een aantal optimalisatieconcepten samengesteld. Naast concepten bestaande uit een enkele bouwsteen zoals het toepassen van PV-panelen, accu's, flexibel ventileren en slim laden van elektrische voertuigen, is de financiële haalbaarheid van combinaties van bouwstenen berekend.

De verlaging van het piekvermogen en de bijhorende geldelijke besparingen zijn afgezet tegen de benodigde investeringen. De resultaten zijn samengevat in Tabel 1. Kolommen 2 en 3 tonen de concepten en het (jaarlijks) piekvermogen bij toepassing van elk concept, in het BAU (Business As Usual) scenario is dit 36,2 MW. Kolommen 4-7 geven de benodigde investeringen voor de toegepaste bouwstenen.

Kolom 8 geeft de Netto Contante Waarde (NCW) van investeringen en besparingen over een periode van 15 jaar, op basis van een discontovoet van 2% per jaar. In de concepten 1-7 (zwarte tekst) is de grootte van de bouwstenen geoptimaliseerd naar de hoogste NCW.

Tabel 1: Doorgerekende optimalisatieconcepten met verschillende combinaties van bouwstenen.

Nr.	Optimalisatieconcept	Piek- vermogen [MW]	Investering [k€]				NCW [k€]
			flex vent	slim laden	accu's	PV	
	BAU	36,2					
1	50.000 m ² PV	35,9	0	0	0	8.574	721
2	Slim laden	28,3	0	6.064	0	0	0 ¹
3	Slim laden + 60.000 m ² PV	28,3	0	6.064	0	10.286	781
4	Flexibel ventileren	31,7	3.975	0	0	0	0
5	Flexibel ventileren + 60.000 m ² PV	31,7	3.975	0	0	10.126	773
6	Flexibel ventileren + Slim laden	24,1	10.116		0	0	0
7	Flexibel ventileren + Slim laden + 60.000 m ² PV	24,1	10.116		0	10.251	779
8	Flexibel ventileren + Slim laden + 5MW accu's	24,1	10.116		1.786	0	-2.065
9	Flexibel ventileren + Slim laden + 17 MW accu's	24,1	10.116		6.001	0	-6.165
10	Flexibel ventileren +17 MW accu's	31,7	3.975	0	6.001	0	-6.169
11	Flexibel ventileren + 6MW accu's + 60.000k m ² PV	31,7	3.975	0	2.144	10.080	-1.534
12	Slim laden + 24 MW accu's	27,6	0	6064	8.501	0	-8.003
13	24 MW accu's	35,2	0	0	8.501	0	-8.003

¹ Voor de scenario's met flexibel ventileren en slim laden was er geen informatie over de benodigde investering. Er is daarom (terug)gerekend wat de maximale investering kon zijn om een NCW van nul op te leveren (we spelen dan quitte).

Conclusies

De resultaten geven aanleiding tot de volgende conclusies.

- Toepassen van PV-panelen is interessant met de huidige elektriciteitsprijzen en het huidige subsidieregime. De grote positieve invloed van de PV-business case vertroebelt enigszins de business case van de andere maatregelen als die met het toepassen van PV-panelen worden gecombineerd.
- Daarentegen is het toepassen van PV-panelen nauwelijks effectief om de hoogste piek in de jaarlijkse elektriciteitsvraag te verlagen omdat de opbrengst van de PV-panelen te laat op de dag komt om de ochtendpieken in de winter te kunnen verlagen.
- Afgezien van PV-panelen lijken flexibel ventileren van een gebouw en slimme laad-strategieën voor elektrische voertuigen de meest interessante manieren om pieken in elektriciteitsvraag te scheren. Om over een periode van 15 jaar hiermee winst te kunnen maken, zijn de maximale investeringen bij de huidige prijzen hiervoor respectievelijk ~4,0 M€ en 6,1 M€.
- Accu's zijn effectief in het reduceren van de pieken. Echter, de hiervoor bereikte verlaging van de pieken en bijbehorende kostenbesparingen (verlaging contractvermogen en vermijden netverzwaring) wegen bij de huidige prijzen niet op tegen de benodigde investering. De prijs van accu's zou minstens een factor 5 moeten zakken om in combinatie met slimme regelingen een positieve business case op te leveren.
- Inzet van accu's van EV's voor het opvangen van pieken in de elektriciteitsvraag (dus ook ontladen van die accu's) is in de huidige scenario's niet meegenomen omdat extra laad/ontlaad cycli de levensduur van de accu's verlagen. Echter, indien autofabrikanten een garantie afgeven voor de levensduur van een accu komt op die manier een grote accu-capaciteit gratis beschikbaar. Dit is niet verder onderzocht omdat het slim (ont)laden scenario daarmee aanzienlijk complexer wordt.
- Introductie van een systeem om de verwarmingen van de afzonderlijke gebouwen in de ochtend gespreid te starten teneinde de ochtendpieken te scheren heeft niet zoveel zin omdat dit momenteel in de praktijk al lijkt te gebeuren in Gebied 11. Echter, indien gebouwen wel (min of meer) op hetzelfde moment starten met verwarmen, zou dat een hoge piekvraag in de ochtend opleveren, die zeker de moeite van het scheren waard is.
- Spreiden van de koelvraag in de zomer om middagpieken te scheren heeft beperkt effect op de jaarpieken omdat de zomerpieken lager zijn dan de winterpieken.
- Voor een grondige analyse van de economische haalbaarheid van de concepten zouden echter ook andere financiële opbrengsten meegenomen moeten worden zoals de mogelijke bijsturing van de stabiliteit van het net en handel op de spotprijzenmarkt. Deze analyse valt echter buiten het kader van deze haalbaarheidsstudie.

Aanbevelingen

Aan de vereniging van Eigenaren bedrijventerrein Delftechpark, TU Delft campus, TNO, en Sweco kunnen de volgende aanbevelingen worden gedaan:

- Inzet van PV-panelen is vanuit financieel oogpunt een goede zet. Met de huidige elektriciteitsprijzen en het huidige subsidieregime is er zelfs geen optimum: hoe meer PV-panelen des te beter de business case.
- Inzet van accu's voor het bufferen van (onder meer) de met PV-panelen opgewekte elektriciteit wordt vanwege de prijs momenteel afgeraden.
- Toepassen van flexibel ventileren van een gebouw is een interessante manier om pieken in de elektriciteitsvraag te scheren. Om over een periode van 15 jaar hiermee winst te kunnen maken, zijn de maximale investeringen bij de huidige prijzen hiervoor ca.4 M€.
- Toepassen van slimme laad-strategieën voor elektrische voertuigen is eveneens een interessante manier om pieken in de elektriciteitsvraag te scheren. Voor een toekomstige situatie met 4000 EV's en 1000 laadpalen, zijn de maximale investeringen bij de huidige prijzen hiervoor ca. 6,1 M€.
- Zelfs indien wordt besloten niet te investeren in slimme laadstrategieën, wordt aanbevolen om de toe te passen laadpalen in elk geval 'smart enabled' te laten zijn, teneinde de mogelijkheid open te houden in de toekomst alsnog EV's slim te laden.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	12
2	Gebied 11.....	13
2.1	Afbakening	13
2.2	Base case	14
3	Aanpak en modellen.....	16
3.1	Warmtevraag (via een warmtepomp)	17
3.2	Koelvraag (via een compressiekoelmachine).....	20
3.3	Verlichting en apparatuur, ventilatie en koeling.....	21
3.4	Elektrische voertuigen	22
3.5	PV-panelen	23
4	Analyse bestaande situatie (systeemanalyse)	24
5	Optimalisatie concepten	27
5.1	Bouwstenen voor de optimalisatie concepten	27
5.2	Toepassing bouwstenen.....	30
6	Business cases.....	32
6.1	Inleiding	32
6.2	Investeringskosten.....	34
7	Resultaten	36
8	Discussie	38
8.1	Gebruikte tijdreeksen.....	38
8.2	Gebruikte tools.....	38
8.3	Opbrengsten van piekverlaging	39

9	Conclusies, aanbevelingen, spin-off	40
9.1	Conclusies	40
9.2	Aanbevelingen voor Gebied 11	41
9.3	Bijdrage aan de doelstellingen van de regeling.....	41
9.4	Mogelijkheden voor spin off en vervolgactiviteiten	41
10	Referenties	43
11	Ondertekening	44
12	Annex A – Karakteristieken van 86 gebouwen.....	45

1 Inleiding

De vereniging van Eigenaren bedrijventerrein Delftechpark, TU Delft campus, TNO, en Sweco willen gezamenlijk werken aan een duurzame en slimme energievoorziening. Door de verwachte toename aan duurzame energieopwekking, nieuw type energie vragers (b.v. elektrische auto's) dient energievraag en energieaanbod 'slimmer' op elkaar te worden afgestemd.

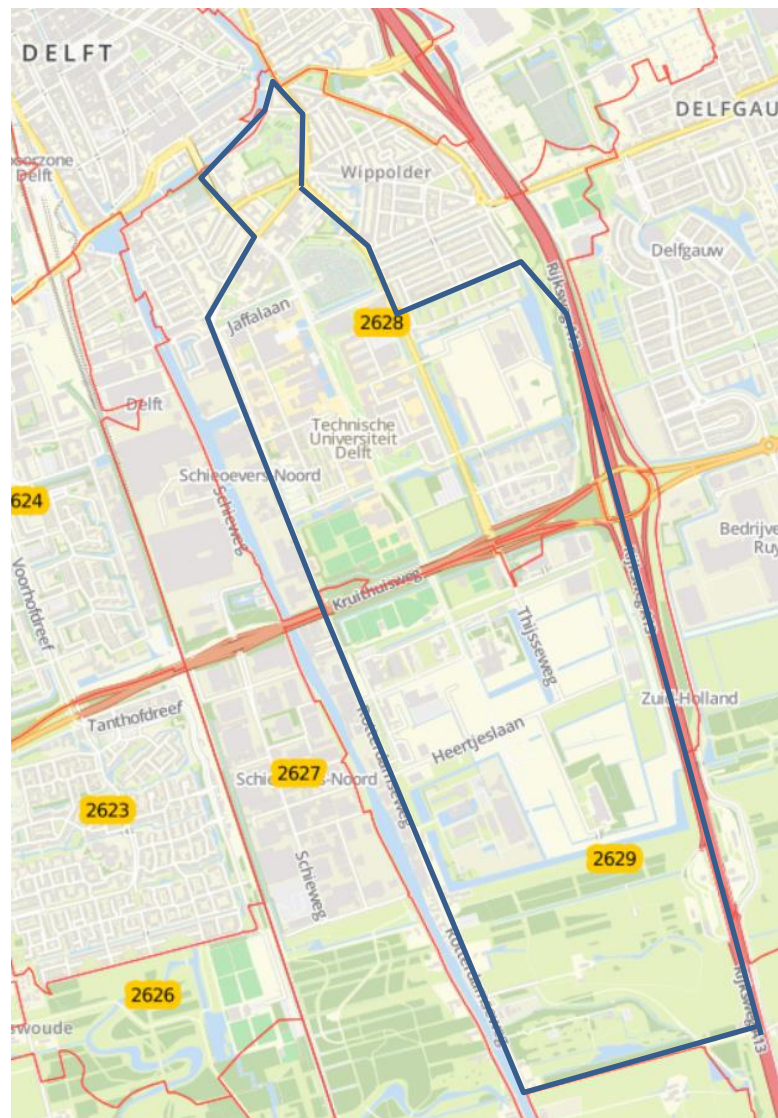
Dit project beoogt de haalbaarheid te onderzoeken van een aantal optimalisatie concepten om energievraag en -aanbod op bedrijventerreinen dynamisch en flexibel af te stemmen, waaronder het onderling afstemmen van de warmtevraag tussen gebouwen, dynamische ventilatie van gebouwen, inzet duurzame energie zoals PV-panelen en inzet van accu's (bijvoorbeeld van elektrisch auto's). Een belangrijk beoogd resultaat daarbij is een betere benutting van de bestaande energie-infrastructuur (voorkomen netverzwaring).

Uiteindelijk moet het concept door de bestaande partijen worden uitgerold en geïmplementeerd waarvoor een gezonde business case cruciaal is.

Het onderzoek en de resultaten hebben in eerste instantie specifiek betrekking op het onderzochte bedrijventerrein (Gebied 11), maar de gebruikte instrumenten en deels de resultaten zijn ook toepasbaar op andere bedrijventerreinen.

2 Gebied 11

Deze studie heeft betrekking op een specifiek bedrijventerrein, te weten Gebied 11 in Delft. De stad Delft is verdeeld in 13 logisch samenhangende werkGebieden, zoals 'Binnenstad' en 'Schieoevers'. Een van de Gebieden omvat de campus van de TUD, Delftechpark en Technopolis, omkaderd door de blauwe lijn in Figuur 6.

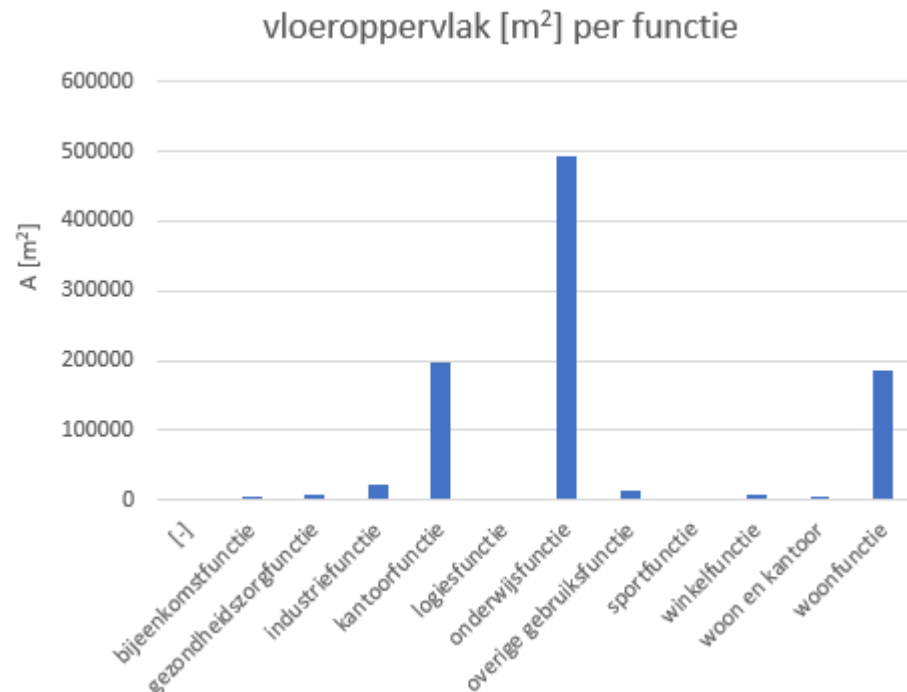


Figuur 6 Plattegrond van Gebied 11

2.1 Afbakening

Voor het bepalen van het gebruikspofiel van Gebied 11, met name van de gebouwen daarin is het kadaster geraadpleegd. Er blijken gegevens van 196 verschillende gebouwen beschikbaar, op verschillend aggregatieniveau. Zo zijn enkele kleine woningen apart in de lijst opgenomen, maar ook een gebouw bestaande uit 44 eengezinswoningen aan de Botaniestraat.

Op basis van de gegevens van het kadaster zijn de gebouwen gekarakteriseerd naar functie, weergegeven in Figuur 7.



Figuur 7 Functies van de gebouwen in Gebied 11 met bijbehorend totaal vloeroppervlak [m²]

Uit Figuur 7 blijkt dat er drie veel voorkomende functies zijn: kantoorfunctie, onderwijsfunctie en woonfunctie. Gezien het doel van het project - vraag en aanbod van energie in bedrijventerreinen op elkaar afstemmen - zijn de gebouwen met een woonfunctie verder buiten beschouwing gebleven. Daarmee resteert een verzameling van 86 kantoorgebouwen en gebouwen met een onderwijsfunctie. De verwachting is dat deze een soortgelijke bezetting en gebruik hebben. Er is verder dan ook geen onderscheid gemaakt tussen deze twee functies.

2.2 Base case

Om de impact van optimalisatieconcepten te kunnen beoordelen is een uitgangssituatie (base case) nodig. De overwegingen hierbij zijn de volgende.

Een van de doelen is een betere benutting van de bestaande energie infrastructuur ter voorkoming van verzwaring van het bestaande (elektriciteits-)net. De in eerste instantie voorgestelde optimalisatieconcepten (dynamische ventilatie, Power2Heat en collectieve laadpalen) hebben dan ook betrekking op de elektriciteitsvraag.

Om de analyse breder te trekken dan enkel de analyse van het huidige elektriciteitsgebruik, worden ook toekomstige ontwikkelingen meegenomen. Deze omvatten – naast een verwachte sterke toename van elektrisch vervoer – een verwachte elektrificatie van de energie infrastructuur door het uifaseren van aardgas. Voor dat laatste bestaan 2 reële opties:

1. Voorziening van warmtevraag van de gebouwen met elektrische warmtepompen (lokaal of centraal)
2. Voorziening van warmtevraag van de gebouwen met een warmtenet.

Optie 2 wordt momenteel gedeeltelijk toegepast middels een warmtenet met vier strengen over de campus [RVO, 2015]. Verdere ontwikkeling hiervan wordt momenteel al door de TUD onderzocht, in het bijzonder het ontginnen van geothermie en daarmee samenhangend, het geschikt maken van het warmtenet voor lagere aanvoertemperaturen.

In dit project wordt optie 1 beschouwd. De uitgangssituatie (base case) die is gekozen bestaat daarom uit een warmtevoorziening van de (utiliteits-)gebouwen in Gebied 11 met (elektrisch aangedreven) warmtepompen. De warmtevraag van de gebouwen wordt op die manier vertaald naar een elektriciteitsvraag, die boven op de huidige elektriciteitsvraag komt (luchtbehandeling, pompen, verlichting, computers, koeling etc.).

Met deze aanpak kan het bufferend vermogen van de gebouwmassa worden gebruikt voor een tijdelijke vermindering van de elektriciteitsvraag: een goed geïsoleerd, thermisch zwaar gebouw zal niet snel afkoelen en kan in tijden van elektriciteitskrapte tijdelijk zonder verwarming (en dus elektriciteit) zonder comfortverlies voor de gebruikers. Hetzelfde geldt voor ventilatie: het tijdelijk verlagen van het ventilatiedebiet, gebruikmakend van de buffer van schone lucht in het gebouw, bespaart niet alleen elektriciteit voor ventilatoren, maar vermindert ook de ventilatieverliezen (warmte die met de ventilatielucht wordt afgevoerd) en daarmee de elektriciteitsvraag voor de warmtepomp.

3 Aanpak en modellen

Zoals in het vorige hoofdstuk beschreven, is de energievraag de 86 beschouwde gebouwen geheel vertaald naar een elektriciteitsvraag door het sommeren van de energievraag voor:

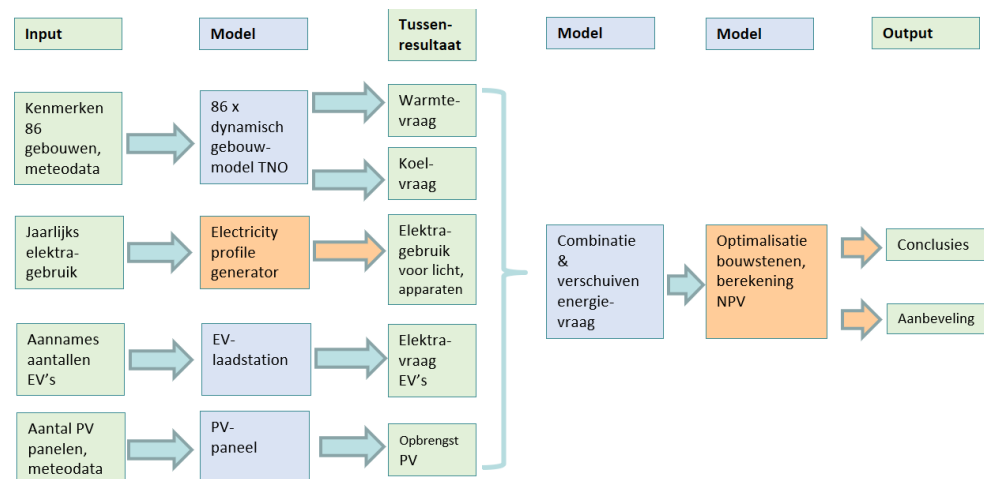
1. Verwarming (via een warmtepomp)
2. Koeling (via een compressiekoelmachine)
3. Verlichting en apparatuur.

In de elektriciteitsvraag van Gebied 11 zijn verder meegenomen:

1. Opladen van accu's van elektrische voertuigen (EV's)
2. Opbrengst van PV-panelen

Elektriciteitsvraag van voorzieningen buiten de gebouwen zoals straatverlichting etc. is niet meegenomen.

Door het verschuiven in de tijd van de warmte- en koelvraag, het tijdelijk verminderen van ventilatie, het slim laden van EV's en de inzet van accu's en PV-panelen wordt vervolgens nagegaan hoe pieken in de elektriciteitsvraag kunnen worden vermeden of verminderd. De verschillende stappen en de daarvoor benodigde input data, gebruikte modellen en output van data in het project zijn samengevat in Figuur 8.



Figuur 8: Input van data, gebruikte modellen en output van data in het project.

Voor de analyse van de bestaande situatie (base case) is het belangrijk dat de tijdreeksen van de elektriciteitsvraag goed in kaart zijn gebracht. Met name wanneer het doel is om pieken in de elektriciteitsvraag te vermijden is het cruciaal dat hoogte en de timing van de afzonderlijke bijdragen aan de elektriciteitsvraag correct zijn.

In onderstaande paragrafen wordt besproken hoe de berekende afzonderlijke bijdragen aan de totale tijdreeksen van de elektriciteitsvraag (warmtevraag, koelvraag, verlichting en apparatuur, EV's en PV-panelen) zijn berekend en zo goed mogelijk zijn gevalideerd aan de hand van beschikbare gegevens.

3.1 Warmtevraag (via een warmtepomp)

De warmtevraag is voor elk van de 86 gebouwen bepaald met een vereenvoudigd dynamisch model, dat voor het gehele jaar 2016 de uurlijkse warmtevraag berekent.

Het model maakt gebruik van een beperkt aantal parameters om een gebouw thermisch te karakteriseren. Aangezien het niet mogelijk was om binnen het tijdsbestek en budget van deze haalbaarheidsstudie alle gebouwen nauwkeurig te karakteriseren, is een aantal 'basis' parameters zoals bouwjaar, vloeroppervlak, verdiepingsindex van de 86 gebouwen uit het kadaster gehaald. Andere parameters zoals thermische isolatie, ventilatiedebiet, verwarmingsvermogen etc. zijn afgeleid op basis van de 'basis-parameters'. Deze parameters zijn in Tabel 2 weergegeven. Hieruit zijn de input parameters voor het model berekend.

Tabel 2: Basis parameters die de 86 gebouwen in Gebied 11 karakteriseren. De afgeleide parameters zijn weergegeven in grijze tekstkleur.

Basisparameter	Eenheid	Bron	Opmerking
Bouwjaar	[-]	Kadaster	
Gebruiksoppervlak	[m ²]	Kadaster	
Verdiepingsindex	[-]	Kadaster	1 (1-2 verd), 2(3-4 verd), 3 (5-10 verd), 4 (>10 verd)
Zware of Lichte bouw	[-]	expert best guess	Deels uit functie (kantoor of onderwijs) en deels willekeurig
Thermische isolatieklasse	[-]	expert best guess	Goed, Matig of Slecht op basis van bouwjaar
Glas%	[%]	expert best guess	Visuele inschatting met Google StreetView
Koelcapaciteit	[W/m ²]	expert best guess	Op basis van functie en bouwjaar 0, 30 of 60 W/m ²
Aantal verdiepingen	[-]	expert best guess	Op basis van verdiepingsindex, deels random
R _c gevel, vloer, dak	[m ² K/W]	expert best guess	Schatting op basis van thermische isolatieklasse
U _{glas}	[W/m ² K]	expert best guess	schatting op basis van thermische isolatieklasse
rendement		expert best guess	
warmteterugwinning	[%]	expert best guess	op basis van bouwjaar 0, 30 of 60% rendement

De volledige lijst van gebouwen met aangenomen parameters is weergegeven in Annex A – Karakteristieken van 86 gebouwen.

Samen met een tijdschema voor temperatuurinstellingen tijdens kantoortijden en daarbuiten is de uurlijkse warmtevraag bepaald. Deze is herleid naar een elektriciteitsvraag door aan te nemen dat de (elektrisch aangedreven) warmtepomp een constante COP (Coefficient Of Performance) van 3.0 heeft.

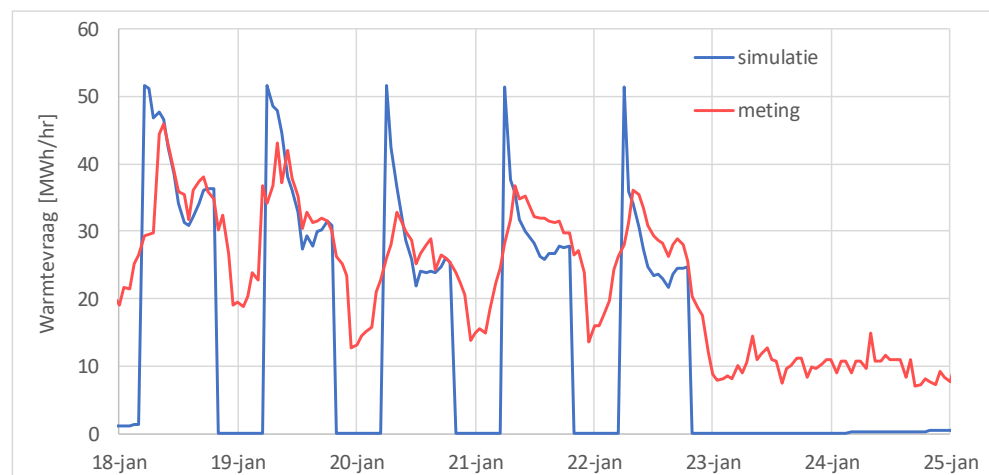
De ventilatieverliezen (de warmteverliezen door het afvoeren van opgewarmde lucht) zijn apart berekend. We doen daarmee net alsof de ventilatieverliezen door een aparte verwarming worden gecompenseerd, zodat we de het ventilatiesysteem op een later tijdstip kunnen inschakelen (of naar een lager niveau kunnen brengen), zonder de warmtevraag ten gevolge van de overige warmteverliezen (en -winsten) opnieuw te moeten berekenen.

Op deze manier wordt gebruik gemaakt van de buffer van schone lucht in het gebouw. Een eenvoudig model van CO₂ productie en -afvoer ((zie hoofdstuk 5.1.3) laat zien dat de ventilatie in een gebouw 3 uur naar 50% van de capaciteit kan worden teruggebracht, waarbij de CO₂ concentratie tijdelijk stijgt van ca. 600 naar ca. 750 ppm.

3.1.1 Validatie tijdreeks warmtevraag

De warmtevraag van elk van de 86 gebouwen is met het gebouwmodel gesimuleerd en de geaggregeerde warmtevraag is vergeleken met de warmtevraag van een deel (ca. 75% van het BVO) van de TUD-gebouwen op de campus. Deze gebouwen worden van warmte voorzien middels het warmtenet van de TUD. De gemeten warmtevraag is gecorrigeerd voor het BVO t.o.v. dat van alle TUD-gebouwen en voor het BVO van de TUD-gebouwen t.o.v. dat van alle 86 gebouwen.

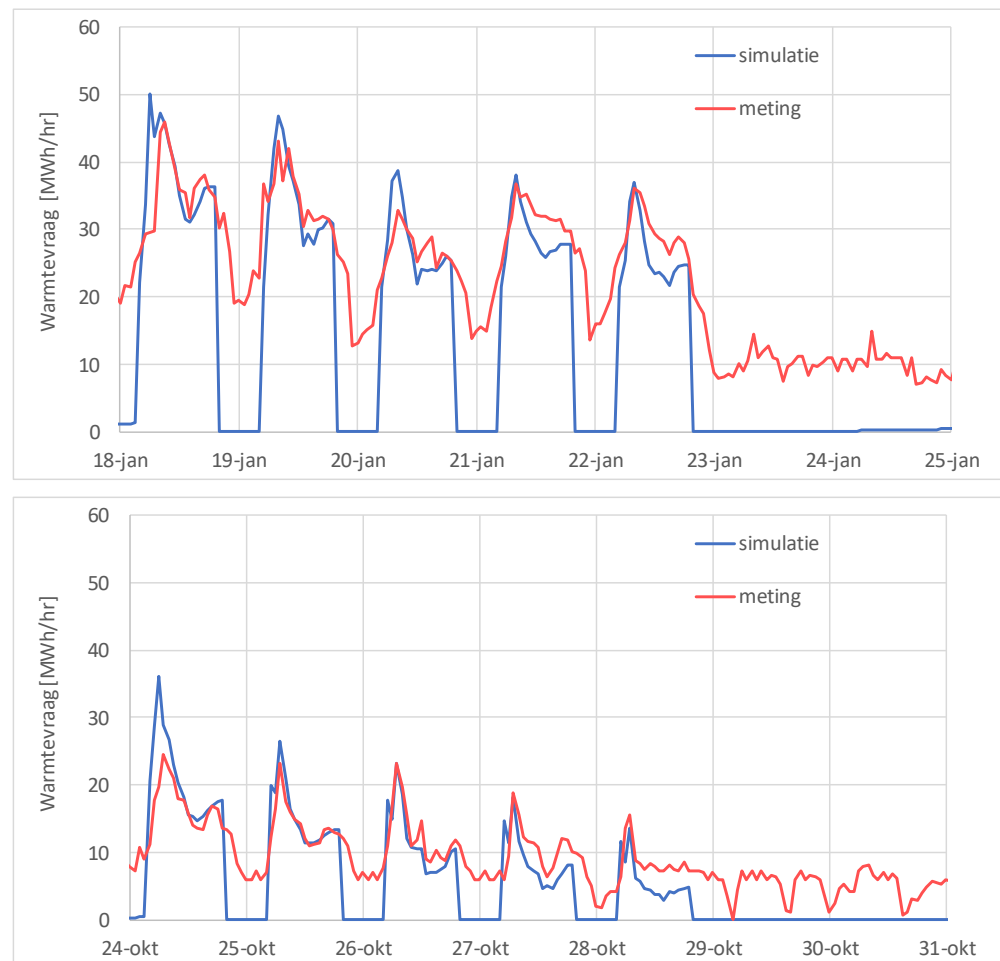
In de simulaties is in eerste instantie verondersteld dat de verwarming bij alle gebouwen op hetzelfde moment in de ochtend wordt aangezet, opdat de gebouwen om 7:00 de ingestelde temperatuur van 22°C bereiken, wanneer de eerste medewerkers arriveren. Dat wordt bereikt door de verwarming op dinsdag tot vrijdag om 5:00 aan te zetten en op maandagen om 4:00 (na een weekend met lager setpoint van 17°C). Figuur 9 laat zien dat de daarmee berekende pieken in de geaggregeerde warmtevraag van de 86 gebouwen aanzienlijk hoger zijn dan de gemeten warmtevraag.



Figuur 9: Vergelijking tussen berekende geaggregeerde warmtevraag van de beschouwde 86 gebouwen en de gemeten warmtevraag van een deel van de TUD-gebouwen (gecorrigeerd voor BVO). Verwarmingen van alle gebouwen starten op hetzelfde moment.

Er is vervolgens verondersteld dat de gebouwen elk op een ander tijdstip beginnen met verwarmen, op een willekeurig moment uit een interval van 2 uur rond het oorspronkelijke tijdstip.

De resultaten van de simulaties zijn in onderstaande figuren voor een week in januari en een week in oktober 2016 vergeleken met gemeten waarden.



Figuur 10: Vergelijking tussen berekende geaggregeerde warmtevraag van de beschouwde 86 gebouwen en de gemeten warmtevraag van een deel van de TUD-gebouwen (gecorrigeerd voor BVO). Verwarmingen van de gebouwen starten op een willekeurig moment uit een tijdsinterval van 2 uur.

Het valt op dat de gemeten warmtevraag (rode lijn) 's nachts en in het weekend nog relatief hoog is, ondanks de (veronderstelde) nachtverlaging tot 17°C. Mogelijk is de werkelijke nachtverlaging niet of niet volledig bij alle gebouwen doorgevoerd. Een andere mogelijkheid is dat de ventilatie buiten kantooruren op een te hoog niveau blijft doordraaien. Ventilatieverliezen blijken namelijk een aanzienlijk deel van de warmtevraag voor verwarming te bepalen.

Tenslotte wordt het warmtenetwerk van de TUD op een relatief hoge temperatuur bedreven. Zelfs dusdanig hoog dat zij onder het stoomwezen valt (drukken groter dan atmosferisch). Hoge temperaturen in het netwerk zorgen voor relatief hoge verliezen van de toevoer- en retourleidingen, ook als er geen warmtevraag van de gebouwen is.

De hoogte en de positie van de berekende en gemeten pieken in de warmtevraag komen echter goed overeen.

3.2 Koelvraag (via een compressiekoelmachine)

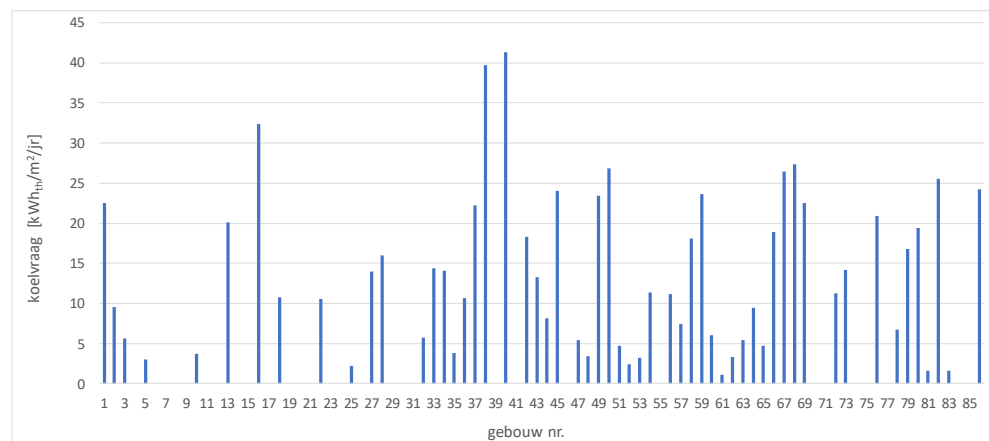
De koelvraag is eveneens met bovenstaand dynamisch gebouwmodel bepaald. Voor de gebouwen met topkoeling (koelcapaciteit 30 W/m², zie Tabel 2) wordt de koelinstallatie ingeschakeld wanneer de binnentemperatuur boven de maximale waarde van 26°C komt en weer uitgeschakeld als de binnentemperatuur tot 24°C is gedaald. Voor gebouwen met full airconditioning (60W/m²) zijn die temperaturen 24°C respectievelijk 22°C.

De koelvraag is uiteindelijk herleid naar een elektriciteitsvraag door aan te nemen dat de (elektrisch aangedreven) compressiekoelmachine een constante COP (Coefficient Of Performance) van 2.5 heeft. Daarbij is de elektriciteitsvraag van het ventilatiesysteem opgeteld (zie ook paragraaf 3.3).

3.2.1 Validatie koelvraag

Helaas zijn er geen uurlijkse waarden beschikbaar van elektragebruik voor koeling. Het is zelfs moeilijk om het jaarlijkse elektraverbruik voor koeling te achterhalen omdat dat vaak niet apart wordt bemeterd.

In Figuur 11 is de berekende jaarlijkse koelvraag voor koeling (in kWh_{th}/m²/jr) voor elk van de 86 gebouwen weergegeven.



Figuur 11: Berekende koelvraag voor elk van de 86 beschouwde gebouwen in G11.

(Meijer, 2009) vermeldt voor Nederlandse kantoren een energiegebruik voor koeling van 70MJ/m² per jaar, gebaseerd op een COP van 2.0, wat overeenkomt met een koelvraag van 39 kWh_{th}/m²/jr.

Pennartz, 2011 vermeldt dat er in Nederland ca. 46 miljoen m² kantoorruimte is (waarvan naar schatting 70% over mechanische koeling beschikt), met een geschatte koelvraag van 25 kWh_{th}/m²/jr².

Het kantoor van SWECO in De Bilt heeft een geschat koelvermogen van ca. 60-70 W/m², wat bij 600-700 vollasturen neerkomt op 42 kWh_{th}/m²/jr

² Koelvraag van 50 W/m² x 500 vollasturen

De in de simulaties berekende koelvragen variëren tussen 0 en 25 kWh_{th}/m²/jr met een enkele uitschieter naar 40 kWh_{th}/m²/jr en lijken daarmee wat grootteorde betreft te kloppen.

3.3 Verlichting en apparatuur, ventilatie en koeling

Om tijdsverschuivingen van verbruik te simuleren dienen de voornaamste componenten van dit verbruik apart gekend te zijn.

De voornaamste verbruiken zijn:

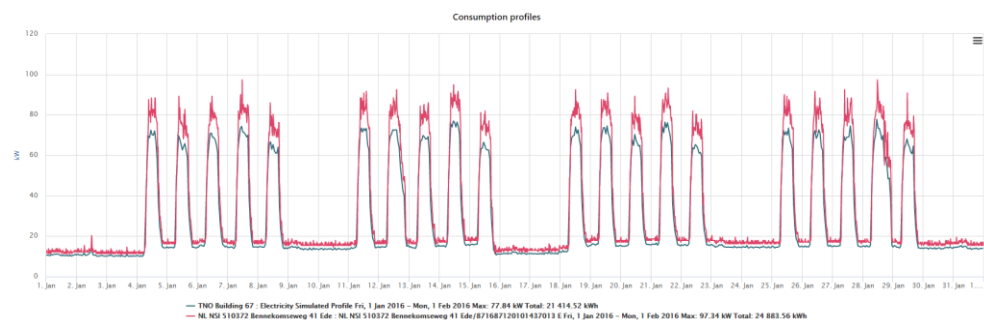
- Ventilatie
- Verlichting en apparatuur nodig voor de werking van het gebouw
- Koeling

De elektriciteitsvraag voor verlichting en apparatuur, ventilatie en koeling is bepaald met een patroongenerator. Uitgaande van een jaarlijks elektriciteitsgebruik van 60 kWh/m² [Sipma, 2016] stelt de generator uurlijkse profielen op voor verlichting en apparatuur, ventilatie en koeling.

Hiervan zijn enkel de tijdreeksen voor verlichting en apparatuur gebruikt. De tijdreeksen voor koeling en ventilatie zijn met het simulatiemodel berekend (hoofdstuk 3.2) omdat dit meer rekening houdt met de specifieke gebouwkenmerken zoals glaspercentage en isolatiegraad, aantal gebruikers, rendement warmteterugwinning etc.

3.3.1 Validatie tijdreeksen verlichting en apparatuur

Ter validatie is de berekende tijdreeks voor verlichting en apparatuur van gebouw nr. 67 in Gebied 11 (zie Annex A) vergeleken met de door SWECO gemeten tijdreeksen voor verlichting en apparatuur van een kantoorgebouw van vergelijkbare grootte (het NSI-gebouw in Ede).



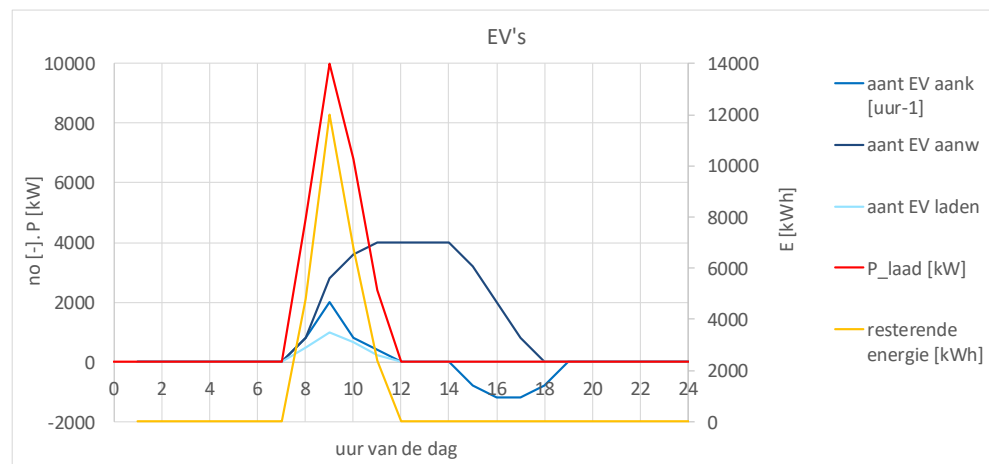
Figuur 12: Berekende tijdreeks voor verlichting en apparatuur van gebouw nr. 67 (BVO 5005 m²) in Gebied 11 in januari 2016 en gemeten tijdreeks van het vergelijkbare NSI-gebouw in Ede (BVO 4760 m²).

Zoals te zien in Figuur 12 komen de berekende en gemeten tijdreeksen goed overeen. De tijdreeksen zijn ook relatief vlak gedurende de kantooruren en ook vlak maar veel lager daarbuiten.

3.4 Elektrische voertuigen

Omdat gegevens niet voorhanden waren voor het bepalen van de elektriciteitsvraag van elektrische voertuigen is deze op een aantal veronderstellingen gebaseerd.

Er is verondersteld dat er op doordeweekse dagen dagelijks 4000 ³elektrische voertuigen (EV's) naar Gebied 11 komen, volgens een patroon geschetst in Figuur 6 (blauwe lijn). Vanaf 7:00 uur komen er EV's aan in Gebied 11, waarbij het aantal aanwezige EV's de donkerblauwe lijn volgt en bestaat uit maximaal 4000 voertuigen. EV's vertrekken pas nadat alle EV's zijn gearriveerd.



Figuur 13: Elektrische Voertuigen (EV's) en laadkarakteristiek bij het BAU-scenario.

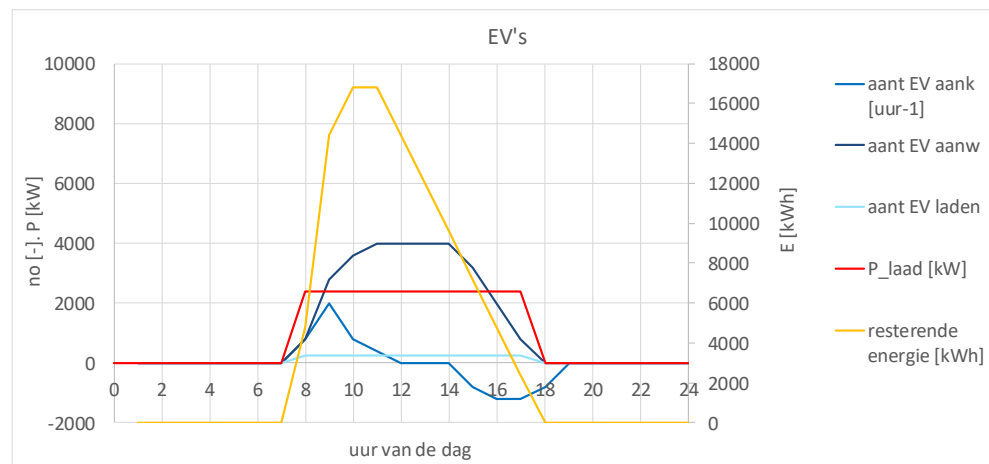
Verder is aangenomen dat de EV's gemiddeld 33 km hebben afgelegd en elk een elektrische energie van 6 kWh benodigen om volledig opgeladen te worden (gebaseerd op verbruik van de Tesla model S). De totaal resterende energie wordt weergegeven door de gele lijn in Figuur 13. In dit scenario worden alle voertuigen bij aankomst geladen met 10kW per voertuig (tot maximaal 1000 laadpalen). Als alle EV's aan het eind van de dag volledig zijn opgeladen, eindigt de gele lijn weer op nul.

De rode lijn tenslotte geeft het elektrisch vermogen dat de laadpalen in dit scenario aan de EV's leveren (beperkt door de capaciteit van de laadpalen, het aantal beschikbare laadpalen, het aantal aanwezige voertuigen en de resterende benodigde energie). Het BAU-scenario laat een forse piek in laadvermogen zien van 10 MW.

In het 'slim-laden' scenario kan de begintijd van laden worden ingesteld op bijvoorbeeld 10 uur (zoals in Figuur 14). daarnaast wordt het laadvermogen gelijkmatig verdeeld over de resterende kantoor tijd door het aantal tegelijkertijd te laden voertuigen (lichtblauwe lijn) te beperken. De piek in het laadvermogen uit het BAU-scenario wordt zo voorkomen (rode lijn).

³ De schatting is dat er ca. 10.000 gebruikers zijn van de kantoorgebouwen in Gebied 11 (gebruikersoppervlak gedeeld door 20 m² per persoon) en ca. 25.000 gebruikers van de onderwijsgebouwen. Aangenomen dat de meeste daarvan studenten zijn (zonder auto) en dat ongeveer de helft van de gebruikers van de kantoorgebouwen met de auto naar het werk komt, lijkt 4000 auto's een conservatieve schatting.

Het is duidelijk dat dit slechts een benadering van een 'slim laden' scenario is. Slim laden houdt namelijk dynamisch rekening met het elektriciteitsgebruik van de gebouwen, en past daar het maximaal beschikbaar vermogen om EV's te laden op aan. Verder houdt het ook rekening met eventueel preferent te laden EV's vanwege een vroegere vertrektijd. Het hier onderzochte scenario laat wel zien dat pieken in het totaal elektriciteitsgebruik effectief kunnen worden 'geschoon' door niet blind alle aankomende voertuigen meteen maximaal te gaan laden.



Figuur 14: Elektrische Voertuigen (EV's) en laadkarakteristiek bij het 'slim laden' scenario.

Wat betreft validatie zijn de tijdreeksen van het laden van elektrische voertuigen niet vergeleken met gemeten tijdreeksen omdat die niet voorhanden waren.

3.5 PV-panelen

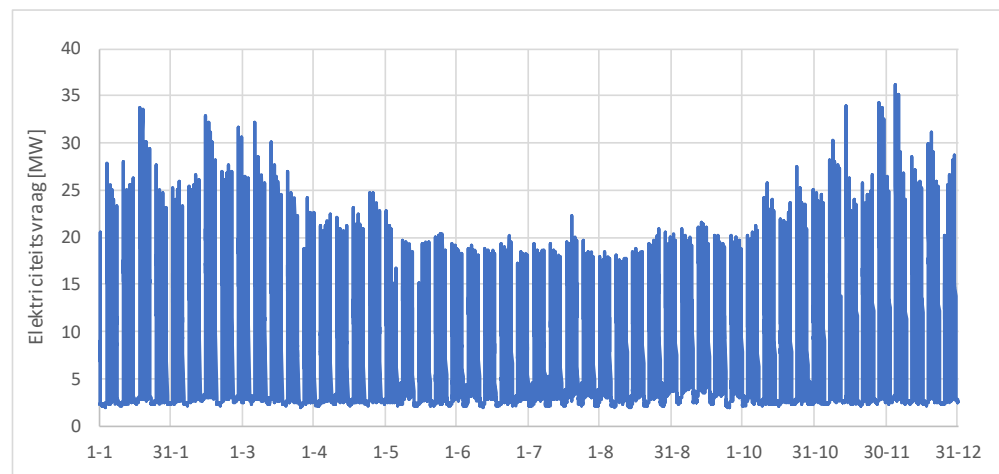
De opbrengst van de door PV-panelen opgewekte elektriciteit is berekend aan de hand van de zoninstraling uit de database van het KNMI voor 2016 [KNMI]. Met behulp van de 'solar radiation processor' van het gebouwmodel TRNSYS is zijn uit de uurlijkse globale zoninstraling (op een horizontaal vlak) de zoninstraling op vaste PV-panelen bepaald. De panelen zijn zuidgeoriënteerd en hebben een inclinatie (hoek met de horizontaal) van 30 graden, wat voor Nederland de hoogste jaarlijkse opbrengst geeft.

Het rendement van omzetting van zoninstraling naar elektriciteit is vervolgens 12% gekozen. Daarmee wordt een jaarlijkse opbrengst gegenereerd van 156 kWh/m², wat ongeveer overeenkomt met de opbrengst van de beste huidige PV-panelen.

4 Analyse bestaande situatie (systeemanalyse)

Zoals in paragraaf 3 besproken bestaat de totale elektriciteitsvraag van de 86 gebouwen uit de warmte- en koelvraag - omgezet naar een elektriciteitsvraag – de compensatie van de ventilatieverliezen, elektriciteitsvraag door verlichting en apparatuur en voor het opladen van 4000 elektrische voertuigen. In de volgende paragrafen worden de verschillende bijdragen aan het berekende elektriciteitsgebruik geanalyseerd.

In het jaarlijkse elektriciteitsgebruik worden de hoogste (uurgemiddelde) pieken gevonden in het stookseizoen, zoals Figuur 15 toont.

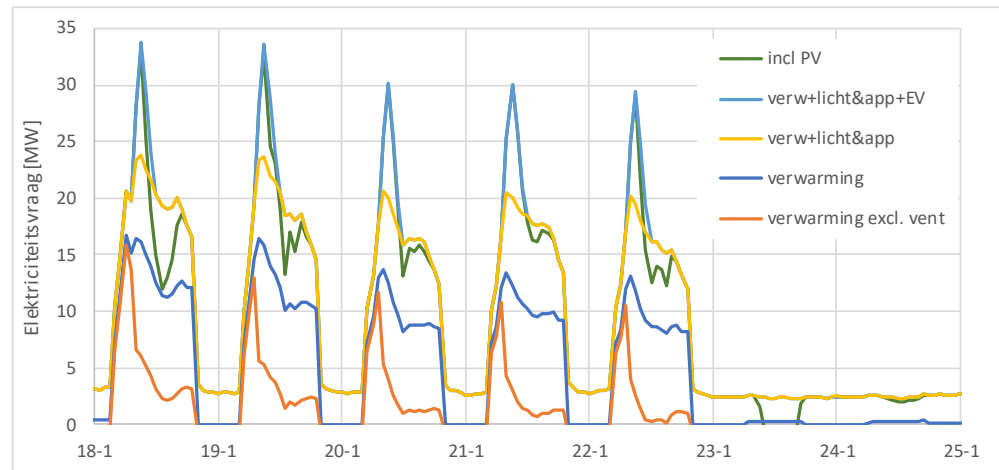


Figuur 15 Uurgemiddelde elektriciteitsvraag van Gebied 11 in 2016

4.1.1 Winter week

Figuur 16 toont de cumulatieve bijdragen van verwarming, ventilatie, verlichting en apparatuur en elektrische voertuigen (EV's) aan de totale vraag gedurende een week in januari 2016. Bovenop de warmtevraag (donkerblauwe lijn) komt de elektriciteitsvraag voor verlichting en apparatuur (gele lijn) en daarboven de elektriciteitsvraag voor het laden van EV's (lichtblauwe lijn). Koeling vindt in deze periode niet plaats.

De verwarming exclusief ventilatieverliezen (oranje lijn) is apart getoond en laat een piek zijn als gevolg van het opwarmen van de gebouwen in de vroege ochtend tussen 5:00 en 7:00 uur. Om 7:00 wordt de ventilatie aangezet, met ventilatieverliezen en elektriciteitsgebruik door de ventilatoren tot gevolg. Het verschil tussen de donkerblauwe en oranje lijn laat zien dat ventilatieverliezen een aanzienlijk deel van de warmtevraag veroorzaken, zodat een (tijdelijke) verlaging van de ventilatie gedurende enkele uren (flexibel ventileren) een effectieve manier kan zijn om de totale vraag te verlagen. Dit is het meest effectief tussen 9:00 en 12:00 uur.



Figuur 16 Uurgemiddelde elektriciteitsvraag van Gebied 11 in een winterweek in 2016

Verlichting en apparatuur levert ook een substantiële bijdrage aan de totale elektriciteitsvraag, maar de tijdreeks is min of meer vlak en de mogelijkheden om dit (tijdelijk) te verminderen zijn beperkt. Wel kan de elektriciteitsvraag worden teruggebracht door energie-efficiënte apparaten en verlichting zoals LED-schermen en LED-verlichting.

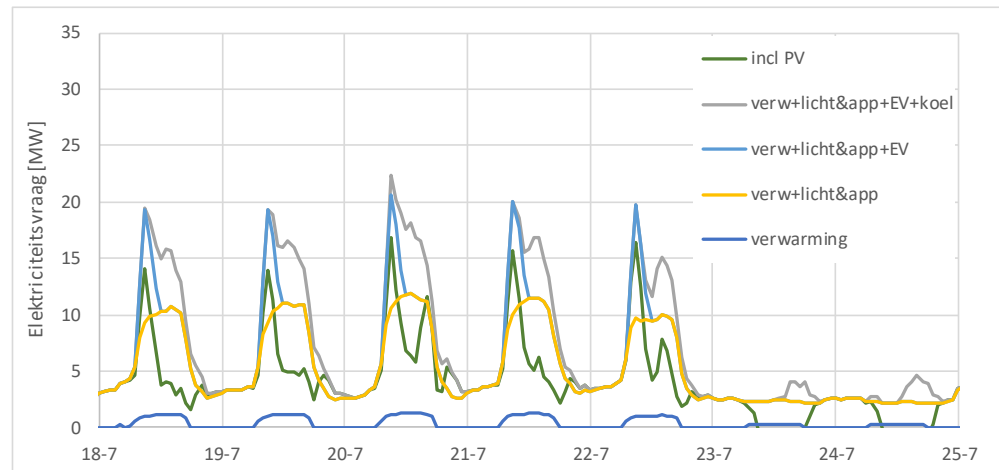
In het base case of BAU (Business As Usual) scenario worden elektrische voertuigen opgeladen zodra deze aankomen in Gebied 11 (4000 voertuigen die tussen 8:00 en 10:00 uur aankomen). Dit laden veroorzaakt een flinke piek tussen 9:00 en 10:00 uur zodat slim opladen (verschuiven van het laden naar de middag) ook een effectieve manier is om pieken in de totale vraag te verlagen.

Pieken in het totaal gebruik (lichtblauwe lijn) treden typisch om 10 uur 's ochtends op. Ter illustratie van het effect van PV-panelen op de elektriciteitspiek is de vraag verminderd met de opbrengst van 100.000m² PV-panelen (groene lijn). Het blijkt dat de piek in opbrengst te laat op de dag komt om de ochtendpiek in enige mate te verlagen.

Tot slot zouden (elektrische) accu's kunnen worden ingezet om pieken te scheren.

4.1.2 Zomer week

Figuur 17 toont de cumulatieve bijdragen van verwarming, ventilatie, verlichting en apparatuur, elektrische voertuigen (EV's) en koeling aan de totale vraag gedurende een week in juli 2016.



Figuur 17 Uurgemiddelde elektriciteitsvraag van Gebied 11 in een zomerweek in 2016

Zoals al opgemerkt zijn de pieken lager dan in de winter, dus in het terugbrengen van de jaarlijkse pieken vormen zij geen bottleneck. Door de overheersende invloed van het laden van EV's (geen 'slim' laden) treden pieken in de zomer ook in de ochtend, tegen 9:00 uur op. Koeling zorgt voor een latere maximale vraag, typisch tussen 12:00 en 14:00 uur.

Energie voor verwarming en ventilatie levert nog maar een geringe bijdrage aan de zomerpieken. Net als in de winter zijn de mogelijkheden beperkt om elektriciteit voor verlichting en apparatuur (tijdelijk) te verminderen anders dan het gebruik van energiezuinig apparatuur en verlichting.

Effectieve manieren om zomerpieken te verlagen blijven daarmee het slim laden van EV's (verschuiven naar de middag), maar ook het slim gebruik van koeling, bijvoorbeeld door in sommige gebouwen de koeling eerder aan te zetten en wellicht wat langer op een lager niveau aan te zetten. Echter, zoals al opgemerkt, vormen de zomerpieken niet de bottleneck in het gehele jaar.

Inzet van PV-panelen die het netto elektriciteitsgebruik verlagen is wel zinvol in de zomer doordat de pieken in opbrengst van de panelen in de zomer beter samenvallen met de pieken in de vraag dan in de winter.

Toepassing van (elektrische) accu's kan ook in de zomer een effectieve manier zijn om pieken te scherpen, maar doordat de zomerpieken lager zijn is dat minder effectief dan in de winter.

De resultaten van de berekeningen in hoofdstuk 7 zullen een antwoord geven op de vraag hoe deze pieken (technisch en economisch) het meest effectief verlaagd kunnen worden met de in hoofdstuk 5 te bespreken optimalisatieconcepten.

5 Optimalisatie concepten

Bij het toepassen van optimalisatieconcepten is uitgegaan van de bestaande situatie uit het vorige hoofdstuk, waarin de volledige energievoorziening (voor warmte, koeling, verlichting en apparatuur etc.) elektrisch van aard is. De gebruikte gebouwmodellen maken het eenvoudig om een andere situatie als uitgangspunt te beschouwen, bijvoorbeeld waarbij alle gebouwen door een renovatie een betere thermische schil hebben gekregen. Dat is in deze studie niet gedaan.

Door het toepassen van een aantal optimalisatieconcepten worden vraag en aanbod van energie op elkaar afgestemd en worden daarmee pieken in het elektriciteitsgebruik verlaagd. Hiervoor zijn een aantal 'bouwstenen' beschikbaar, die naar believen kunnen worden gecombineerd.

5.1 Bouwstenen voor de optimalisatie concepten

De bouwstenen voor de optimalisatieconcepten zijn de volgende.

1. *Afstemmen warmtevraag*, waarin door middel van smart management de warmtevraag van meerdere gebouwen op elkaar wordt afgestemd, om op die manier pieken in warmtevraag (en daarmee in elektriciteitsvraag) te voorkomen.
2. *Afstemmen koelvraag*, idem als voor afstemmen warmtevraag
3. *Flexibele ventilatie*, waarbij de ventilatie wordt gestuurd op Gebiedsniveau. Aangezien de pieken zicht vooral in de ochtend voordoen, wordt onderzocht in welke mate de ventilatie voor verschillende gebouwen verschillend kan worden ingeschakeld.
4. *Slim opladen van elektrische voertuigen met collectieve laadpalen*. In het base case scenario worden de voertuigen die volgens een bepaald schema 's ochtends arriveren, gelijk opgeladen. Omdat die vraag samenvalt met de piek in de ventilatievraag, kan het verstandig zijn om later te beginnen en het laden uit te smeren tot einde kantoor tijd als alle voertuigen weer zijn vertrokken.
5. *Inzet van PV-panelen*. Door inzet van lokaal opgewekte elektriciteit kunnen pieken in de vraag van elektriciteit uit het net worden verlaagd.
6. *Inzet van accu's* om pieken in de vraag op te vangen. De accu's kunnen worden opgeladen door PV-panelen of door het net in tijden van lage vraag (en of lage elektriciteitsprijzen).
7. *Power2Heat optimalisatie*. Hierbij worden pieken in aanbod (of dalen in vraag) opgevangen door tijdelijk energie op te slaan in het aanwezige warmtenet (bij de TU Delft).

5.1.1 Afstemmen warmtevraag

De eenvoudigste manier om pieken in warmtevraag te vermijden is om de gebouwen op een zo constant mogelijke temperatuur te handhaven. Bij een voorspelling van een koude periode kan ook worden overwogen om sommige gebouwen (buiten kantoor tijden) tijdelijk op een hogere temperatuur te brengen (buffering van warmte).

Deze maatregelen hebben als nadeel dat de gemiddelde binnentemperatuur in het stookseizoen hoger zal liggen bij nachtverlaging. Hogere gemiddelde binnentemperaturen geven hogere warmteverliezen en dus een hogere energierekening. Een vuistregel is dat de energierekening 8%⁴ omhoog gaat bij elke graad hogere binnentemperatuur.

Een alternatief is om buiten kantoortijden het temperatuur setpoint weliswaar te verlagen, maar de verwarming van de verschillende gebouwen op verschillende tijdstippen te laten beginnen. Aangezien het thermisch comfort voor de gebruikers niet mag lijden onder deze maatregel, wordt enkel onderzocht wat het effect is van een vroegere start van de opwarming, ten opzichte van de base case, en geen latere start.

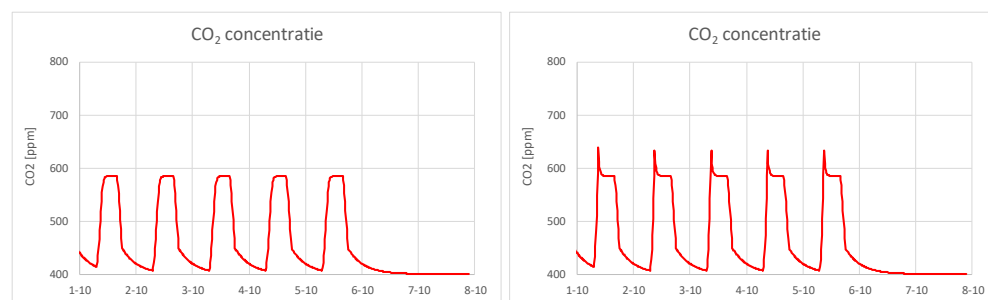
5.1.2 Afstemmen koelvraag

Zoals in paragraaf 4.1.2 bleek, valt de piek in de koelvraag rond 14:00 uur. Door sommige gebouwen wat eerder te laten beginnen met koelen en andere wat later, kan de koelvraag worden 'uitgesmeerd'.

5.1.3 Flexibele ventilatie

De CO₂ concentratie in een kantoor kan worden beheerst met een ventilatieregime dat gelijktijdig met de eerste gebruikers in de hoogstand gaat en gelijktijdig met de laatste gebruikers in de laagstand gaat (10%).

De uiteindelijke evenwichtsconcentratie overdag wordt bepaald door het aantal personen en het ventilatiedebiet. Uit een eenvoudig dynamisch model van CO₂-productie (door personen) en CO₂-afvoer (door ventilatie) blijkt dat bij een debiet van 30 l/s per persoon de CO₂-concentratie overdag ca. 600 ppm (parts per million) bedraagt (links in Figuur 18).



Figuur 18: CO₂ concentratie in een kantoor bij ventilatie naar hoogstand om 7:00 uur (links) en 9:00 uur (rechts)

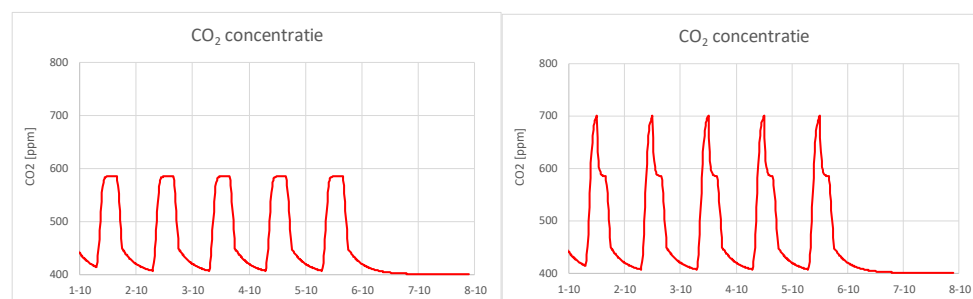
Hierbij is aangenomen dat de binnenkomende lucht ideaal mengt met de ruimtelucht. Verder is verondersteld dat om 7:00 uur 25% van het maximaal aantal gebruikers aanwezig is, om 8:00 de helft en vanaf 9:00 iedereen.

⁴ Mogelijk is het voor de prestatie (COP) van de warmtepomp gunstiger om deze dag en nacht warmte te laten leveren, waardoor ondanks de hogere warmteverliezen gedurende de nacht de benodigde elektriciteit minder zou kunnen zijn. Omdat hiervoor een gedetailleerder model van een warmtepomp nodig is, is dat in deze studie niet onderzocht.

Later inschakelen van de hoogstand van het ventilatiesysteem heeft tot gevolg dat de CO₂-concentratie 's ochtends versneld toeneemt. Een verlate inschakeling met 1 of 2 uur heeft echter nauwelijks effect. Bij een verlate inschakeling met 2 uur (dus hoogstand vanaf 9:00 uur) is er een kleine piek in de CO₂-concentratie te zien tot 640 ppm (rechts in Figuur 18).

Omdat de aanname van ideale menging niet altijd opgaat en er naast CO₂ ook andere verontreinigingen van de binnenlucht plaatsvinden (met stof, geurtjes etc.) is in het onderzoek een maximale verlating van 2 uur aangehouden.

Ook is onderzocht wat het effect van een tijdelijke verlaging van het ventilatiedebiet later op de dag is. Figuur 19 laat zien dat ten opzichte van de base case (constante ventilatie vanaf 7:00 uur) de CO₂-concentratie in de ruimte stijgt van ca. 600 naar 700 ppm als van 8:00 tot 12:00 uur de ventilatie met 40% wordt teruggebracht. Na herstel van de ventilatie naar 100% daalt de CO₂-concentratie binnen een uur weer naar 600 ppm.



Figuur 19: CO₂ concentratie in een kantoor bij normale ventilatie (links) en tijdelijke reductie met 40% tussen 8:00 en 12:00 uur (rechts)

5.1.4 Slim laden van EV's

In het base case scenario worden elektrische voertuigen opgeladen zodra deze aankomen in Gebied 11 (4000 voertuigen tussen 7:00 en 11:00 uur). Dit laden verergert de ochtendpiek zodat slim opladen (verschuiven van het laden naar de middag) een effectieve manier is om pieken in de totale vraag te verlagen.

5.1.5 Inzet PV-panelen

De inzet van PV (PhotoVoltaic) panelen resulteert in een verlaging van de elektriciteit uit het net. Ook kan de met PV-panelen opgewekte elektriciteit worden gebruikt om eventuele accu's op te laden, indien die 's ochtends stroom hebben geleverd om de ochtendpieken te verlagen.

5.1.6 Inzet accu's

De accu's leveren stroom als de piek in de elektriciteitsvraag boven een limietwaarde stijgt. De accu's worden vervolgens weer geladen als de benodigde elektriciteit uit het net onder de limietwaarde daalt en of in tijden van lage elektriciteitsprijzen (tussen 21:00 en 7:00 uur). De accu's worden ook opgeladen door eventueel geplaatste PV-panelen.

5.1.7 Power2Heat optimalisatie

Hierbij worden pieken in aanbod (of dalen in vraag) opgevangen door tijdelijk energie op te slaan in de vorm van warmte, bijvoorbeeld in het aanwezige warmtenet van de TU Delft. Power2Heat kan zeer zinvol zijn voor het valoriseren van flexibiliteit in elektriciteitsvraag. Flexibiliteit is echter niet in de business cases meegenomen (zie hoofdstuk 6) en daarom wordt Power2Heat hier verder niet beschouwd.

Power2Heat kan ook worden toegepast voor het opwarmen van tapwaterbuffers. Dat is voor bedrijventerreinen echter weer minder van toepassing dan voor woonwijken.

5.2 Toepassing bouwstenen

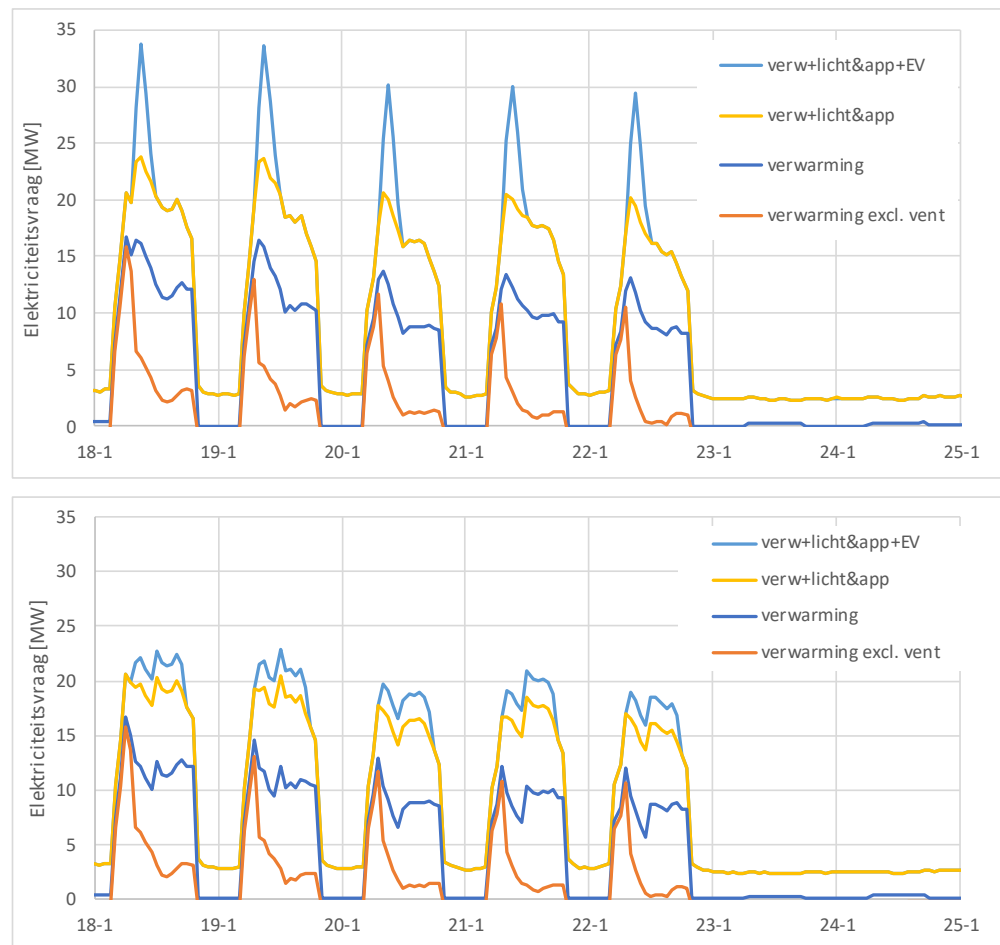
De effecten van de bouwstenen voor de optimalisatieconcepten zijn doorgerekend door voor elk uur van het jaar de bijdragen van alle consumenten van elektriciteit (warmtepompen voor verwarming, lampen, EV's, accu's etc.) en producenten (PV-panelen, accu's) bij elkaar te tellen.

De diverse bouwstenen van de optimalisatieconcepten zijn geïmplementeerd door de afzonderlijke tijdreeksen voor de elektriciteitsvraag voor verwarming, ventilatie, koeling, EV's etc. te veranderen, zoals samengevat in Tabel 3. De uurlijkse elektriciteitsvraag voor verlichting en apparatuur is vast verondersteld en dus niet beïnvloedbaar.

Tabel 3: Wijze van berekening van het effect van de bouwstenen in de optimalisatieconcepten

bouwstenen optim. concepten	tijdreeks elektravraag aangepast door
Afstemmen warmtevraag	in de tijd verschuiven van de dagelijkse warmtevraag uit de simulaties per gebouw
Afstemmen koelvraag	in de tijd verschuiven van de koelvraag uit de simulaties per gebouw
Flexibele ventilatie	ventilatieverliezen uit simulaties en elektriciteitsvraag voor ventilatoren tijdelijk reduceren
Slim laden van EV's	later starten + uitsmeren laden tot einde kantoortijd
PV-panelen	toevoegen opgewekte elektriciteit aan de hand van uurlijkse zoninstraling
Accu's	ontladen als pieken in vraag boven ingestelde limiet komen, laden in tijden van lage elektravraag en lage elektraprijzen

Als illustratie toont de bovenste grafiek in Figuur 20 de uurlijkse elektriciteitsvraag in een winterweek in de base case, zoals die in paragraaf 3.4.1 was berekend. Ter vergelijking toont de onderste grafiek het gecombineerde effect van i) 40% reductie van de ventilatie tussen 8:00 en 12:00 uur en ii) het slim laden van EV's vanaf 8:00 uur. Duidelijk te zien is de reductie van de piek.



Figuur 20: Uurgemiddelde elektriciteitsvraag in een winterweek in de base case (boven) en door de combinatie van 40% reductie van de ventilatie tussen 8:00 en 12:00 uur en slim laden van EV's vanaf 8:00 uur (onder).

6 Business cases

6.1 Inleiding

De bouwstenen voor de optimalisatieconcepten om pieken te verlagen, die in het vorige hoofdstuk zijn besproken, kosten geld. De financiële haalbaarheid van toepassing van de concepten hangt af van de opbrengsten. Hiervoor is een aantal opties beschikbaar.

Verlaging gecontracteerd vermogen

Scheren van pieken bespaart geld doordat het gecontracteerd vermogen lager kan zijn. Volgens het Nederlandse model wordt bij overschrijding van het overeengekomen contractvermogen, het gecontracteerd vermogen automatisch verhoogd tot de waarde van de hoogst voorgekomen piek (kwartierwaarde) en de kosten voor het verhoogde gecontracteerd vermogen worden gedurende een periode van 12 maanden in rekening gebracht. De kosten daarvoor zijn echter relatief gering, ca. € 1700 per kW per maand.

Bij het omlaag brengen van pieken zijn de besparingen door het lagere gecontracteerd vermogen naar verwachting te laag om de kosten van de implementatie van de optimalisatieconcepten te kunnen dragen.

Vermijden van netverzwaring

Een andere besparing komt voort uit het vermijden van netverzwaring. SWECO heeft een inschatting gemaakt van de kosten van een verzwaring van 20MVA op het spanningsniveau 23kV, dat wordt toegepast binnen het Gebied van Stedin in Delft zie Tabel 4.

Tabel 4: Inschatting van de kosten van een verzwaring van 20MVA op het spanningsniveau 23kV in Gebied11.

omschrijving werkzaamheden	kosten
Aanpassing 23kV installatie, met een tweetal extra velden á 10MVA per veld incl. kabelopvoeren etc.	€ 90,000.00
Ca. 500 m. kabelwerk twee circuits (2x3x1x630AL)	€ 200,000.00
Aanpassing bestaande 23kV installatie op het Gebied van Systeem Automatisering	€ 60,000.00
Kosten AK, PM, Eng, Risico en etc.	€ 70,000.00
Bouwkundige uitbreiding en werkzaamheden van het betreffende distributiestation	€ 80,000.00
Raming nieuwe spaartransformator met een vermogen van 20MVA	€ 300,000.00
totaal	€ 800,000.00

De kosten komen dus uit op € 800,000 / 20 MW of € 40,000 / MW. Dit is een factor 2 hoger dan de jaarlijkse kosten van hogere contractvermogens.

Het model dat vervolgens wordt gehanteerd is dat aanpassingen ook in kleinere stappen dan 20 MW kunnen worden gerealiseerd met handhaving van de kosten van € 40,000 / MW.

Hoog en laag tarief

Elektriciteitsverbruik heeft voor normale aansluitingen twee tarieven. Als we dus elektriciteit afnemen gedurende de laag-tarief periode (11pm-7am en weekenden) zal dit minder kosten dan wanneer we dit doen tijdens hoog-tarief periode. Zeker wanneer men batterijen heeft kan men die gedurende de nacht opladen tegen laag tarief om de ochtendpiek te verlagen en zo te besparen op hoog tarief elektriciteit. Doordat enkel sprake is van een verschuiving in tijd van de elektriciteitsvraag, zal dit natuurlijk niet bijdragen aan een verlaging van de CO₂-uitstoot.

Flexibiliteit in vraag voor netstabilisatie

Gezien elektriciteitsvraag en aanbod steeds op mekaar moeten afgestemd zijn is het voor de verantwoordelijke van het hoogspanningsnet essentieel om tijdig productie te kunnen toevoegen of verminderen. Natuurlijk kan dit ook door meer of minder verbruik aan te kunnen spreken.

Wanneer men snel kan zorgen voor bijkomende capaciteit (door vermindering van de vraag) of juist meer elektriciteit kan gebruiken wanneer dit het balanceren ten goede komt, dan heeft dit een markt.

Hiervoor dienen dan wel de nodige afspraken en interfaces gemaakt te worden. Die zijn niet voorzien in het kader van deze studie

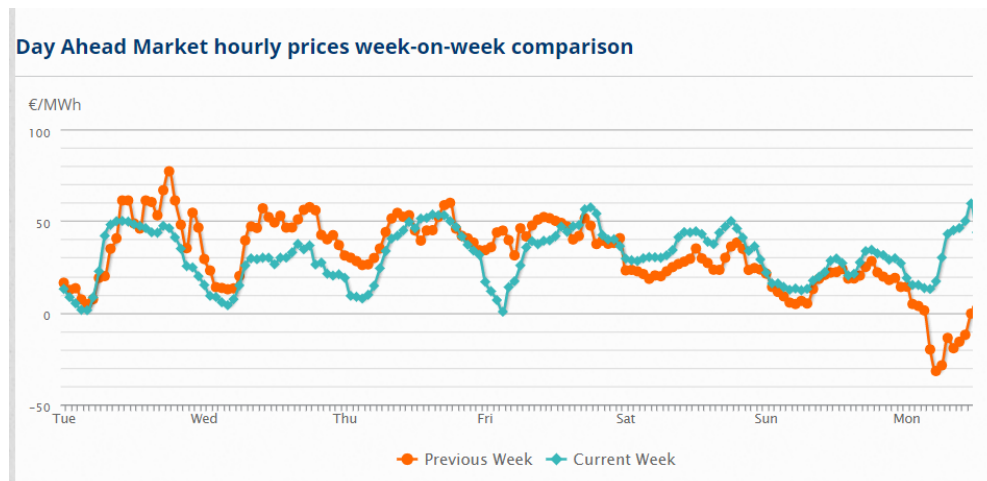


Figuur 21: Geplande (blauwe lijn) en werkelijke (zwarte lijn) elektriciteitsopwekking (<https://www.tennet.eu/electricity-market/data-dashboard/generation/>)

Handelen op de spotmarkt

De meeste gebruikers worden vaste prijzen in rekening gebracht voor elektriciteit. Op de (groothandels)elektriciteitsmarkt kunnen de prijzen echter sterk variëren.

In eerste instantie wordt vraag en aanbod op elkaar afgestemd op de 'Day Ahead market', waar elektriciteitsinkopers hun verwachte vraag voor de komende 24 uur afgeven. Zoals geïllustreerd in Figuur 22, variëren de prijzen sterk en kunnen zelfs negatief worden bij (te) groot aanbod van elektriciteit.



Figuur 22: Elektricitetsprijzen op de Day Ahead markt, die bij (te) groot aanbod van elektriciteit zelfs negatief kunnen worden (<https://www.belpex.be/>).

Aangezien de werkelijke elektriciteitsvraag zal afwijken van de 24-uurs voorspelling, zal er gecorrigeerd moeten worden ten opzichte van de voorspelling. Het handelen in extra benodigde elektriciteit of een overschot aan elektriciteit geschiedt op de spotmarkt.

Indien (gebundelde) elektriciteitsgebruikers kunnen handelen op deze spotmarkt, bijvoorbeeld door tijdelijke vermindering van de vraag of aanbod (door lokale verschuiving van verbruik en of opslag) kan hiermee een verdere kostenverlaging verkregen worden.

Bij gebruik van accu's dient een optimale laad/ontlaad strategie voor de accu's ook rekening te houden met het feit dat de levensduur van de batterijen mede wordt bepaald door het aantal laad/ontlaad cycli.

Gezien de complexiteit van deze materie en de noodzaak voor aanvullend onderzoek naar de mogelijkheden en belemmeringen, valt dit eveneens buiten het kader van deze haalbaarheidsstudie.

6.2 Investeringskosten

De financiële haalbaarheid van diverse optimalisatieconcepten is beoordeeld door het berekenen van de netto contante waarde van investeringen en bespaarde kosten over een periode van 15 jaar. Daarbij zoekt het model, afhankelijk van de waarden van de financiële parameters, de (financieel) optimale combinatie van de bouwstenen in hoofdstuk 5.1.

De belangrijkste (financieel-economische) parameters die een rol spelen in de financiële haalbaarheid van een business case zijn in Tabel 5 samengevat. Deze houden rekening met de normale Nederlandse dubbele tarieven en zijn gebaseerd op gegevens verkregen via energiemakelaar.

Tabel 5: Parameters bij het bepalen van de financiële haalbaarheid van concepten

Parameters	kosten/ opbrengsten	eenheid	opmerking
Verzwarend elektra infra	40	k€/MW	
Kosten PV	1.35	€/Wp	
Subsidie PV	0.05	€/kWh	
Kosten accu's	350	€/kWh	(PowerWall Tesla): €2500/7kWh
Kosten elektriciteit	0.052/0.037	€/kWh	hoog/laag excl. belasting en excl. transport, vaste kosten
Teruglever vergoeding opgewekte elektra - huidige saldering	0.03/0.01	€/kWh	hoog/laag
Kosten flexibel ventileren, slim laden	Nog niet bekend		

Om investeringsbeslissingen te kunnen nemen kunnen we dan een aantal scenario's doorrekenen voor de geraamde gebruikersperiode. In deze berekeningen is enkel rekening gehouden met de financiële kosten en is geen optimalisatie naar bv CO₂ doorgevoerd.

Voor de berekening van de opbrengsten is de piekverlaging bepaald aan de hand van de tijdreeksen van verwarming, koeling, ventilatie en elektriciteit.

7 Resultaten

Door het combineren van een aantal bouwstenen is een aantal optimalisatieconcepten samengesteld. Naast een aantal concepten bestaande uit een enkele bouwsteen zoals het toepassen van enkel PV-panelen, accu's, flexibel ventileren en slim laden van elektrische voertuigen, zijn combinaties van bouwstenen doorgerekend.

De verlaging van het piekvermogen en de daarbij horende geldelijke besparingen over een periode van 15 jaar zijn afgezet tegen de benodigde investeringen. Voor de scenario's met flexibel ventileren en slim laden was er geen informatie over de benodigde investering. Er is daarom (terug)gerekend wat de maximale investering kon zijn om een NCW van nul op te leveren (we spelen dan quitte). Daarbij is de Netto Contante Waarde (NCW) van investeringen en besparingen berekend. De resultaten zijn samengevat in Tabel 6. In de concepten 1-7 (zwarte tekst) is de grootte van de bouwstenen geoptimaliseerd naar de hoogste NCW.

Tabel 6: Doorgerekende optimalisatieconcepten met verschillende combinaties van bouwstenen. In de concepten 1-7 (zwarte tekst) is de grootte van de bouwstenen geoptimaliseerd naar de hoogste NCW. Discontovoet in de NCW berekeningen 2%/ jaar.

Nr.	Optimalisatieconcept	Investering [k€]				Piek-vermogen [MW]	NCW [k€]
		flex vent	slim laden	accu's	PV		
	BAU					36,2	
1	50.000 m ² PV	0	0	0	8.574	35,9	721
2	Slim laden	0	6.064	0	0	28,3	0
3	Slim laden + 60.000 m ² PV	0	6.064	0	10.286	28,3	781
4	Flexibel ventileren	3.975	0	0	0	31,7	0
5	Flexibel ventileren + 60.000 m ² PV	3.975	0	0	10.126	31,7	773
6	Flexibel ventileren + Slim laden	10.116		0	0	24,1	0
7	Flexibel ventileren + Slim laden + 60.000 m ² PV	10.116		0	10.251	24,1	779
8	Flexibel ventileren + Slim laden + 5MW accu's	10.116		1.786	0	24,1	-2.065
9	Flexibel ventileren + Slim laden + 17 MW accu's	10.116		6.001	0	24,1	-6.165
10	Flexibel ventileren + 17 MW accu's	3.975	0	6.001	0	31,7	-6.169
11	Flexibel ventileren + 6MW accu's + 60.000k m ² PV	3.975	0	2.144	10.080	31,7	-1.534
12	Slim laden + 24 MW accu's	0	6064	8.501	0	27,6	-8.003
13	24 MW accu's	0	0	8.501	0	35,2	-8.003

Scenario nr.1 met 50.000 m² PV heeft een positieve Netto Contante Waarde (rechter kolom), wat betekent dat dit vanuit investeringsoogpunt een aantrekkelijk scenario is.

De positieve waarde wordt echter bepaald door de beschikbare subsidies (5 €/kWh) voor PV panelen, terwijl het piekvermogen er niet door wordt verlaagd. De reden voor dat laatste is dat de opbrengst van de PV panelen te laat op de dag komt om de ochtendpieken in de vraag te kunnen verlagen.

Voor het slim laden concept is een investering van 6.1 M€ mogelijk om op een NCW van nul uit te komen. Voor flexibel ventileren, dat in een iets hoger maximaal vermogen resulteert, is een investering van 4.0 M€ mogelijk om op een NCW van nul uit te komen. Voor de combinatie van beiden is een investering van 10.1 M€ mogelijk om op een NCW van nul uit te komen. Toevoegen van PV aan deze concepten verhoogt de NCW aanzienlijk, maar dat komt door de beschikbare subsidies voor PV-panelen.

Bij de concepten 8-13 zijn er accu's van verschillende grootte toegevoegd. Hoewel die het piekvermogen verlagen zijn de investeringen ervan zo groot dat de besparingen er niet tegen opwegen: de NCW is in alle gevallen negatief. Overigens zijn in deze concepten de componenten niet geoptimaliseerd naar maximale NCW.

8 Discussie

In dit hoofdstuk kijken we kritisch naar wat we hebben gedaan en hoe.

8.1 Gebruikte tijdreeksen

De resultaten en conclusies vallen of staan met de correctheid van de berekende tijdreeksen voor de warmtevraag, koelvraag, elektriciteit voor verlichting en apparatuur en elektrische voertuigen.

De warmtevraag is getoetst aan gemeten warmtevraag van (een deel van) Gebied 11 en de resultaten komen redelijk tot goed overeen. Echter, enige bescheidenheid hierover is op zijn plaats, gezien de grote invloed van ventilatie op de warmtevraag en het ontbreken van harde gegevens hierover.

De elektriciteitsvraag voor verlichting en apparatuur van een gebouw is vergeleken met die van een bestaand vergelijkbaar gebouw en die tijdreeksen kwamen ook goed overeen.

De gesimuleerde tijdreeksen voor koeling zijn minder zeker dan die voor verwarming aangezien koeling mede afhangt van het gebruik van zonwering en het openen van ramen, hetgeen niet in detail en enkel niet-dynamisch is meegenomen in de simulaties. Ook zijn de setpoint temperaturen voor koeling voor alle gebouwen met koeling gelijk verondersteld (tussen 22 en 24°C voor gebouwen met full airconditioning, tussen 24 en 26°C voor gebouwen met topkoeling) terwijl hier geen informatie over was (of binnen het kader van deze haalbaarheidsstudie te verkrijgen was). Tenslotte is een vaste COP voor koeling van 2.5 aangehouden.

Bovendien hebben we de tijdreeksen voor koelvraag niet kunnen valideren aan de hand van gemeten tijdreeksen. Enkel de berekende jaarlijkse koelvraag van de gebouwen is vergeleken met een benchmark.

De verwachting is echter dat ander gebruik van zonwering, ramen of andere setpoint temperaturen de koelvraag weliswaar zal veranderen, maar dat dat vooral effect zal hebben op de breedte van de koelpiek in de middag of het tijdstip ervan, maar niet op de hoogte van de koelpiek. In de huidige berekening blijken de pieken in het totale elektriciteitsgebruik in de zomer lager te zijn dan in de winter. De zomerpieken zijn daarom niet de kritieke factor.

8.2 Gebruikte tools

De gebruikte implementatie van de bouwstenen voor reductie van de pieken zijn benaderingen van verfijnde eventueel werkelijk toe te passen instrumenten. Dit gebeurt op basis van uurlijkse waarden, terwijl voor de berekening van pieken eerder kwartierwaarden gebruikt dienen te worden.

De bouwstenen 'flexibel ventileren' en 'slim laden' van elektrische voertuigen is ook redelijk grof gemodelleerd. Binnen het kader van deze haalbaarheidsstudie was het niet haalbaar om verfijndere instrumenten te gebruiken zoals de 'Powermatcher' ©. [Pruissen, 2010]. Deze werkt met een prijsmechanisme, waardoor de prijzen stijgen bij schaarser aanbod of als de totale vraag in de buurt van het toegestane maximum komt). Door de hogere prijzen neemt de vraag af.

8.3 Opbrengsten van piekverlaging

Voor een grondige analyse van de economische haalbaarheid van de concepten zou ook de mogelijke bijsturing van de stabiliteit van het net en handel op de spotprijzenmarkt meegenomen moeten worden. Daarbij moet een slimme laad/ontlaadstrategie voor batterijen ook de mate van veroudering door laad/ontlaadcycli meenemen, alsmede een vorm van weersvoorspelling om te voorkomen dat de accu's worden gebruikt om relatief lage pieken af te vlakken en daardoor uitgeput zijn voor het scheren van latere hogere pieken. Deze analyse valt echter buiten het kader van deze haalbaarheidsstudie.

9 Conclusies, aanbevelingen, spin-off

9.1 Conclusies

De resultaten geven aanleiding tot de volgende conclusies.

- Toepassen van PV-panelen is interessant met de huidige elektriciteitsprijzen en het huidige subsidieregime. De grote positieve invloed van de PV-business case vertroebelt enigszins de business case van de andere maatregelen als die met het toepassen van PV-panelen worden gecombineerd.
- Daarentegen is het toepassen van PV panelen nauwelijks effectief om de hoogste piek in de jaarlijkse elektriciteitsvraag te verlagen omdat de opbrengst van de PV-panelen te laat op de dag komt om de ochtendpieken in de winter te kunnen verlagen.
- Afgezien van PV-panelen lijken flexibel ventileren van een gebouw en slimme laad-strategieën voor elektrische voertuigen de meest interessante manieren om pieken in elektriciteitsvraag te scheren. Om over een periode van 15 jaar hiermee winst te kunnen maken, zijn de maximale investeringen bij de huidige prijzen hiervoor respectievelijk ~4,0 M€ en 6,1 M€.
- Accu's zijn effectief in het reduceren van de pieken. Echter, de hiervoor bereikte verlaging van de pieken en bijbehorende kostenbesparingen (verlaging contractvermogen en vermijden netverzwaring) wegen bij de huidige prijzen niet op tegen de benodigde investering. De prijs van accu's zou minstens een factor 5 moeten zakken om in combinatie met slimme regelingen een positieve business case op te leveren.
- Inzet van accu's van EV's voor het opvangen van pieken in de elektriciteitsvraag (dus ook ontladen van die accu's) is in de huidige scenario's niet meegenomen omdat extra laad/ontlaad cycli de levensduur van de accu's verlagen. Echter, indien autofabrikanten een garantie afgeven voor de levensduur van een accu komt op die manier een grote accu-capaciteit gratis beschikbaar. Dit is niet verder onderzocht omdat het slim (ont)laden scenario daarmee aanzienlijk complexer wordt.
- Introductie van een systeem om de verwarmingen van de afzonderlijke gebouwen in de ochtend gespreid te starten teneinde de ochtendpieken te scheren heeft niet zoveel zin omdat dit momenteel in de praktijk al lijkt te gebeuren in Gebied 11. Echter, indien gebouwen wel (min of meer) op hetzelfde moment starten met verwarmen, zou dat een hoge piekvraag in de ochtend opleveren, die zeker de moeite van het scheren waard is.
- Spreiden van de koelvraag in de zomer om middagpieken te scheren heeft beperkt effect op de jaarpieken omdat de zomerpieken lager zijn dan de winterpieken.
- Voor een grondige analyse van de economische haalbaarheid van de concepten zouden echter ook andere financiële opbrengsten meegenomen moeten worden zoals de mogelijke bijsturing van de stabiliteit van het net en handel op de spotprijzenmarkt. Deze analyse valt echter buiten het kader van deze haalbaarheidsstudie.

9.2 Aanbevelingen voor Gebied 11

Aan de vereniging van Eigenaren bedrijventerrein Delftechpark, TU Delft campus, TNO, en Sweco kunnen de volgende aanbevelingen worden gedaan:

- Inzet van PV panelen is vanuit financieel oogpunt een goede zet. Met de huidige elektriciteitsprijzen en het huidige subsidieregime is er zelfs geen optimum: hoe meer PV-panelen des te beter de business case.
- Inzet van accu's voor het bufferen van (onder meer) de met PV-panelen opgewekte elektriciteit wordt vanwege de prijs momenteel afgeraden.
- Toepassen van flexibel ventileren van een gebouw is een interessante manier om pieken in de elektriciteitsvraag te scheren. Om over een periode van 15 jaar hiermee winst te kunnen maken, zijn de maximale investeringen bij de huidige prijzen hiervoor ca.4 M€.
- Toepassen van slimme laad-strategieën voor elektrische voertuigen is eveneens een interessante manier om pieken in de elektriciteitsvraag te scheren. Voor een toekomstige situatie met 4000 EV's en 1000 laadpalen, zijn de maximale investeringen bij de huidige prijzen hiervoor ca. 6,1 M€.
- Zelfs indien wordt besloten niet te investeren in slimme laadstrategieën, wordt aanbevolen om de toe te passen laadpalen in elk geval 'smart enabled' te laten zijn, teneinde de mogelijkheid open te houden in de toekomst alsnog EV's slim te laden.

9.3 Bijdrage aan de doelstellingen van de regeling

De technologie en dienst is gericht op het verduurzamen van gebieden en dan specifiek bedrijventerreinen. Er wordt ingesprongen op het lokaal benutten van duurzaam opgewekte energie, waarbij netverzwaring wordt voorkomen. Hierbij wordt de business case vergroot van deze toepassing in de utiliteit zonder subsidies en kunnen de energielasten van gebouwen worden verkleind.

De inzichten kunnen ook worden toegepast in de diensten van SWECO. Hierdoor ontstaat een breder pallet aan toepasbare technologieën die SWECO kan aanbieden op basis van een beter inzicht in de mogelijkheden de vraag te flexibiliseren. Met de huidige dienst SWECO Energy Profiler worden al besparingen tot 30% op het energieverbruik behaald. TNO kan met de ontwikkelde modellen en inzicht in technologieën zijn klanten beter bedienen.

9.4 Mogelijkheden voor spin off en vervolgactiviteiten

De ontwikkelde modellen en tools bieden mogelijkheden voor vervolgactiviteiten

- Energiebesparingen door vermijden van verspillingen.
In dit project bleek uit de vergelijking tussen de met de gebouwmodellen berekende profielen (tijdreeksen) van de warmtevraag en de gemeten profielen van Gebied 11 dat er 's nachts en in het weekend een warmtevraag is die aanzienlijk hoger is dan verwacht. Hoewel dat in dit project niet verder is onderzocht, biedt dit mogelijkheden voor verdere analyse en oplossingen (verlagen setpoint temperatuur buiten kantooruren, verminderen van warmteverliezen in warmtenetwerk etc.)

Datzelfde kan worden toegepast op andere energievormen (koelvraag, elektravraag) en is toepasbaar op andere bedrijventerreinen en ook woonwijken.

- Met de gebouwmodellen kan op eenvoudige wijze worden bepaald wat het effect op de warmte- en koelvraag is (profielen, pieken, gemiddelden, jaartotalen) bij een renovatie van de gebouwworraad, bijvoorbeeld door een verbetering van de gebouwschil (thermische isolatie, luchtdichtheid). Ook dat is in dit project niet verder onderzocht, en hetzelfde kan worden toegepast op andere bedrijventerreinen en ook woonwijken.
- De mogelijkheden van 'peak shaving' kunnen met de ontwikkelde modellen en tools ook op andere bedrijventerreinen worden toegepast. De verwachting is dat kansrijke maatregelen voor Gebied 11, zoals slim laden van elektrische voertuigen, ook elders toepasbaar zijn.

Voor meer informatie gelieve contact op te nemen met:

- Frans Koene, TNO (frans.koene@tno.nl)
- Cor Kleinveld, SWECO (cor.kleinveld@sweco.nl)

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

10 Referenties

Koene, F.G.H., et al., Simplified building model of districts, Conference Proceedings IBPSA BauSIM2014, 2014

Meijer, P.H., Energieverbruik per functie voor SenterNovem, Meijer Energie & Milieumanagement B.V., 2009

Pennartz, A.M.G., Het elektrisch energieverbruik van koelinstallaties in Nederland en de aanwezige hoeveelheid koudemiddelen per sector, 19 januari 2011, KWA Bedrijfsadviseurs B.V. Rapportnummer 2907790DR01

Sipma, J. (2016 januari). Nieuwe benchmark energieverbruik utiliteitsgebouwen en industriële sectoren. ECN, 11.

Intelligent warmtenet campus TU Delft, Proeftuinen Intelligente Netten - Resultaten september 2015, RVO publicatie september 2015

O.P. van Pruissen, I.G. Kamphuis, Suppressing Peak Load at simultaneous demand of electric heating in residential areas, Contribution to the 1st International ICST Conference on E-Energy, Athens, Greece, 15 October 2010

KNMI <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/uurgegevens>

Energie makelaar <http://www.energie-makelaar.com>

11 Ondertekening

Delft, Maart 2018

TNO



E.D. Nennie
Research Manager
Heat Transfer and Fluid Dynamics



F.G.H. Koene
Auteur

12 Annex A – Karakteristieken van 86 gebouwen

nr.	Adres	bouwj	Functie	gebruiks- opp	verdiep index	therm. massa	therm. isolatie	glas%	koeling
				[m ²]	[-]	(L/Z)	(G/M/S)		[W/m ²]
1	van Mourik Broekmanweg	2002	kantoorfunctie	8770	2	Z	G	21%	60
2	Electronicaweg 2	2001	kantoorfunctie	2470	2	Z	M	34%	60
3	Delftechpark 9	1994	kantoorfunctie	3300	2	Z	M	25%	30
4	Julianalaan	1956	onderwijsfunctie	4866	2	Z	S	50%	-
5	kanaalweg	1894	kantoorfunctie	3810	2	Z	S	50%	30
6	mijnbouwstraat	1912	onderwijsfunctie	1180	2	Z	S	40%	-
7	zuidplantsoen	1945	onderwijsfunctie	29694	2	Z	S	50%	-
8	zuidplantsoen	1930	onderwijsfunctie	1068	1	Z	S	5%	-
9	prins bernhardlaan	1945	onderwijsfunctie	24602	1	Z	S	30%	-
10	mekelweg	1981	kantoorfunctie	164	1	Z	M	20%	30
11	jaffalaan	1961	onderwijsfunctie	7177	2	Z	S	20%	-
12	jaffalaan	1968	onderwijsfunctie	10070	2	Z	S	30%	-
13	rotterdamseweg	2009	onderwijsfunctie	17975	2	Z	M	70%	60
14	landbergstraat	1955	onderwijsfunctie	34220	3	Z	S	25%	-
15	leeghwaterstraat	1957	onderwijsfunctie	22020	3	Z	S	40%	-
16	rotterdamseweg	2009	onderwijsfunctie	10448	3	Z	M	85%	60
17	rotterdamseweg	1957	onderwijsfunctie	14630	2	Z	S	30%	-
18	leeghwaterstraat	2010	kantoorfunctie	1304	1	L	G	20%	60
19	cornelis drebbelweg	1945	onderwijsfunctie	7342	1	Z	S	35%	-
20	leeghwaterstraat	1951	onderwijsfunctie	3285	2	Z	S	10%	-
21	leeghwaterstraat	1976	onderwijsfunctie	3194	1	Z	S	25%	-
22	leeghwaterstraat	2011	kantoorfunctie	1764	1	Z	G	25%	60
23	Feldmannweg	1972	onderwijsfunctie	46376	4	Z	S	50%	-
24	mekelweg	1966	onderwijsfunctie	13092	2	Z	S	40%	-
25	prometheusplein	1994	onderwijsfunctie	14971	1	Z	M	95%	30
26	lorentzweg	1963	onderwijsfunctie	13092	2	Z	S	50%	-
27	stieltjesweg	2007	onderwijsfunctie	11697	2	Z	M	25%	60
28	stieltjesweg	2003	kantoorfunctie	14289	2	L	M	70%	60
29	pieter calandweg	1975	onderwijsfunctie	54801	3	Z	S	35%	-
30	stevinweg	1963	onderwijsfunctie	2110	1	Z	S	35%	-
31	stevinweg	1964	onderwijsfunctie	4026	2	Z	S	30%	-
32	pieter calandweg	1994	onderwijsfunctie	5132	2	Z	M	20%	30
33	nc kistweg	2007	onderwijsfunctie	189	1	Z	M	20%	60
34	mekelweg	2010	onderwijsfunctie	9156	1	Z	G	10%	60
35	mekelweg	1995	onderwijsfunctie	2627	2	Z	M	5%	30
36	van den broekweg	2017	kantoorfunctie	225	1	Z	G	15%	60
37	schoemakerstraat	2005	kantoorfunctie	15869	3	Z	M	45%	60
38	computerlaan	2012	kantoorfunctie	1582	2	Z	G	55%	60
39	computerlaan	2000	kantoorfunctie	4727	2	Z	M	20%	-
40	Delftechpark	2013	kantoorfunctie	1106	2	Z	G	50%	60

nr.	Adres	bouwj	Functie	gebruiks- opp [m ²]	verdiep index [-]	therm. massa (L/Z)	therm. isolatie (G/M/S)	glas%	koeling [W/m ²]
41	Delftechpark	2000	kantoorfunctie	2746	2	L	M	55%	-
42	informaticalaan	2001	kantoorfunctie	3821	3	Z	M	35%	60
43	informaticalaan	2002	kantoorfunctie	4005	2	Z	M	30%	60
44	Delftechpark	1999	kantoorfunctie	2068	2	L	M	40%	30
45	Delftechpark	2001	kantoorfunctie	1869	2	L	M	50%	60
46	Delftechpark	2000	kantoorfunctie	857	2	Z	M	35%	-
47	Delftechpark	2001	kantoorfunctie	870	1	Z	M	20%	60
48	Delftechpark	1972	kantoorfunctie	6844	2	Z	S	65%	30
49	Delftechpark	2008	kantoorfunctie	1529	2	Z	M	50%	60
50	Delftechpark	2003	kantoorfunctie	9000	4	L	M	50%	60
51	Electronicaweg	1995	kantoorfunctie	1713	2	Z	M	20%	30
52	Electronicaweg	1997	kantoorfunctie	429	2	L	M	5%	30
53	Electronicaweg	1998	kantoorfunctie	592	2	Z	M	10%	30
54	Electronicaweg	1999	kantoorfunctie	670	2	Z	M	45%	30
55	Electronicaweg	2000	kantoorfunctie	831	1	L	M	20%	-
56	Electronicaweg	1999	kantoorfunctie	1019	2	L	M	45%	30
57	Delftechpark	1998	kantoorfunctie	1039	2	L	M	30%	30
58	Delftechpark	2003	kantoorfunctie	4872	4	Z	M	25%	60
59	Delftechpark	2001	kantoorfunctie	2814	2	Z	M	60%	60
60	Electronicaweg	1996	kantoorfunctie	1326	2	L	M	20%	30
61	Electronicaweg	1997	kantoorfunctie	1466	1	Z	M	25%	30
62	Electronicaweg	1999	kantoorfunctie	1420	2	Z	M	10%	30
63	Electronicaweg	1998	kantoorfunctie	1970	2	Z	M	20%	30
64	Electronicaweg	2003	kantoorfunctie	1381	2	L	M	10%	60
65	Electronicaweg	1999	kantoorfunctie	2927	2	Z	M	20%	30
66	molengraaffsingel	2010	kantoorfunctie	17214	2	L	G	15%	60
67	molengraaffsingel	2016	kantoorfunctie	4760	3	Z	G	30%	60
68	molengraaffsingel	2014	kantoorfunctie	6049	2	Z	G	50%	60
69	molengraaffsingel	2010	kantoorfunctie	9515	2	Z	G	50%	60
70	kluysterweg	1965	onderwijsfunctie	14971	4	Z	S	25%	-
71	kluysterweg	1965	onderwijsfunctie	44489	2	Z	S	75%	-
72	kluysterweg	1997	onderwijsfunctie	953	2	Z	M	50%	30
73	kluysterweg	2009	onderwijsfunctie	4572	2	Z	M	15%	60
74	kluysterweg	1983	onderwijsfunctie	2625	1	Z	M	5%	-
75	mekelweg	1963	onderwijsfunctie	10801	2	Z	S	20%	-
76	van der maasweg	2016	onderwijsfunctie	27699	2	Z	G	35%	60
77	kluysterweg	1968	onderwijsfunctie	1370	1	Z	S	50%	-
78	rotterdamseweg	1991	kantoorfunctie	7918	2	L	M	25%	30
79	heertjeslaan	2012	kantoorfunctie	7300	2	Z	G	5%	60
80	heertjeslaan	2012	kantoorfunctie	2357	3	L	G	10%	60
81	rotterdamseweg	1969	kantoorfunctie	6407	2	L	S	5%	30
82	boussinesqweg	2012	kantoorfunctie	4843	2	L	G	50%	60
83	boussinesqweg	1970	kantoorfunctie	12858	1	L	S	20%	30
84	boussinesqweg	1970	onderwijsfunctie	1871	1	Z	S	40%	-
85	rotterdamseweg	1979	onderwijsfunctie	2983	2	Z	S	35%	-
86	thijssseweg	2005	onderwijsfunctie	12250	3	Z	M	50%	60