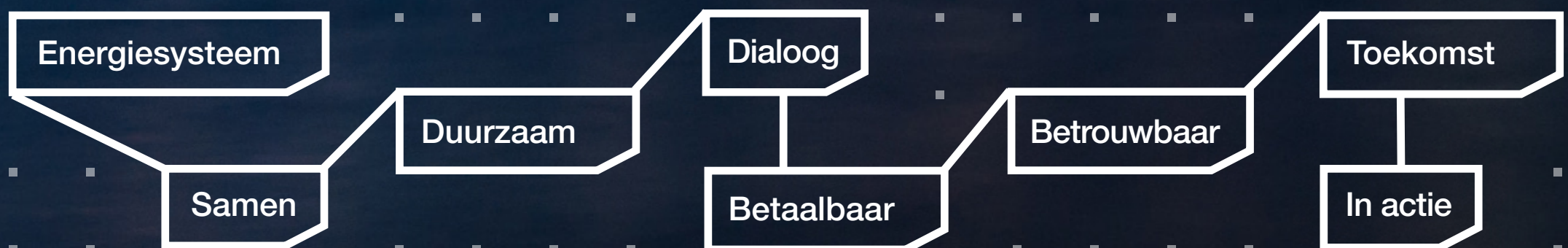


TenneT
E-Top

Elektrificatie en Vraagprofiel 2030

Rapport experttraject TenneT E-Top



Elektrificatie en Vraagprofiel 2030

Rapport experttraject TenneT E-Top

Dit rapport is geschreven door:

Frans Rooijers, Chris Jongma, Emma Koster, Fenneke van de Poll, Joram Dehens, Jacobine Aalberts, Denise Hilster, Eric Tol, Thijs Scholten, Joeri Vendrik

Delft, CE Delft, september 2020

Publicatienummer: 20.190446.116

Elektriciteitsvoorziening / Vraag / Productie / Toekomst / Gebouwde omgeving / Mobiliteit / Industrie / Glastuinbouw / Datacenters / Grondstoffen / Prognoses

Opdrachtgever: TenneT TSO B.V. - Gert van der Lee

Alle openbare publicaties van CE Delft zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider [Frans Rooijers](#) (CE Delft)

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft

Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Inhoud

	Begrippen en afkortingen	4
	Voorwoord	5
	Samenvatting	6
1	Inleiding	10
	1.1 Achtergrond TenneT E-Top	10
	1.2 Doel werkgroep elektrificatie	10
	1.3 Aanpak	10
	1.4 Leeswijzer	11
2	Huidige elektriciteitsvraag en productie	12
3	Gebouwde omgeving	14
	3.1 Scope en huidige vraag deelsectoren	14
	3.2 Potentieel elektrificatie	15
	3.3 Kenmerken vraagprofielen	25
	3.4 Flexmogelijkheden	33
	3.5 Conclusie	34
4	Mobiliteit	37
	4.1 Scope en huidige vraag deelsectoren	37
	4.2 Potentieel elektrificatie	38
	4.3 Factoren, barrières en kansen voor elektrificatie	50
	4.4 Laadprofielen	52
	4.5 Conclusie	58
5	Bedrijven	61
	5.1 Scope en huidige vraag deelsectoren	61
	5.2 Potentieel elektrificatie industrie	62
	5.3 Glastuinbouw	69
	5.4 Datacenters	70
	5.5 Feedstock industrie (waterstof uit elektrolyse)	71
	5.6 Kenmerken vraagprofiel	72
	5.7 Flexmogelijkheden	77
	5.8 Conclusie	77
6	Match vraag en productie 2030	80
	6.1 Hernieuwbare elektriciteitsproductie in 2030	80
	6.2 Gezamenlijke volumes en patroon elektrificatie sectoren	84
	6.3 Overschotten en tekorten	90
	6.4 Flexibiliteit	93
	6.5 Conclusies	98



	Literatuur	100
A	Glastuinbouw	108
	A.1 Scope en huidige vraag	108
	A.2 Potentieel elektrificatie	108
	A.3 Factoren en barrières voor elektrificatie	109
	A.4 Potentieel 2030	110
	A.5 Tijdslijn tot 2030 en doorkijk naar 2050	112
B	Datacenters	114
	B.1 Scope en huidige vraag	114
	B.2 Potentiële additionele elektriciteitsvraag	114
	B.3 Factoren/barrières	114
	B.4 Potentieel 2030	115
	B.5 Grote onzekerheid	115
C	Feedstock industrie	116
	C.1 Omschrijving feedstock industrie	116
	C.2 Inschatting feedstock industrie voor selecte toepassingen	117
	C.3 Totale elektriciteitsvraag per cluster	122

Begrippen en afkortingen

BEV	Battery Electric Vehicle (elektrisch voertuig met batterij)
Blauwe waterstof	Waterstof geproduceerd uit aardgas met CCS
Bpm	Belasting van personenauto's en motorrijwielen
CCS	Carbon Capture and Storage (afvang en opslag van CO ₂)
COP	Coefficient of Performance (warmteproductie per eenheid elektriciteit)
CCU	Carbon Capture and Usage (afvang en hergebruik van CO ₂)
EER	Energy Efficiency Ratio (koudeproductie per eenheid elektriciteit)
EU ETS	European Union Emission Trading System, het Europees emissiehandelssysteem voor elektriciteitsopwekkers en industrie
Feedstock	Grondstof voor industriële processen (bijvoorbeeld methaan als grondstof)
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (voertuig tankt waterstof, aandrijving elektrisch met brandstofcel)
GJ	GigaJoule (10 tot de macht 9)
Groengas	Biogeen gas op aardgaskwaliteit (kan tot 100% worden bijgemengd bij aardgas)
Groene waterstof	Waterstof geproduceerd uit hernieuwbare energie
Grijze waterstof	Waterstof geproduceerd uit fossiele energie
GW	Gigawatt (10 tot de macht 9)
HT	Hoge Temperatuur
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
KA	Klimaatakkoord
KEV	Klimaat- en Energie Verkenning
kton	Kiloton
kW	Kilowatt
LT	Lage Temperatuur
MJ	Megajoule (10 tot de macht 6)
Mrb	Motorrijtuigenbelasting (wegenbelasting)
MT	Midden Temperatuur
Mton	Megaton (10 tot de macht 6)
MW	Megawatt (10 tot de macht 6)
OV	Openbaar Vervoer
P2H	Power-to-Heat: directe omzetting van elektriciteit in warmte
PBL	Planbureau voor de Leefomgeving
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PJ	PetaJoule (10 tot de macht 15 Joule)
RES	Regionale EnergieStrategie
SDE	Stimulering Duurzame Energie
SPF	Seasonal Performance Factor
TCO	Total Cost of Ownership
TWh	Terawattuur = miljard kWh= 3,6 E12 Joule
Vraagprofiel	Een profiel dat aangeeft wat het gevraagde elektrisch vermogen is voor ieder uur van de dag/maand/jaar
Wkk	Warmtekrachtkoppeling (installatie die zowel elektriciteit als warmte produceert)
Wko	Warmtekoudeopslag
WoL	Wind op Land
WoZ	Wind op Zee
ZE	Zero Emissie
Zon-pv	Zon-photovoltaic (elektriciteitsproductie middels zonnepanelen)



Voorwoord

Doel en aanpak

TenneT wil de energietransitie versnellen door jaarlijks een E-Top te laten plaatsvinden. Op de E-Top 2019 zijn twee thema's geselecteerd om verder uit te diepen in een werkgroep ten behoeve van de E-TOP 2020. Dit rapport beschrijft het resultaat van de werkgroep 'Elektrificatie en het Toekomstige Vraagprofiel'.

De werkgroep heeft in drie expertsessies bekeken wat het potentieel is voor nuttige elektrificatie, wat de belangrijkste factoren en barrières zijn om dit potentieel te realiseren en hoe het vraagpatroon van deze nieuwe elektriciteitsvraag eruit ziet. Parallel aan de expertsessies heeft CE Delft eigen onderzoek gedaan om deze vragen te beantwoorden.

We danken de deelnemers aan de werkgroep voor hun bijdragen:

Gebouwde Omgeving

Marco Bijkerk - Remeha
Jan Feijes - Deerns
Vera Haaksma - Gemeente Utrecht
Piet Nienhuis - Gasunie Transport Services
Paula Schulze - Gemeente Utrecht
Peter Wagener - BDH

Mobiliteit

Onoph Caron - Stichting E-Laad
Roland Ferwerda - NKL Nederland
Maarten Linnenkamp - MRA-Elektrisch
Suzan Reitsma - RVO
Roland Steinmetz - EV Consult

Industrie

Piet Broekharst - Glastuinbouw Nederland
Roeland Manders - Engie
Dirk-Jan Meuzelaar - USG Chemelot
Walter Ruijgrok - Energie-Nederland
Klaas Vos - FrieslandCampina
Bart Wesselink - NVDE



Samenvatting

Elektrificatie van de energievraag kan een belangrijke mogelijkheid zijn om de CO₂-emissie te beperken. De potentiële extra elektriciteitsvraag als gevolg van elektrificatie¹ in de komende 10 jaar bedraagt 15 tot 68 TWh/jaar, onderverdeeld naar de verschillende deelsectoren, zoals is weergegeven in Tabel 1. Het uitgangspunt hierbij is het Klimaat-akkoord zichtjaar 2030. Het minimale en maximale potentieel is bepaald aan de hand van kosten, baten en de geïdentificeerde barrières. De vraag door elektrificatie neemt fors toe, maar wordt gedempt door efficiëntieverbetering in alle sectoren. In het Klimaatakkoord-scenario neemt de totale vraag toe met zo'n 25 TWh (+21%)² ten opzichte van 122 TWh in 2018.

Tabel 1 - Potentiële additionele elektriciteitsvraag in 2030 in TWh/j per sector voor een gemiddeld weerjaar

TWh/jaar	Minimaal	Klimaatakkoord	Maximaal
Gebouwde Omgeving	3,9	5,2	5,7
Mobiliteit	1,9	6,9	12,3
Industrie	7,7	15,1	25,6
Glastuinbouw	-1,1	1,2	2,6
Datacenters	4,8	11,7	15,3
Feedstock industrie	1,0	3,4	7,3
Totaal t.g.v. elektrificatie	18	43	69
Basisvraag incl. efficiëntie	104	104	104
Totale vraag	122	147	173
Extra t.o.v. 2018	+0.3	+26	+51
	+0.3%	+21%	+42%

Het basisprofiel heeft een volume van 104 TWh/j. Het heeft een maximale vraag van 17,5 GW. Deze piekvraag wordt slechts sporadisch bereikt. Op een gemiddelde dag heeft het basisvraagprofiel een vraag van zo'n 8,5 GW in het dal en 14,5 GW op de piek. Door elektrificatie wordt de jaarpiek verhoogd naar ruim 24 GW. De belangrijkste factor hierbij is de inzet van elektrische boilers, airco's en elektrolyzers. Op de momenten dat deze ingezet worden is de hernieuwbare productie ook hoog, waardoor de residuele vraag (de elektriciteitsvraag minus hernieuwbare productie) op dat moment laag is. De maximale piek van de residuele vraag (de vraag na aftrek van de productie van elektriciteit uit zon en wind), bijna 22 GW, wordt veroorzaakt door een combinatie van de winterpiek ten gevolge van elektrische warmtepompen en lage hernieuwbare productie.

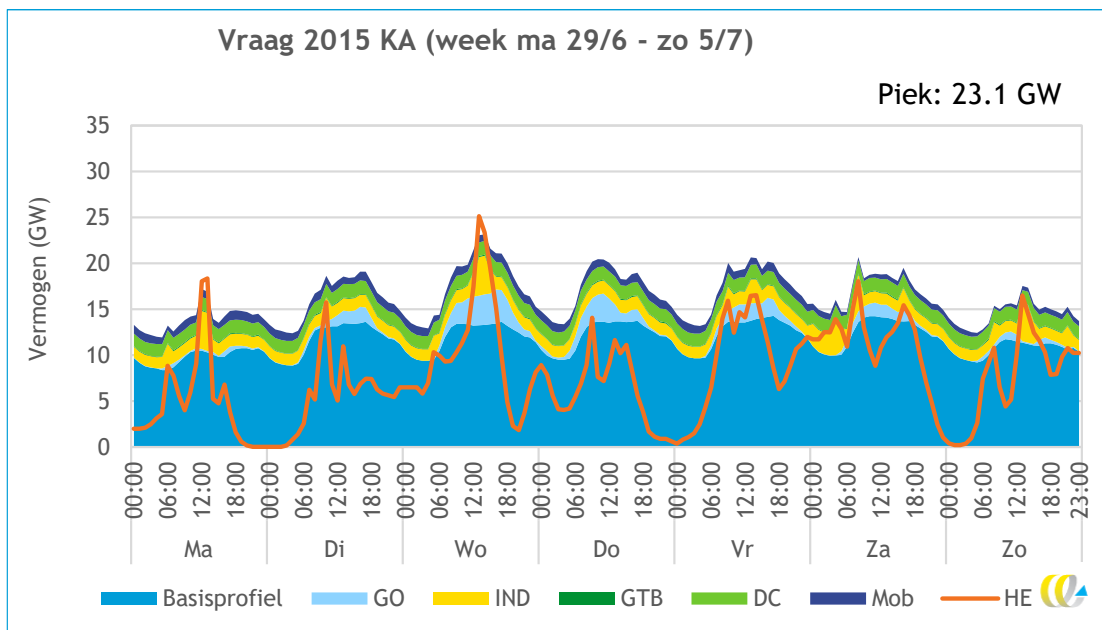
Van de 89 TWh elektriciteit uit zon/wind in het Klimaatakkoord-scenario, wordt 95% direct gebruikt, 5% leidt tot overschotten. Wanneer er in het Klimaatakkoord Plus-scenario nog meer hernieuwbare elektriciteit wordt geproduceerd, is de directe benutting van die extra productie slechts 50%. Wanneer extra productie gepaard gaat met een toename in de vraag door elektrificatie, is de directe benutting 77%.

¹ Het gaat om elektrificatie die vanuit maatschappelijk perspectief nuttig is, dus elektrificatie is geen doel op zich.

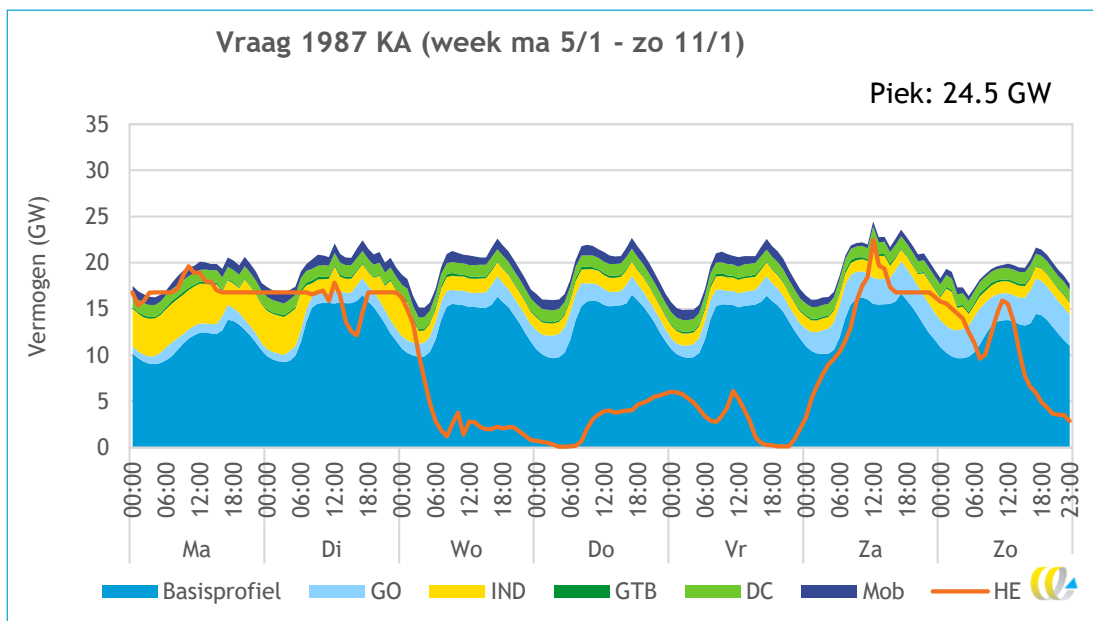
² De KEV vermeldt een elektriciteitsvraag van 118 TWh in 2030. Het verschil valt grotendeels te verklaren doordat het PBL niet uitgaat van vergaande elektrificatie van de industriële energievoorziening.



Figuur 1 - Totale elektriciteitsvraag/productie in GW voor week 26 van 2030 met weerjaar 2015



Figuur 2 - Totale elektriciteitsvraag/productie in GW voor week 2 van 2030 met weerjaar 1987



Figuur 1 laat de vraag en productie zien in een zomerweek, een hoge extra vraag vooral in de gebouwde omgeving, maar ook veel Hernieuwbare Energie (HE). In Figuur 2 is de eerste week in januari van een koud jaar getoond. Op maandag veel elektrificatie in de industrie omdat er veel HE-productie is, en een piekvraag op vrijdag die samenvalt met een HE-productie nihil.

De opgestelde vraagprofielen houden niet alleen rekening met welk moment van de dag de vraag optreedt, maar zijn ook specifiek gemaakt voor verschillende weerjaren (het gemiddelde weerjaar 2015 en het koude weerjaar 1987) en het isolatieniveau van het gebouw.

Gebouwde omgeving

Elektrificatie kan in de gebouwde omgeving plaatsvinden voor ruimteverwarming en -koeling, koken en warmtapwaterbereiding. Warmtepompen voor ruimteverwarming kunnen 3,2 TWh/j toevoegen aan de vraag in een gemiddeld jaar, voor een koud weerjaar tot 4,7 TWh/j. het kan leiden tot een extra vermogensvraag van 2,3-3,8 GW, juist op een moment dat er weinig hernieuwbare productie is. Koeling heeft met 0,1-0,2 TWh/j een bescheiden vraag op jaarbasis, maar heeft toch een flinke impact op zeer warme dagen, waar het zo'n 3,2 GW aan de vraag toe kan voegen. Dit valt goed samen met de opbrengst uit zon-pv op die momenten.

Mobiliteit

In de sector mobiliteit kan tot 2030 met name het wegvervoer sterk elektrificeren: personenauto's, bestelauto's, bussen en vrachtwagens in de stadslogistiek. De grootste extra elektriciteitsvraag komt hierbij van personenauto's (+4,4 TWh/j), gevolgd door bestelauto's (+3,8 TWh/j) en vrachtauto's (+1,8 TWh/j). Bij elkaar 10 TWh/j. Het is de verwachting dat tot 2030 ook een deel van de mobiele werktuigen kan worden geëlektrificeerd (+0,1 TWh/j). Daarnaast is er een additionele elektriciteitsvraag van bussen, binnenvaartschepen en bromfietsen/scooters. In het lange-afstandstransport vindt de transitie naar ZeroEmissie-vaar/voertuigen waarschijnlijk pas ná 2030 plaats. Hoewel individuele laadprofielen sterke pieken hebben, is het totale vraagprofiel van mobiliteit op landelijk niveau behoorlijk vlak. Slim laden biedt aanvullende mogelijkheden voor het beperken van pieken in laadprofielen van specifieke gebruikersgroepen en lokale situaties.

Bedrijven

De elektriciteitsvraag van datacenters neemt in alle gevallen sterk toe (5 tot 15 TWh/j extra), maar is afhankelijk van de toekomstige toename in dataverbruik en verbeteringen van de efficiëntie. De elektriciteitsvraag van de glastuinbouw groeit met name door toenemende belichting (-1,1 tot 2,7 TWh/j extra). De opties voor de industrie met de grootste impact zijn daarnaast elektrische boilers en fornuizen. Het vraagprofiel van de industrie is overwegend vlak. Een uitzondering geldt voor hybride boilers en elektrolyse die prijsgestuurd kunnen werken.

Waterstofproductie

De productie van waterstof middels elektrolyse heeft een groot potentieel, maar de verwachte realisatie is tot 2030 nog beperkt omdat de CO₂-prijs nog onvoldoende hoog is om waterstof uit elektrolyse concurrerend te maken met waterstof uit aardgas. Na 2030 is de potentie zeer groot, zowel voor toepassingen in de industrie als in mobiliteit en gebouwde omgeving.

Stimulansen en belemmeringen elektrificatie

Voor de gebouwde omgeving geldt dat als klimaatneutraal verwarmen/koelen de norm zou zijn, dat elektrificatie dan fors kan groeien. Maar de mogelijkheid om goedkoop aardgas te blijven gebruiken, zorgt ervoor dat dit niet snel gaat. Wet- en regelgeving, vooral bij nieuwbouw en renovatie, zorgen al wel voor nuttige elektrificatie, zowel in de woningbouw als de utiliteitsbouw.



Voor mobiliteit is de belangrijkste factor voor elektrificatie dat de techniek volwassen genoeg moet zijn voor dagelijks gebruik en de aanschafkosten laag genoeg zijn. Voor bedrijfsmatige toepassingen is de Total Cost of Ownership (TCO) belangrijker dan de aanschafkosten. Voor de meeste toepassingen in personenvervoer en stadslogistiek zal de TCO de komende vijf jaar concurrerend worden met fossiel, zeker gezien de fiscale voordelen die reeds gelden. Voor alle deelsectoren is de beschikbaarheid van laadinfrastructuur, en de snelheid waarmee een dekkend laadnetwerk kan worden gerealiseerd, een belangrijke factor voor elektrificatie van het wagenpark.

De belangrijkste barrière voor elektrificatie in de industrie is voor de meeste toepassingen de hogere prijs van elektriciteit ten opzichte van fossiele brandstoffen (inclusief de CO₂-prijs en energiebelasting), in combinatie met de noodzaak voor forse investeringen. De flexibele toepassingen, hybride boilers en elektrolyzers, kunnen wel inspringen op lage elektriciteitsprijzen, maar zijn voorlopig nog niet rendabel. Als de prijzen echter zodanig worden dat bedrijven grootschalig willen elektrificeren, dan vallen knelpunten in de elektrische infrastructuur te verwachten.

Match van vraag en productie in 2030

Het wegnemen van belemmeringen van met name elektrificatie die leidt tot een flexibele vraag, verdient prioriteit vanuit het beperken van de kosten voor het gehele elektriciteitssysteem. Voor de overblijvende vraag blijft er in alle scenario's een aanzienlijke hoeveelheid regelbaar vermogen (centrales, batterijen) nodig, ongeacht de hoeveelheid opgesteld vermogen aan zon en wind. Het benodigde regelbaar vermogen neemt bovendien toe naarmate er meer geëlektrificeerd wordt omdat ook als er weinig zon/wind is, toch in de vraag naar elektriciteit moet worden voorzien. In een gemiddeld weerjaar zal dat circa 24 GW zijn, in een extreem weerjaar zelfs 27 GW.

Het is niet de vraag óf elektrificatie plaats gaat vinden, maar wanneer en in hoeverre de vraag maximaal aansluit op het productieprofiel van zon/wind.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond TenneT E-Top

Met het aantreden van Manon van Beek als nieuwe CEO in 2018 wil TenneT een duidelijkere bijdrage leveren aan de energietransitie. Eén van de manieren waarop TenneT hier invulling aan geeft is door het houden van de E-Top, voor het eerst in 2019. De E-Top is een evenement waarop CEOs, senior experts en high potentials die een belangrijke rol spelen in de transitie van het energiesysteem samenkomen en nadenken over de problemen van morgen. Naar aanleiding van de E-Top 2019 heeft TenneT twee belangrijke thema's geïdentificeerd: 'Flexibiliteit en Warmte in de Gebouwde Omgeving' en 'Elektrificatie en het Toekomstige Vraagprofiel'. Voor elk thema is een werkgroep opgezet die in de aanloop naar de E-Top 2020 het thema verder onderzoekt.

1.2 Doel werkgroep elektrificatie

In de werkgroep elektrificatie zijn allereerst de mogelijkheden tot elektrificatie uitgediept voor drie sectoren: gebouwde omgeving, mobiliteit en industrie. Hierbij lag de focus op de ontwikkelingen tot 2030, waarbij een doorkijk tot 2050 is gegeven waar nuttig. De werkgroep is verder gegaan waar veel bestaande studies naar elektrificatie stoppen. Per sector is gekeken welke toepassingen het eerst geëlektrificeerd zullen gaan worden. Hierbij zijn diverse scenario's en profielen getest om een bandbreedte te kunnen geven van de extra belasting van de elektriciteitsnetten. En vervolgens is gekeken naar de effecten op het vraagprofiel voor elektriciteit.

Thema's die hierbij onder andere aan bod gekomen zijn:

- de temperatuurafhankelijkheid van de elektriciteitsvraag in de winter vanwege de elektrificatie van de warmtevoorziening binnen de gebouwde omgeving en van het personen- en vrachtvervoer;
- de temperatuurafhankelijkheid in de zomer vanwege airconditioning in de gebouwde sector;
- het effect van isolatie op de warmte- en koelvraag in de gebouwde omgeving;
- de match tussen de toekomstige elektriciteitsvraag en het toekomstige aanbod uit zonne- en windenergie;
- de vraag of en hoe het vraagpatroon per deelsector kan worden aangepast om de voorziene aanbodpatronen door de mix van (extra) zon- en windvermogen optimaal te kunnen matchen.

1.3 Aanpak

CE Delft werkte samen met expertpanels om de elektrificatie in beeld te brengen. Per sector is een panel van 3-5 experts samengesteld, die hebben deelgenomen aan drie sessies over de identificatie van de mogelijkheden per deelsector, het uitdiepen van de mogelijkheden, het benoemen van de kansen en bedreigingen, het potentieel per toepassing en het vraagpatroon per toepassing.

Voorafgaand aan de eerste sessie is een enquête onder de experts gehouden en een startnotitie opgesteld om het uitgangspunt te formuleren. Voorafgaand aan de tweede en derde sessie zijn diepte-interviews gehouden over de onderwerpen van de komende sessie en openstaande vragen uit de voorgaande sessie.

Als we het hebben over elektrificatie dan bedoelen we elektrificatie van bepaalde functies waarbij er sprake is van de laagste maatschappelijke kosten, het gaat om nuttige elektrificatie, niet om maximaal elektrificeren; het is geen doel op zich.

Voor het bepalen van het potentieel is het Klimaatakkoord als uitgangspunt genomen. Aan de hand van de geïdentificeerde barrières is een inschatting gemaakt van de minimaal en maximaal te verwachten extra elektriciteitsvraag.

Dit eindrapport bevat de onderzoeksresultaten van alle sectoren. De resultaten zullen gepresenteerd worden op de TenneT E-Top 2020. Naast het rapport is ook een dataset aan TenneT opgeleverd waarin de opgestelde vraagprofielen zijn verwerkt en waarmee op basis van extra of juist lagere elektrificatie per deelsector de effecten op het totale vraagpatroon zijn te zien. De grafieken in Hoofdstuk 6 zijn met dit Excelprogramma gemaakt.

1.4 Leeswijzer

Het rapport begint in Hoofdstuk 2 met een beknopte bespreking van de huidige elektriciteitsvraag en productie. Vervolgens wordt per sector het huidige energiegebruik besproken, de mogelijkheden voor elektrificatie en de barrières daarvoor, het potentieel in 2030 en de vraagprofielen per toepassing. In Hoofdstuk 3 wordt op deze manier de gebouwde omgeving besproken, in Hoofdstuk 4 mobiliteit en in Hoofdstuk 5 de industrie. In Hoofdstuk 6 bekijken we de elektriciteitsproductie in 2030 en voegen we alle extra elektriciteitsvraag en de vraagprofielen samen tot één gezamenlijk vraagprofiel. Daarnaast bekijken we de elektriciteitsopwekking uit zon en wind en de match van vraag en aanbod voor twee verschillende klimaatjaren.

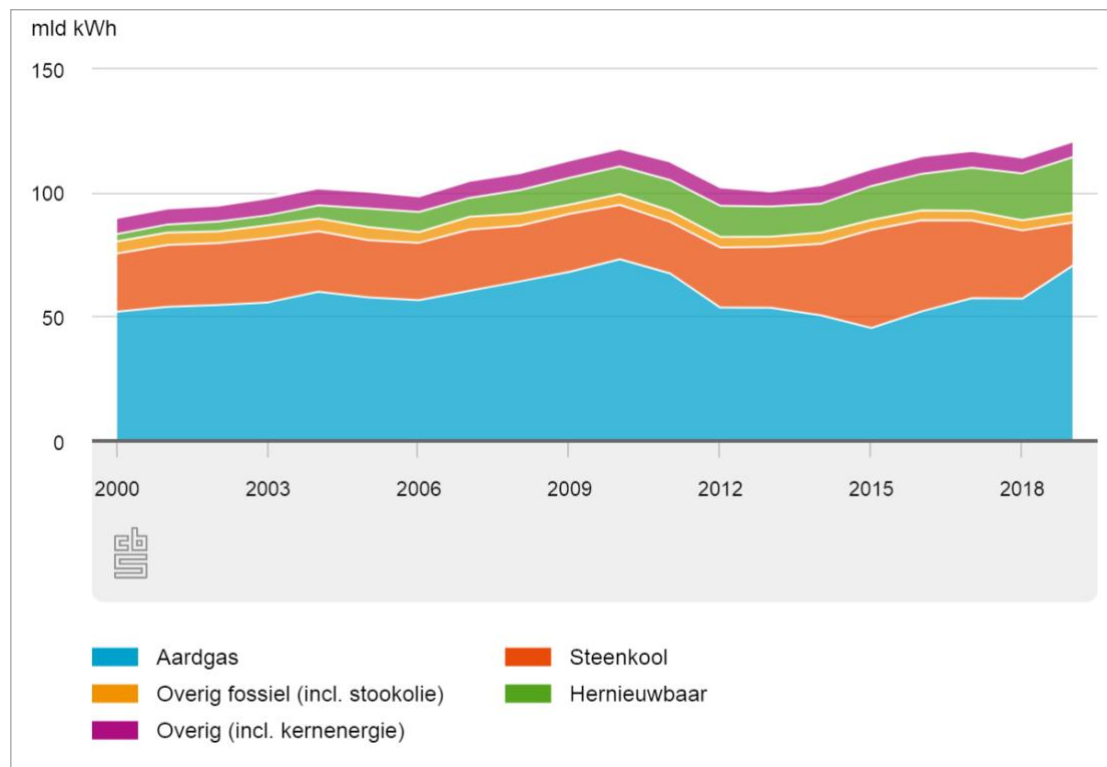
2 Huidige elektriciteitsvraag en productie

Als vertrekpunt voor de studie naar elektrificatie is het goed om eerst een beeld te schetsen van de huidige elektriciteitsvraag en de wijze van produceren.

In 2019 bedroeg de Nederlandse elektriciteitsproductie 121 TWh. Daarvan werd 19,5 TWh geëxporteerd, vooral naar België, het Verenigd Koninkrijk en Duitsland. Daartegenover stonden 20,4 TWh aan importen, waarvan 12 TWh uit Duitsland. Het totale verbruik komt hiermee op 121,9 TWh.

De Nederlandse productie bestond uit 19 TWh (16%) kolen, 70 TWh (59%) aardgas, 4,9 TWh (4,1%) biomassa, 11 TWh (9,7%) windenergie en 5,2 TWh (4,4%) zonne-energie, zie ook Figuur 3.

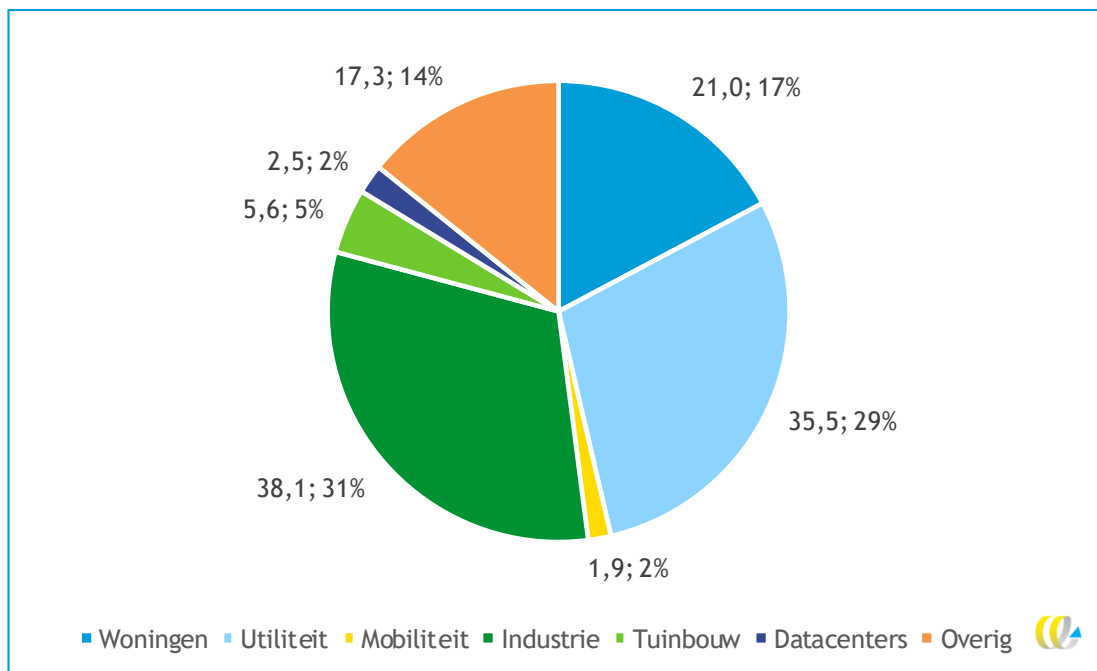
Figuur 3 - Elektriciteitsproductie naar energiedrager



Bron: (CBS, 2020b).

Het elektriciteitsverbruik per sector is weergegeven in Figuur 4. De sectoren die we in dit rapport beschouwen, gebruiken naar schatting zo'n 105 TWh, ofwel meer dan 85% van de totale elektriciteitsvraag van Nederland.

Figuur 4 - Geschat huidige elektriciteitsverbruik per sector in TWh/j en als aandeel van het totaal



Bron: Verbruik per sector zoals in dit rapport uitgelegd.

In de gebouwde omgeving is 19% van de huidige energievraag (650 PJ) een vraag naar elektriciteit (75 PJ), het overgrote deel is aardgas.

In de mobiliteitssector is 1,4% van de huidige energievraag (510 PJ) elektriciteitsvraag (7 PJ), het overgrote deel is benzine/diesel.

In de industrie is 21% van de huidige energievraag (800 PJ) een elektriciteitsvraag (166 PJ), het overgrote deel is aardgas, aardolie en kolen. Daarnaast is er nog een vraag van ruim 500 PJ naar olie en aardgas als feedstock, waarbij elektrificatie ook tot de mogelijkheden behoort.

In de beschrijving per sector die hierna volgt zal verder worden ingegaan op de elektriciteitsvraag als onderdeel van de gehele energievraag.

3 Gebouwde omgeving

3.1 Scope en huidige vraag deelsectoren

Met de gebouwde omgeving wordt de woning- en utiliteitsbouw bedoeld, bestaande uit 7,8 miljoen woningen en 1 miljoen gebouwen. Elektriciteit en aardgas zijn hier de voornaamste energiedragers. Elektriciteit wordt gebruikt voor verlichting, apparatuur en klimaatbeheersing. Gas wordt gebruikt voor de functies ruimteverwarming, koken en warmtapwaterbereiding.

Het elektriciteitsverbruik van de gebouwde omgeving zal naar verwachting stijgen richting 2030 en 2050, als gevolg van twee ontwikkelingen. De eerste is de doelstelling van het kabinet om de gebouwde omgeving aardgasvrij te maken in 2050. Hierdoor vindt in een deel van de gebouwen elektrificatie plaats voor de functies ruimteverwarming, koken en warmtapwaterbereiding. De tweede ontwikkeling is een toename in elektriciteitsverbruik door een toename in het gebruik van elektrische apparatuur, zoals ICT en koeling.

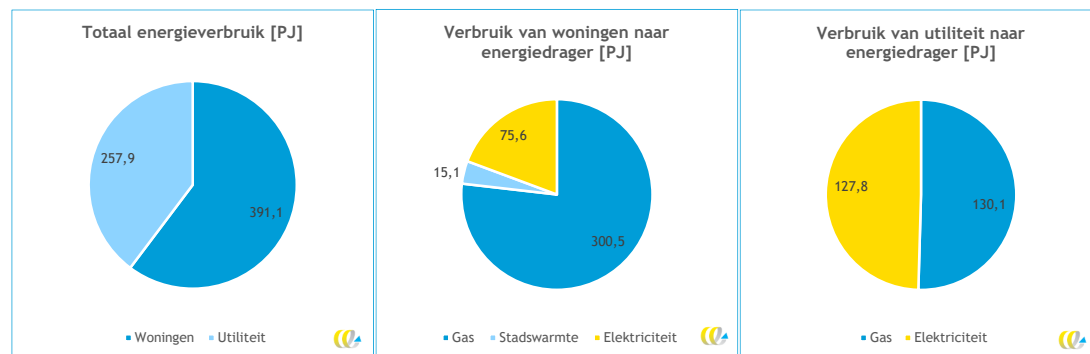
In 2017 gebruikte de gebouwde omgeving bijna 650 PJ aan energie, hiervan is 60% (391 PJ) verbruik van woningen en 40% (258 PJ) verbruik van de utiliteitsbouw. Dit is energie in de vorm van elektriciteit, gas en stadswarmte. Ruim driekwart (300 PJ) van het energiegebruik in woningen is gasverbruik, ongeveer 19% (75 PJ) is elektriciteitsverbruik en 4% (15 PJ) is afkomstig uit stadswarmte³. Voor de utiliteitsbouw is het aandeel gasverbruik en elektriciteitsverbruik ongeveer gelijk met 130 PJ gas en 128 PJ elektriciteit (Klimaatmonitor, 2019). Er is geen data beschikbaar over het specifieke gebruik van stadswarmte door de utiliteitsbouw.

In dit hoofdstuk wordt eerst gekeken naar de toename van de vraag naar elektriciteit en vervolgens naar de patronen van deze vraag. Het gaat dus alleen om de additionele elektriciteitsvraag. Er wordt gewerkt met drie scenario's. Het basisscenario is genaamd *Klimaatakkoord*. Daarnaast zijn er een minimaal en maximaal scenario.

De warmtevraag van de glastuinbouw valt onder de sector industrie. Ook wordt alleen gekeken naar de vraag naar elektriciteit; opwek van elektriciteit in de gebouwde omgeving (door bijvoorbeeld zonnepanelen op daken) valt buiten de scope; deze wordt verder in Hoofdstuk 6 meegenomen.

³ Het gaat hier om de afname van elektriciteit van het distributienet. In het geval van zonnestroom gaat direct gebruik van de elektriciteit in eigen woning af van het totaal. In het geval van teruglevering aan het net niet.

Figuur 5 - Huidig energiegebruik in de gebouwde omgeving



3.2 Potentieel elektrificatie

3.2.1 Opgave

In het Klimaatakkoord is afgesproken dat in 2050 de gebouwde omgeving klimaatneutraal verwarmd en gekoeld moeten worden. Voor de 2030 is de doelstelling 3,4 Mton CO₂-reductie, wat erop neer komt dat er voor die tijd al 1,5 miljoen bestaande woningen verduurzaamd moeten worden en de CO₂-uitstoot in de bestaande utiliteitsbouw met 1 Mton moet worden teruggebracht. Aangezien de warmtevraag nu grotendeels wordt ingevuld door aardgas, zal de warmte- en koelvraag ingevuld moeten worden met klimaatneutrale, aardgasloze technieken. De warmte- en koelvraag zal dus door andere bronnen van energie moeten worden ingevuld: elektriciteit, warmte en/of duurzaam gas.

3.2.2 Beschikbare technieken

Een overzicht van beschikbare technieken is te vinden in Tabel 2. De mogelijkheden van elektrificatie hangen af van de combinatie van het isolatieniveau, de techniek en de beschikbaarheid van de energiedrager.

Tabel 2 - Mogelijkheden voor elektrificatie van de warmte- en koudevraag in de gebouwde omgeving

Functie	Technieken verwarming en koeling	Impact elektrificatie
Individuele ruimteverwarming	Elektrische warmtepomp (eventueel i.c.m. lagetemperatuur-warmtebron)	Relevant
	Hybride warmtepomp (basislast elektrisch, piekvermogen op (groen)gas)	Relevant
	Elektrische cv-ketel of elektrische weerstandsverwarming	Weinig toepassing
	Infraroodpanelen	Weinig toepassing
Collectieve ruimteverwarming	Collectieve opwaardering bij een warmtenet	Relevant
	Pomp- en uitkoppelenergie voor warmtenetten	Weinig invloed
	Collectieve piekbijstook warmtenetten	Relevant
Wamtapwater	Warmtepompboiler (evt. boosterwarmtepomp bij LT-net)	Relevant
	Elektrische boiler	Relevant
	Elektrische geiser/doorstroomtoestel	Weinig toepassing
Koeling	Warmtepomp	Relevant
	Airconditioning	Relevant
	Passieve koeling met zeer lagetemperatuurbron	Weinig invloed
Koken	Elektrisch koken (inductie of elektrische kookplaat)	Relevant

De technieken die naar verwachting weinig toegepast zullen worden, zoals verwarming met infraroodpanelen, én de technieken die slechts een beperkte hoeveelheid elektriciteit vragen, zoals pomp- en uitkoppelenergie van warmtenetten en passieve koeling, hebben weinig impact op de totale elektrificatie van de gebouwde omgeving. Deze worden om die reden buiten beschouwing gelaten.

3.2.3 Ruimteverwarming en tapwater

Individuele technieken

Hybride warmtepompen zijn in veel gebouwen mogelijk zonder ingrijpende aanpassingen omdat ze geen extra isolatie vereisen. De potentie van hybride warmtepompen hangt vooral af van de hoeveelheid beschikbaar (duurzaam) gas: indien er gas beschikbaar is zal voor bestaande bouw waar de oplossingsrichting individuele ruimteverwarming is, in veel gevallen op basis van de nationale kosten (de kosten over de gehele warmteketen) een hybride warmtepomp de meest kostenefficiënte oplossing zijn. Dit ligt vooral aan de relatief lagere investeringskosten (lagere isolatie-eisen) vergeleken met all-electric-warmtepompen. Echter, als de beschikbaarheid van (duurzaam) gas beperkt is, zullen wijken toch moeten over gaan op aardgasvrije alternatieven zoals een all-electric-oplossing

All-electric-warmtepompen maken gebruik van omgevingswarmte. De omgevingswarmte (uit de lucht of grondwater) wordt na opwaardering middels een warmtewisselaar afgegeven aan de binnenlucht of een afgiftesysteem zoals radiatoren of vloerverwarming. All-electric-warmtepompen leveren een lagetemperatuurwarmte. Om gebouwen voldoende te kunnen verwarmen is een goede isolatie en een lagetemperatuurafgiftesysteem nodig. Er zijn verschillende typen warmtepompen op de markt en in ontwikkeling, echter vallen de onderlinge verschillen buiten de scope van dit project.

Collectieve technieken

Collectieve ruimteverwarming is vooral geschikt in wijken met een hoge, geconcentreerde warmtevraag. Dit is met name het geval in dichtbebouwde gebieden. HT- en MT-warmtenetten zijn geschikt in de meeste bestaande bouw. LT-warmtenetten zijn, net als all-electric-oplossingen, alleen direct toepasbaar in gebouwen met een goede isolatie en een lagetemperatuurafgiftesysteem. Bij zeer lagetemperatuurbronnen (bijvoorbeeld als de bron aquathermie of lagetemperatuurbodemwarmte is), is collectieve of individuele opwaardering nodig om tot de gewenste temperatuur te komen. Nieuwe warmtenetten met LT-bronnen of ZLT-bronnen met elektrische opwaardering leiden tot een toenemende elektriciteitsvraag.

Het recente rapport van Berenschot en Kalavasta Klimaatneutrale scenario's 2050 (2020), gaat ervan uit dat utiliteitsgebouwen met warmtenetten verwarmd worden als de woningen in de buurt met warmtenetten verwarmd worden.

Warmtapwaterbereiding

Gebouwen die met een all-electric-warmtepomp of LT-warmtenet worden verwarmd hebben een extra installatie nodig voor de tapwatervoorziening. Deze installatie leidt ook tot een toenemende elektriciteitsvraag.

Verwachte toename

In 2030 moet een CO₂-reductie van 49% behaald zijn (Rijksoverheid, 2019). Er speelt een aantal ontwikkelingen:

- Gemeenten moeten uiterlijk in 2021 een planning vaststellen voor de transitie van de gebouwde omgeving naar aardgasvrij in 2050 (Transitievisie Warmte).
- Woningcorporaties hebben een convenant afgesloten om hun bezit te isoleren naar schillabel B.
- Tot 2030 wordt waterstof nog niet als kansrijke energiedrager gezien in de gebouwde omgeving (Stedin, 2020).
- Nieuwbouwwoningen worden vanaf 2021 aardgasloos opgeleverd.
- De Wet milieubeheer en het bijhorend Activiteitenbesluit Milieubeheer verplicht bedrijven maatregelen te nemen die zich binnen de vijf jaar terugverdienen.
- Per 1 januari 2023 geldt voor kantoorgebouwen een minimale eis van energielabel C, zo is opgenomen in het bouwbesluit van 2012. Dit kan worden bereikt door isolatie of door installatie van energieopwekkende of energiebesparende installaties.

We schatten de additionele elektriciteitsvraag in door eerst te kijken naar het verwachte aantal panden dat tussen nu en 2030 overgaat van de hr-ketel op een alternatieve techniek. Vervolgens kijken we naar de functionele vraag van deze panden⁴. Daarnaast wordt ook de toename in ruimteverwarming en koeling door nieuwbouw meegenomen. In de Paragraaf 3.3.2 tot en met Paragraaf 3.3.4 worden de bijbehorende profielen besproken.

Aantal panden per techniek

De verwachte additionele panden zonder hr-ketel is ingeschat op basis van de doelstellingen in het Klimaatakkoord en de doorrekeningen van het PBL hiervan. Hierin wordt onderscheid gemaakt tussen de wijkgerichte aanpak geïnitieerd vanuit gemeenten en de autonome ontwikkeling op initiatief van individuele gebouweigenaren. Voor de wijkgerichte aanpak wordt op basis van het Ontwerp Klimaatakkoord uitgegaan van 50% warmtenetten, 25% hybride warmtepompen en 25% all-electric-warmtepompen. Hierbij houden we rekening met de gebouwtypes en bouwjaren. De wijkgerichte aanpak van de bestaande bouw betreft zowel woningen als utiliteitsgebouwen. De autonome ontwikkeling gaat om een beperkt aantal woningen die met name overgaan op hybride warmtepompen. Daarnaast wordt de nieuwbouw na 2020 aardgasvrij opgeleverd, waarbij we aannemen dat 75% all-electric wordt en 25% overgaat op warmtenetten. Bovendien staat in het Klimaatakkoord beschreven dat partijen toewerken naar 75% van de nieuwbouw tussen 2018 en 2021 aardgasvrij opleveren. De nieuwbouwgegevens voor woningen tot 2030 zijn afkomstig van PRIMOS en voor utiliteitsbouw van het Economisch Instituut voor de Bouw (EIB, Metabolic en SGS Search, 2020), waarbij we uitgaan van een jaarlijkse toename van 1 procent. Daarnaast wordt er voor utiliteitsbouw rekening gehouden met de verandering van de vraag naar ruimteverwarming op basis van de gegevens uit de NP RES Analysekaarten (welke gebaseerd is op de WLO-scenario's en expertgesprekken) (Kuijers et al., 2019).

Het PBL heeft ook een eigen doorrekening met het model Vesta MAIS, de Startanalyse, waarin per buurt de nationale kosten (de kosten over gehele keten voor de maatschappij, ongeacht wie deze kosten draagt) van verschillende warmtetechnieken (warmtestrategieën) worden berekend. Ook is er een berekening gedaan waarin warmtetechnieken worden toegewezen aan buurten op basis van laagste nationale kosten. Er is gekozen om ons hier in deze studie niet op te baseren. De PBL-studie richt zich op de kosten in 2030, maar onderzoekt de uiteindelijke warmtetechnieken in 2050. Daarom neemt de studie een

⁴ De berekeningen voor utiliteitsbouw zijn gebaseerd op BAG. Hierbij zijn alle gebruiksfuncties behalve 'Overige gebruiksfunctie'.



aardgasvrije gebouwde omgeving aan en isolatie naar schillabel B. Voor 2030 is dit nog niet aan de orde.

Voor het basisscenario (genaamd *Klimaatakkoord*) gaan we uit van een verduurzaming van de bestaande bouw (de wijkgerichte aanpak) van 1.125 miljoen woningequivalenten, waarvan ruim 1 miljoen woningen zijn en ruim 100.000 woningequivalenten utiliteitsbouw. Deze inschatting is op basis van de doorrekening van het PBL van het Ontwerp Klimaatakkoord (PBL, 2019d) van het aantal panden dat verduurzaamd kan worden (bovenwaarde belastingvariant B). Voor het hoge scenario gaan we voor de wijkgerichte aanpak uit van 1,5 miljoen woningequivalenten in totaal, de doelstelling in het Klimaatakkoord (Rijksoverheid, 2019). Voor de onderwaarde gaan we uit van 300.000 woningequivalenten (onderwaarde doorrekening Ontwerp Klimaatakkoord, belastingvariant B). De zelfstandige verduurzaming en nieuwbouw voor zowel woningen als utiliteit zijn gelijk in de drie scenario's, voor woningen is de verwachting dat er ruim 700.000 woningen bijkomen een voor utiliteitsbouw 28,5 miljoen m² dat gelijk staat aan ruim 190.000 woningequivalenten. Sloop van bestaande bouw is niet meegenomen omdat dit geen effect heeft op de totale elektrificatie. Wel zal sloop een effect hebben op de percentages van de relatieve aandelen van de technieken (als panden met een gasketel gesloopt worden gaat het aandeel duurzame panden omhoog terwijl het aandeel duurzame panden gelijk blijft).

Tabel 3 - Aantal additionele panden tot 2030 zonder hr-ketel

Scenario	Minimaal	Klimaatakkoord	Maximaal
Wijkgerichte aanpak, verduurzaamde woningequivalenten ⁵	Woningen 245.000 Utiliteit 49.000	Woningen: 1.019.000 Utiliteit: 106.000	Woningen 1.359.000 Utiliteit: 141.000
Zelfstandige verduurzaming		Woningen: 190.000	
Nieuwbouw		Woningen: 714.400 Utiliteit 190.000	

Tabel 4 - Warmtetechnieken woningen in 2030

Warmtetechniek	Huidig	Minimaal	Klimaatakkoord	Maximaal
Warmtepompen	1,6% (123.000)	8,5% (725.000)	11% (923.000)	12% (996.000)
Hybride warmtepompen	0,8% (61.000)	1,5% (130.000)	4% (344.000)	5% (409.000)
Warmtenetten	5,6% (437.600)	9% (761.000)	13% (1.139.000)	15% (1.307.000)
Gasketels	92% (7.177.000)	81% (6.895.000)	72% (6.104.000)	68% (5.799.000)

Tabel 5 - Warmtetechnieken utiliteiten in 2030 (aantal woningequivalenten)

Warmtetechniek	Huidig	Minimaal	Klimaatakkoord	Maximaal
Warmtepompen	1,6% (29.000)	9,1% (184.000)	9,8% (198.000)	10,3% (207.000)
Hybride warmtepompen	0,8% (14.000)	1,3% (26.000)	2% (41.000)	2,5% (49.000)
Warmtenetten	5,6% (102.000)	8,7% (174.000)	10,1% (202.000)	11% (220.000)
Gasketels	92,0% (1.676.000)	80,9% (1.627.000)	78,1% (1.570.000)	76,3% (1.535.000)

⁵ Een woningequivalent is één woning of 150 m² vloeroppervlak utiliteitsbouw.

Over het verwachte temperatuurniveau van de warmtenetten in 2030 worden in de literatuur geen harde uitspraken gedaan. Momenteel is warmtelevering veelal op hoge temperatuur (schatting: 90%). Uit energetisch oogpunt heeft het de voorkeur om naar warmtelevering op lagere temperatuur te gaan. De isolatiegraad van de panden bepaalt of dit mogelijk is. Nieuwe netten worden mogelijk op lagere temperaturen ontworpen. Om het temperatuurniveau van nieuwe netten in te schatten, hebben we gekeken naar de proeftuinen aardgasvrije wijken, zie Tabel 6 (PAW, 2018-). Voor 11 van de 22 buurten wordt in eerste instantie uit gegaan van HT, om eventueel later over te gaan op MT. Voor zes buurten wordt uitgegaan van MT, voor 3 van LT. Bij twee buurten is het nog onbekend. Daarnaast zullen enkele bestaande netten omwille van verduurzaming omschakelen van HT naar MT. Er wordt aangenomen dat 10% van de bestaande HT-netten naar MT wordt omgezet. Deze omzetting is complex, erg afhankelijk van het ontwerp en dimensionering van het warmtenet en buurt specifiek. Op basis van deze aannames wordt de verhouding van de aangesloten woningequivalenten weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6 geeft ook de verwachte voorziening weer van collectief opgewaardeerde LT-bronnen. De LT-netten die vandaag in gebruik zijn functioneren voornamelijk op bron-temperatuur met lokale opwaardering van de warmte in de woning zelf. Collectief opgewaardeerde LT-warmte wordt aangenomen op 10% van de LT-netten. Daarnaast wordt aangenomen dat de helft van de MT-netten gevoed worden door een met warmtepomp opgewaardeerde (Z)LT-bron (zeer lagetemperatuurbron), de overige netten worden gevoed door MT-restwarmte of geothermie, e.d. Lagetemperatuurwarmte tot op HT elektrisch opwaarderen wordt enkel in uitzonderlijke gevallen toegepast en levert geen significante bijdrage.

In Tabel 6 is te zien dat experts minder toename verwachten van warmtenetaansluitingen (8,9% in 2030) dan aangegeven wordt door de doorrekening van het Klimaatakkoord door PBL (13% in 2030).

Tabel 6 - Percentage aangesloten woningequivalenten per temperatuurniveau van warmtenetten

Temperatuurniveau warmtenet	Aangesloten woningeq. (2017)	Aangesloten woningeq. (2030) Verwachtingen experts	Waarvan bron centraal elektrisch met warmtepomp opgewaardeerd	Aangesloten woningeneq. (2030) Klimaatakkoord-scenario	Waarvan bron centraal elektrisch met warmtepomp opgewaardeerd
HT	5,3%	6,6%	-0%	8,9%	-0%
MT	0%	1,5%	0,5%	2,7%	1,4%
LT	0,3%	0,8%	0,1%	1,4%	0,1%
Totaal	5,6%	8,9%	0,7%	13%	1,5%

Om een doorkijk te bieden richting 2050 schetsen we ook hiervoor enkele toekomstbeelden. In 2050 moet de gebouwde omgeving aardgasloos zijn (Rijksoverheid, 2019). De scenario-studie 'Klimaatneutrale energiescenario's 2050' (Berenschot en Kalavasta, 2020) schetst vier mogelijke toekomstbeelden, die worden gezien als hoekpunten. Hierin is voor alle vier de scenario's gekeken wat de verdeling van de verschillende technieken wordt in 2050. Deze zijn te vinden in Tabel 7.

Tabel 7 - Input verdeling warmtevraag gebouwen in 2050

	Regionale sturing	Nationale sturing	Europese sturing	Internationale sturing
Isolatie	Gemiddeld A/B	Gemiddeld A	Gemiddeld B	Gemiddeld B
All-electric (elektrische warmtepomp met of zonder wko)	35%	55%	25%	25%
Hybride warmtepomp groengas	20%	20%	40%	
Hybride warmtepomp waterstof			20%	60%
Warmtenet	45% (geothermie + groengas/biomassa)	25% (geothermie + groengas/biomassa)	15% (restwarmte + groengas/biomassa)	15% (restwarmte + groengas/biomassa)
Zon-pv op daken	42 GW	35 GW	17 GW	13 GW
Zonthermie	38 PJ	18 PJ	16 PJ	12 PJ
Energiebesparing apparaten	10%	10%	10%	10%
Toename aantal elektrische apparaten in huis	1% per jaar	1% per jaar	1% per jaar	1% per jaar

Bron: (Berenschot en Kalavasta, 2020).

Het scenario ‘Nationale sturing’ is het scenario met de meeste elektrificatie. We zien hier dat het aandeel all-electric 55% is voor alle gebouwen. Daarnaast is het aandeel hybride warmtepompen 20%. De scenario’s met de minste elektrificatie zijn ‘Europese sturing’ en ‘Internationale sturing’. In deze scenario’s is er veel duurzaam gas beschikbaar waardoor er veel hybridisering (60%) zal plaatsvinden en minder all-electric (25%). Alhoewel hybride oplossingen tot een toename van elektriciteitsverbruik leiden, is deze toename minder dan bij volledige elektrificatie, en heeft een ander vraagpatroon. Deze scenario’s zijn vanuit het oogpunt van impact op het elektriciteitsnet in de gebouwde omgeving vergelijkbaar. Het scenario ‘Regionale sturing’ ligt tussen de andere scenario’s in. In dit scenario wordt er vooral ingezet op warmtenetten (45%). Het aandeel all-electric is 35% en hybride warmtepompen op groengas 20%.

Effect van isolatie

Wanneer er landelijk grootschalig geïsoleerd zou gaan worden heeft een sterke invloed op de totale warmtevraag. Ter indicatie worden in Tabel 8 de besparingspercentages weergegeven bij woningisolatie, afhankelijk van het label vóór en ná isolatie.

Tabel 8 - Besparing op de warmtevraag voor ruimteverwarming van woningen per schilstep

Schil	A+ ⁶	A	B	C	D	E	F	G
Huidig G	73%	46%	32%	24%	19%	11%	5%	0%
Huidig F	69%	44%	29%	22%	15%	6%	0%	-
Huidig E	62%	40%	24%	17%	8%	0%	-	-
Huidig D	54%	34%	16%	8%	0%	-	-	-
Huidig C	43%	28%	9%	0%	-	-	-	-
Huidig B	33%	21%	0%	-	-	-	-	-
Huidig A	23%	0%	-	-	-	-	-	-
Huidig A+	0%	-	-	-	-	-	-	-

⁶ Het label A+ wordt enkel toegepast in combinatie met een elektrische warmtepomp en zonnepanelen: de zogenaamde Nul-op-de-Meter-woning.

De invloed van isolatie op de elektriciteitsvraag is echter beperkt. De drie verwarmings-technieken met impact op de elektriciteitsvraag zijn LT-warmtenetten, all-electric-warmtepompen en hybride warmtepompen.

Voor de eerste twee technieken geldt dat verwarming gebeurt op lage temperatuur, hiervoor is een hoog isolatieniveau (schillabel B) een voorwaarde. Als het isolatieniveau onvoldoende is leidt dit tot het niet voldoen aan comforteisen zoals deze zijn vastgelegd in het Bouwbesluit. Aanvullende isolatie leidt tot een verdere reductie van de vraag, maar is niet altijd rendabel (PBL, 2020).

Hybrideoplossingen kunnen ook toegepast worden op hogere temperaturen. De warmtepomp zorgt voor de basislast en de gasketel springt bij op koude dagen. Isolatie heeft hierbij effect op de totale warmtevraag, het aandeel van de warmtevraag dat door de warmtepomp wordt geleverd en het rendement van de warmtepomp. Dit is te zien in Tabel 9. In goedgeïsoleerde woningen wordt een groter gedeelte van de warmtevraag geleverd door de warmtepomp. Daar staat tegenover dat door de goede isolatie van deze woningen de warmtevraag kleiner is en minder grote pieken kent.

Voor hybride warmtepompen heeft isolatie dus wel invloed op de elektriciteitsvraag. In de berekeningen is aangenomen dat hybride warmtepompen worden toegepast in woningen van alle isolatieniveaus. De impact van grootschalige landelijke isolatie blijft echter beperkt, vanwege het lage verwachte aandeel hybride warmtepompen. Momenteel is aangenomen dat woningen in de autonome ontwikkeling hybride warmtepompen zullen toepassen. Het is denkbaar dat als er grootschalige isolatie plaatsvindt een deel van de autonome ontwikkeling zal bestaan uit all-electric-warmtepompen. Hier is echter geen indicatie van.

Tabel 9 - Aandeel warmtepomp en het rendement van deze verwarming bij hybride warmtepompen en verschillende schillabels (CE Delft, 2018)

Techniek	Schil	Aandeel warmtepomp op de totale warmtevraag	Rendement elektrisch (COP)
Buitenlucht	A	0,52	3,68
	B	0,49	3,72
	C	0,47	3,75
	D	0,45	3,78
	E	0,42	3,81
	F	0,40	3,84
	G	0,38	3,86
Ventilatielucht	A	0,58	4,27
	B	0,56	4,28
	C	0,49	4,29

Warmtevraag per pand

De jaarlijkse warmtevraag van de woningen is bepaald op basis van een studie van Merosch, uitgevoerd in opdracht van CE Delft. Hierin zijn kentallen voor de warmtevraag ingeschat op basis van bouwjaarperiode, woningtype en oppervlakte. De studie van Merosch is gebaseerd op de gasverbruiken in het jaar 2016. De warmtevraag van de utiliteitsbouw is gebaseerd op de kentallen voor de warmtevraag per gebruiksoppervlakte in Vesta MAIS 4.0 (CE Delft, 2019e). Deze kentallen maken onderscheid in type utiliteit.

In onze doorrekeningen (Hoofdstuk 6) is gekeken worden naar twee klimaatjaren, een gemiddeld jaar en jaar met een uitzonderlijk koude periode. Hiervoor is gekeken naar de buitentemperaturen in de jaren 2015 en 1987 (KNMI, 2016). De jaarlijkse warmtevraag is voor deze jaren ingeschat op basis van het aantal graaddagen (KWA, sd).

3.2.4 Koeling

Koeling wordt momenteel met name gedaan in utiliteitsbouw, hierbij gaat over het HVAC-installaties. In toenemende mate wordt ook gekoeld in woningen. Koeling kan geleverd worden door passieve of actieve koeling, zoals airconditioning. Indien er ook een warmtevraag is, kan ook gewerkt worden met wko-systemen en warmtepompen (ISSO Kennisbank, 2020).

Verwachte toename

Het elektriciteitsverbruik voor koeling zal naar verwachting toenemen, als gevolg van de klimaatverandering, ontwikkelingen in de bouw (beter isolatieniveau en BENG-eisen) en de comfortwens van de gebruikers van de panden. De ontwikkeling voor woningen en utiliteitsbouw loopt hier afzonderlijk. Koeling is niet meegenomen in het Klimaatakkoord.

Op basis van het rapport en het Functioneel Ontwerp 4.0 van Vesta MAIS (CE Delft, 2019e) wordt aangenomen dat woningen vanaf label B een koudevraag krijgen. We nemen aan dat 30% van deze woningen actief gaat koelen. Grofweg komt dit overeen met een jaarlijkse toename van 5% in de verkopen van koelinstallaties (CBS, 2020e)⁷. In de utiliteitsbouw wordt al gekoeld. Er wordt aangesloten bij de kentallen voor koudevraag uit Functioneel ontwerp 4.0 van Vesta MAIS. In het *Klimaatakkoord*-scenario nemen we aan dat de koudevraag met 5% toeneemt. In het minimale scenario nemen we aan dat de koudevraag 10% lager is, in het maximale scenario 10% hoger. Daarnaast wordt voor utiliteitsbouw ook de extra koelvraag door de verwachte nieuwbouw meegenomen.

3.2.5 Koken

De transitie van koken op aardgas naar elektrisch koken is een trend die al langer speelt. Elektrisch koken en koken op aardgas kennen allebei voor- en nadelen op het gebied van gebruiksgemak. Van de nieuw verkochte kookplaten is momenteel het merendeel elektrisch, zie Figuur 6. Hieronder vallen inductiekookplaten, halogeenkookplaten, keramische kookplaten en overige kookplaten met elektriciteit als warmtebron (Natuur & milieu, 2019a).

De transitie van de warmtevoorziening naar aardgasvrij heeft gevolgen voor koken: huishoudens die all-electric worden of overgaan op een warmtenet zullen de overstap maken naar elektrisch. Naast deze ontwikkeling zal naar verwachting de autonome trend van de verkoop van elektrische kookplaten verder doorzetten. Er zal echter een groep blijven die vasthoudt aan koken op gas op basis van gebruiksgemak, zolang hiervoor geen beperkende regelgeving bestaat.

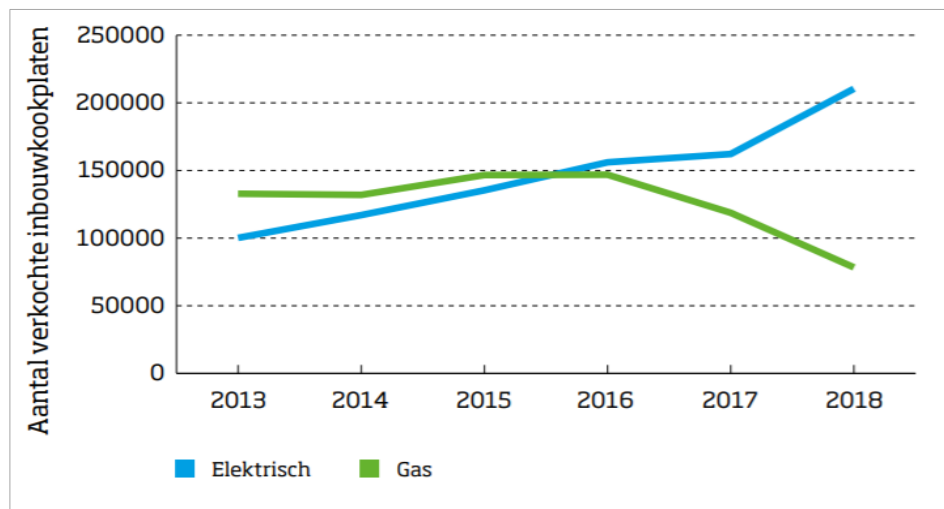
In 2018 zijn er ruim 200.000 elektrische kookplaten verkocht. We gaan uit van 10% groei in het aandeel verkochte elektrische kookplaten per jaar. In 2030 zijn er dan 5,5 miljoen elektrische kookplaten geïnstalleerd, een marktaandeel van 65%. In het minimale scenario

⁷ Uit cijfers van het CBS blijkt dat er in 2019 ruim 77.000 buitenlucht-luchtwarmtepompen zijn verkocht en in totaal 231.000 installaties opgesteld waren voor toepassing in de woningbouw. Aangenomen wordt dat 40% hiervan koelinstallaties zijn (CBS, 2020e).



gaan we ervan uit dat het aantal verkochte kookplaten 10% lager zal uitvallen. In het hoge scenario 10% hoger.

Figuur 6 - Aantal verkochte inbouwkookplaten



Bron: Gasmonitor, 2019.

3.2.6 Bepalende factoren

Onder deelnemers van het expertpanel zijn interviews en een enquête gehouden over elektrificatie. Daarnaast is gebruik gemaakt van literatuur en eigen expertise. In Tabel 10 staat welke factoren bepalend zijn voor het tot ontwikkeling komen van de verschillende elektrificatiemogelijkheden.

Het valt op dat voor alle toepassingen met name beleid rondom de energiebelasting, prijs en 'total costs of ownership' (TCO) van apparaten en algehele installatie van de techniek worden genoemd als bepalende factoren. De duurzame alternatieven worden nog niet als voldoende aantrekkelijk gezien om zonder stimulering geadopteerd te worden door de markt. Zolang de referentietechniek een aardgasketel is en aardgas niet duurder wordt, zullen duurzame alternatieven die hogere kosten hebben, financieel minder aantrekkelijk zijn. De huidige gasprijzen zijn laag. Zo is ook de energiebelasting voor elektriciteit per kg CO₂-emissie nog steeds hoger dan die voor aardgas.

De economische situatie speelt een belangrijke rol in de verwachte nieuwbouw projecties en de investeringen in de bestaande bouw (zowel de wijkgerichte aanpak als de autonome ontwikkeling). Met name de impact van Covid-19 op de bovengenoemde factoren is van belang. Indien de economische situatie dusdanig verslechtert zal dit naar verwachting zowel investeringen in nieuwbouw als in de bestaande bouw remmen, waardoor er minder elektrificatie zal plaats vinden.

Met name op het gebied van ruimteverwarming (individueel en collectief) wordt er momenteel beleid ontwikkeld, onder andere ten gevolge van het Klimaatakkoord en stellen gemeenten Transitievisies Warmte op, waarin elektrificatie een middel is om klimaatneutraal te verwarmen (zie ook Paragraaf 3.2.3). Het Klimaatakkoord met de wijkgerichte aanpak alsook strengere normering voor nieuwbouw en renovatie (woningen en utiliteit) zijn de drijvende kracht in het verduurzamen van de gebouwde omgeving. Het duurzame

alternatief met de laagste kosten is erg locatie specifiek en afhankelijk van vele factoren (bebouwingsdichtheid, isolatiegraad, beschikbaarheid warmtebronnen, e.d.). Techno-economische analyses zoals de Startanalyse (PBL) en CEGOIA liggen aan de basis van zulke vergelijkingen. Realistische verhoudingen die hier rekening mee houden zijn in voorgaande paragrafen gehanteerd.

Daarnaast wordt kennis over de technische mogelijkheden en een gevoel van urgentie door de klimaatverandering, genoemd als een belangrijke factoren. Naar verwachting zullen deze hand in hand gaan, een gevoel van urgentie als gevolg van klimaatverandering, zal zorgen voor een bredere verspreiding van kennis over de technische mogelijkheden. Tot slot speelt ook de installateur een rol: deze moet uiteindelijk een techniek met hogere investeringskosten dan een gemiddelde gasketel verkopen en installeren. Bij velen ontbreekt het nog aan kennis van andere technieken dan de aardgas-hr-ketel.

Tabel 10 - Bepalende factoren verduurzaming/elektrificatie toepassingen gebouwde omgeving

Toepassing	Utiliteitsbouw	Woningen
Individuele ruimteverwarming	Prijsbeleid en regelgeving, warmteplannen gemeenten, isolatie, bewustwording (o.a. door klimaatverandering), technologie, economische omstandigheden na Coronacrisis.	Beleid verduurzaming, energiebelasting, regelgeving subsidie, warmteplannen gemeenten, prijs, subsidies en kennis over isolatie en technologie, prijs, isolatiegraad, vloerverwarming, isoleren is duur voor bestaande bouw voor warmtepomp, bewustwording, ontwikkelingen technologie, consumentenvertrouwen, geluidsoverlast door (lucht-water) warmtepompen.
Collectieve ruimteverwarming	Klimaatverandering, warmteplannen gemeenten, kennis, prijs, eisen aan bodemgebruik en koppelen van wko-systemen, tegengestelde belangen eigenaar en gebruiker.	Beleid verduurzaming, energiebelasting, warmteplannen gemeenten, prijs, meewerkende woningbouwcorporaties, ontsluiting van MT/LT-bronnen die een opwaardering naar hogere temperatuur nodig hebben, slecht imago warmtenet, tegengestelde belangen.
Wamtapwaterbereiding	Wetgeving, warmteplannen gemeenten.	Wetgeving, beleid verduurzaming, warmteplannen gemeenten.
Koken	Prijs apparaten, warmteplannen gemeenten.	Beleid verduurzaming, warmteplannen gemeenten, prijs apparaten, bij keukenleveranciers geen gas meer aanbieden (alleen uitzondering), subsidies, corporaties flexibeler in de haalbaarheid van de businesscase, meewerkende woningcorporaties.
Koeling	Klimaatverandering, beleid, kennis-uitwisseling over alternatieven en specifiek over drycoolers.	Beleid, economie, vergrijzing, de zomerse temperaturen de komende jaren.

Tot slot is in de enquête aan de respondenten gevraagd voor welke toepassing zij een sterke toename verwachten in het elektriciteitsverbruik voor zowel utiliteitsbouw als woningen. In Tabel 11 staat de volgorde waarin zij verwachten dat de elektrificatie als eerst zal plaatsvinden. Verder werd de toename van ICT en datacenters en de elektrificatie van transport genoemd. Deze onderwerpen vallen onder de sectoren industrie en mobiliteit en worden in de desbetreffende hoofdstukken in deze notitie besproken.

Tabel 11 - Deelnemers van de enquête verwachten de sterkste toename in elektriciteitsverbruik in de onderstaande toepassing, op volgorde van toename.

	Utiliteitsbouw	Woningen
1	Koeling	Individuele ruimteverwarmingstechnieken
2	Individuele ruimteverwarmingstechnieken	Wamtapwaterbereiding
3	Collectieve ruimteverwarmingstechnieken (elektrische bijstook of opwaardering warmtenetten)	Koken
4	Wamtapwaterbereiding	Koeling
5	Koken	Collectieve ruimteverwarmingstechnieken (elektrische bijstook of opwaardering warmtenetten/blokverwarming)

Zolang er geen wettelijke middelen (regelgeving) zijn voor gemeenten om stoppen met aardgaslevering af te dwingen en het prijsniveau van fossiele energie (vooral aardgas) nog schommelt rond de 70 ct/m³ (incl. belastingen) zullen klimaatneutrale alternatieven slechts beperkt worden toegepast en zal elektrificatie volgens het minimumscenario plaatsvinden.

3.3 Kenmerken vraagprofielen

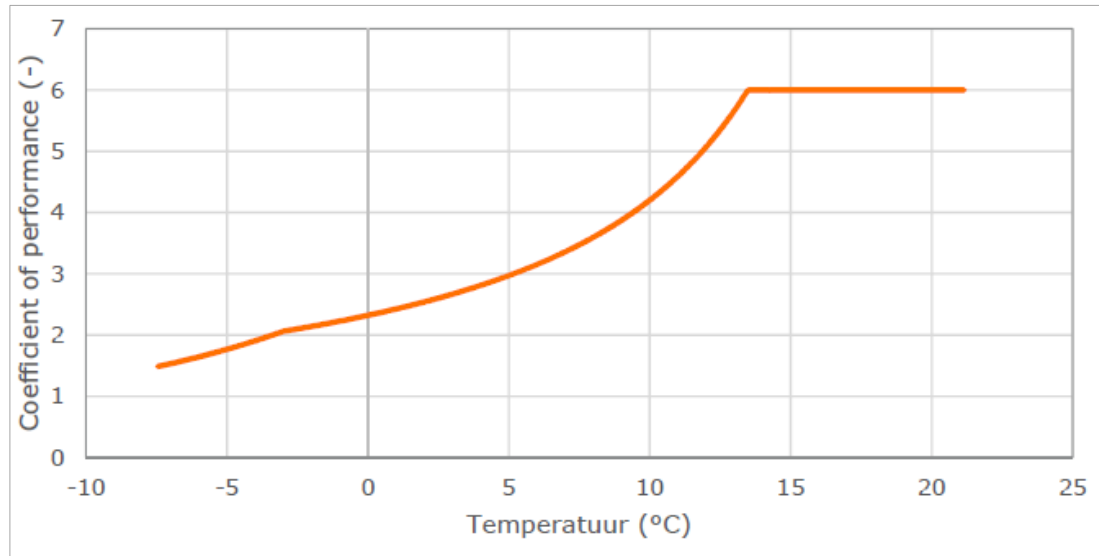
3.3.1 Inleiding

Om de impact op het elektriciteitsnet te bepalen, zijn vraagprofielen voor de gebouwde omgeving opgesteld. De basis hiervoor is de verwachte elektrificatie van de gebouwde omgeving beschreven in het voorgaande hoofdstuk en de vraag- en gebruikskarakteristieken van de verschillende elektrificatietechnieken die hier vervolgens aan bod komen. Meerdere technieken zullen bijdragen aan de elektrificatie van woningen. Hier volgt per functie een korte beschrijving van de verschillende technieken voor de woningbouw. Dit biedt een context voor de interpretatie van de profielen. Daarna wordt ook gekeken naar de utiliteitsbouw.

3.3.2 Individuele ruimteverwarming

All-electric-warmtepompen die de volledige warmtevraag van een woning voorzien met elektriciteit, hebben een vermogen van ongeveer 5 à 15 kW_{thermisch} afhankelijk van de warmtevraag van de woning. All-electric-warmtepompen zijn vaak onder de benodigde piekvraag gedimensioneerd, op ca. 90% van de warmtevraag. Dit komt overeen met een capaciteit van ca. 80% van de piekvermogensvraag (buitentemperatuur -10 °C) (Duurzaambo, 2018). Het resterende gedeelte wordt opgevangen met een elektrisch element. Hanteren van deze vuistregels voor woningbouw zorgt voor een optimale werking van de all-electric-warmtepomp. De elektrische elementen die de piekverwarming verzorgen functioneren met een relatief lage COP van 1 en dragen bij tot een hoge piekbelasting. Op basis van de warmtebron kan grofweg onderscheid gemaakt worden tussen bodemwarmtepompen en buitenluchtwarmtepompen. Bodemwarmtepompen en buitenluchtwarmtepompen verschillen in efficiëntie waarmee ze kunnen verwarmen, respectievelijk een gemiddelde COP van 4 en 5 (CE Delft, 2018). De COP van de bodemwarmtepomp blijft nagenoeg constant ook bij lage buitentemperaturen. De COP van de buitenluchtwarmtepomp daalt sterk ten gevolge van lage temperaturen, zie Figuur 7. Dit zorgt voor hoge pieken in het elektriciteitsprofiel voor de buitenluchtwarmtepomp.

Figuur 7 - COP buitenluchtwarmtepomp in functie van de temperatuur



Bron: (Ecofys, 2014)



Verloop is representatief, de absolute COP is intussen verbeterd.

Hybridewarmtepompen voorzien het grootste deel van de verwarming in de woning met behulp van elektriciteit. Op de koudste dagen, of bij hoge elektriciteitsprijzen, springt een gasketel bij. Daarnaast voorziet de gasketel ook de warmwatervoorziening. Hybridewarmtepompen worden kleiner uitgevoerd en zijn bedoeld om ca. 45% van de warmtevraag te ondervangen (zie Tabel 9) (CE Delft, 2018) (Milieucentraal, sd). In een normaal weerjaar zoals 2015 komt dit overeen met een capaciteit gelijk aan ca. 18% van de piekvermogensvraag. De rest van de piekvermogensvraag wordt voorzien door gas. Bepaalde hybride warmtepompen schakelen uit onder een bepaalde buitentemperatuur om technische redenen (aanvriazing buitenunit) en/of economische redenen (bij die buitentemperatuur kan het mogelijk goedkoper zijn om alleen met een HR-ketel te verwarmen). Er wordt aangenomen dat de hybridewarmtepomp uitschakelt onder 4°C buitentemperatuur (CE Delft, 2018) (Milieucentraal, sd).

Regeling van warmtepompen

Een studie van ECOFYS (2014) geeft aan dat de slimme regeling van warmtepompen in Tabel 12 nog niet aan de orde is. Deze slimme regeling is interessant omdat de pieken uitgesmeerd worden, door voorverwarming in de woning. Hierdoor wordt het piekverbruik van elektriciteit verminderd. Experts geven aan dat er kansen zijn om goed geïsoleerde huizen met een warmtepomp te bekijken als een warmtebuffer voor balanceren van vraag en aanbod. Door de regeling te koppelen met de buitentemperatuurverwachting en elektriciteitsprijs kan op pieken geanticipeerd worden. Deze techniek staat echter nog in de kinderschoenen, is sterk afhankelijk van bewonersgedrag, maar biedt zeker perspectief. Meer prijs- of signaalgestuurde regelingen, zoals beschreven in de parallelle studie voor E-Top naar flexibiliteit in de gebouwde omgeving, kan zorgen voor een optimale werking van de hybridewarmtepomp, gezien vanuit het perspectief van het gehele energiesysteem.

Tabel 12 - Regeling van warmtepompen. Rood geeft het gedeelte aan dat door een verwarmingselement wordt bijverwarmd

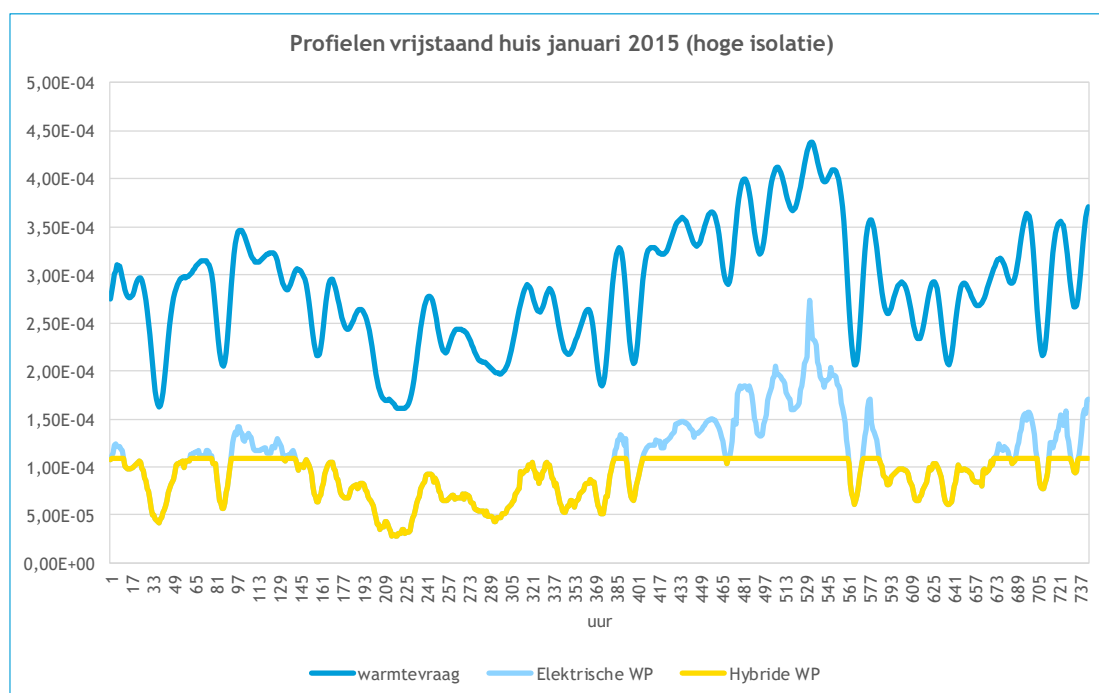
Conventionele regeling	Slimme regeling
Elektriciteitsvraag voor warmtepomp volgt het profiel van de warmtevraag o.i.v. de buitentemperatuur.	Spreading van pieken in back-up door het voorverwarmen van het huis (m.b.v. trage systemen zoals vloerverwarming of betonkernactivering)
	

Bron: (Ecofys, 2014).

Warmtepompprofiel ruimteverwarming

Voor verschillende woningtypes (rijtjeswoning, 2 onder 1 kap, vrijstaand, appartement) zijn warmtevraagprofielen beschikbaar voor een laag, midden en hoog isolatieniveau voor verschillende jaren. Voor het basisjaar nemen we het weerjaar 2015 en voor het extreme jaar het weerjaar 1987, conform het Energietransitiemodel van Quintel waar de profielen van afkomstig zijn. Hieronder is het warmtevraagprofiel en de warmtepompprofielen voor een elektrische en een hybride warmtepomp weergegeven voor januari van het weerjaar 2015. Er is uitgegaan van een luchtwaterwarmtepomp met conventionele regeling. Uit het profiel en de jaarlijkse warmtevraag die met warmtepompen wordt voorzien, volgt de belasting van het elektriciteitsnet van de warmtepomp.

Figuur 8 - Energievraag profielen vrijstaand huis met hoge isolatie



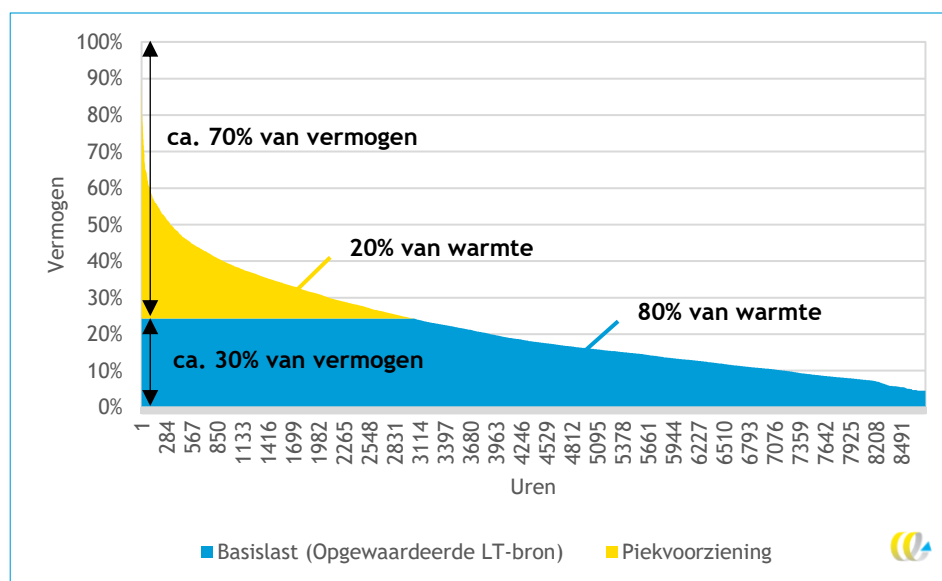
Opmerking: de y-as van de figuur heeft weinig betekenis, het toont de waarden van het genormaliseerde warmtevraagprofiel, de andere profielen zijn middels de COP hieraan gerelateerd en daarom dus lager. Het warmtevraagprofiel is genormaliseerd op de totale jaarlijkse warmtevraag.

De profielen zijn omgerekend naar een warmtepompprofiel door een temperatuurafhankelijke COP (zie Figuur 7). Voor de hybride warmtepomp is het warmtepompprofiel afgekapt op 18% van de maximale vermogensvraag, waarna de gasketel in de resterende warmtevraag voorziet.

3.3.3 Collectieve ruimteverwarming

Aquathermie of warmtenetten met een ander type lagetemperatuurbron hebben elektriciteit nodig om de warmte op te waarderen naar hoge temperaturen. Tegenwoordig gebeurt die opwaardering voor het grootste deel met een collectieve warmtepomp en het resterende deel met een gas-of biomassagestookte piekkel. Volgens VESTA Functioneel Ontwerp 4.0 levert de basislast, de met warmtepomp opgewaarde LT-bron, 80% van de warmte (GJ) van de totale warmtevoorziening van het warmtenet (CE Delft, 2019e). Dit komt ongeveer overeen met ca. 20 à 30% van het piekvermogen. De resterende 70% vermogen wordt geleverd door een piekkel. Figuur 9 toont de onderverdeling in de relatie tussen het vermogen en het aandeel van de energievraag waarin wordt voorzien.

Figuur 9 - Jaarbelastingduurkromme warmtenet

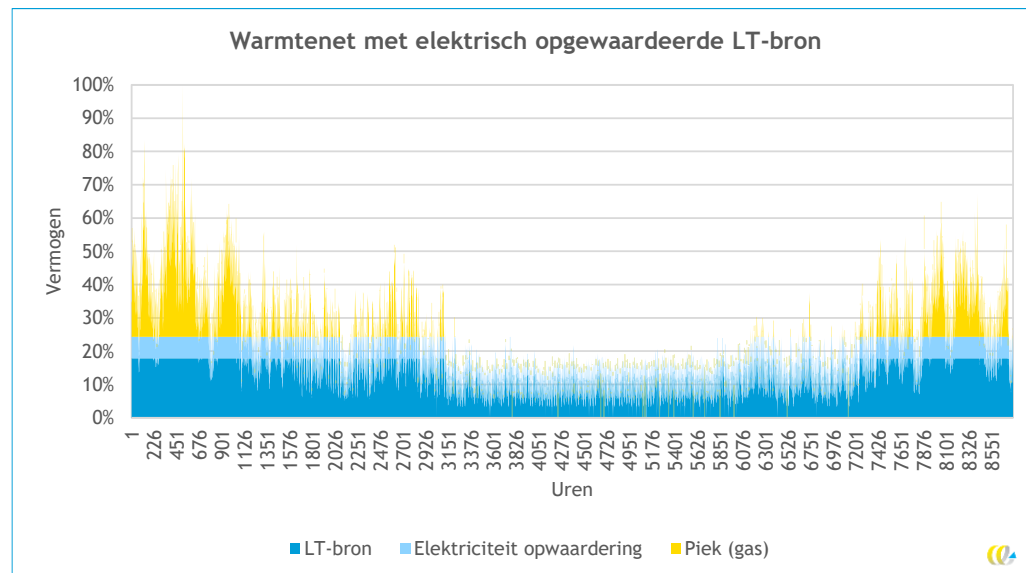


Profiel collectieve ruimteverwarming

Het profiel voor collectieve ruimteverwarming is gebaseerd op een warmtenetprofiel van Liander voor een nieuwbouwwijk. Figuur 10 toont welke bronnen het totale gevraagde warmtevermogen leveren. De basislast wordt geleverd uit de primaire warmtebron, bestaande uit LT-bron en elektrische opwaardering. Tijdens de winter functioneert de primaire warmtebron continu in basislast. In de winter is dus een plat elektriciteitsprofiel te verwachten dat schaal met de Seasonal Performance Factor (SPF) waarmee de warmtepompen opereren. Extreme weersomstandigheden hebben bovendien geringe invloed op de elektriciteitsvraag aangezien de pieken in de warmtevraag door een bijstook worden

opgevangen. In de zomer is de warmtevraag lager, waardoor de primaire bron (LT-bron incl. elektrische opwaardering) het grootste gedeelte van de tijd de warmtevraag kan opvangen.

Figuur 10 - Genormaliseerd warmtenetprofiel Liander voor een nieuwbouwwijk



Zoals gezegd, schaalt de elektriciteitsvraag met de SPF. De SPF is dus een belangrijke factor. Deze is afhankelijk van de temperatuur van de warmtebron en de gevraagde temperatuur in het warmtenet. Bijvoorbeeld voor thermische energie uit oppervlaktewater is de SPF gelijk aan 2,5 à 3 voor configuraties op middentemperatuur (70°C) of 3 à 4 voor configuraties op lage temperatuur (50°C) (IF Technology, 2019). De COP is weinig afhankelijk van de buitentemperaturen, aangezien de meeste collectief gebruikte LT-bronnen relatief constante temperaturen hebben zoals een wko en laagtemperatuurrestwarmte.

HT-netten hebben doorgaans een HT-warmtebron en beschikken niet over centrale elektrische opwaardering. Ze hebben over het algemeen erg hoge COPs wat betreft elektriciteitsverbruik. Geothermie heeft bijvoorbeeld een COP van 20 en dus een relatief kleine extra elektriciteitsvraag (RVO, 2016). Deze hebben weinig impact op het totale elektriciteitsprofiel.

Elektrische piekvoorziening kan enorme implicaties hebben

De piekvoorziening wordt niet geleverd door elektrische warmtepompen. Tot op heden wordt hiervoor bijna altijd gebruik gemaakt van gas of biomassa. Indien er in de toekomst voor piekvoorzieningen omgeschakeld wordt naar elektrische piekverwarming heeft dit mogelijk grote gevolgen voor de piekbelasting in het elektriciteitsnet. Dit is afhankelijk van of wordt gewerkt met een warmtebuffer of met verwarming op het moment van de vraag. Met de buffers wordt reeds geëxperimenteerd door warmteleveranciers. Bij lage of zelfs negatieve elektriciteitsprijzen wordt de buffer gevuld. Dit draagt bij aan het matchen van elektriciteitsvraag en -aanbod. Verwarming op het moment van de vraag zou zorgen voor een grote toename in het benodigd elektrisch piekvermogen, maar is niet te verwachten.

Naarmate warmtenetten verduurzamen zal ook gekeken worden naar elektrische boilers om volledig duurzame warmte te voorzien. Ongeveer 20% van de warmtelevering in warmtenetten is afkomstig van een piekvoorziening of hulpwarmtecentrale. In 2030 zal deze piekwarmte volgens het scenario Klimaatakkoord 5 PJ bedragen. Het overeenkomstige piekvermogen warmte ligt in de orde grootte 2,5 GW. Elektrische boilers met buffer kunnen een hoog piekvermogen warmte leveren gedurende korte tijd terwijl ze voordien gestaag op een laag elektrisch vermogen geladen worden. De eerste toepassing van een e-boiler bij een warmtenet in Nederland wordt ontwikkeld te Ypenburg en heeft een vermogen van 12 MW. (Eneco, sd). De resultaten van deze pilot zullen de elektrificatie van piekvoorziening verder bepalen.

3.3.4 Warmtapwatervoorziening

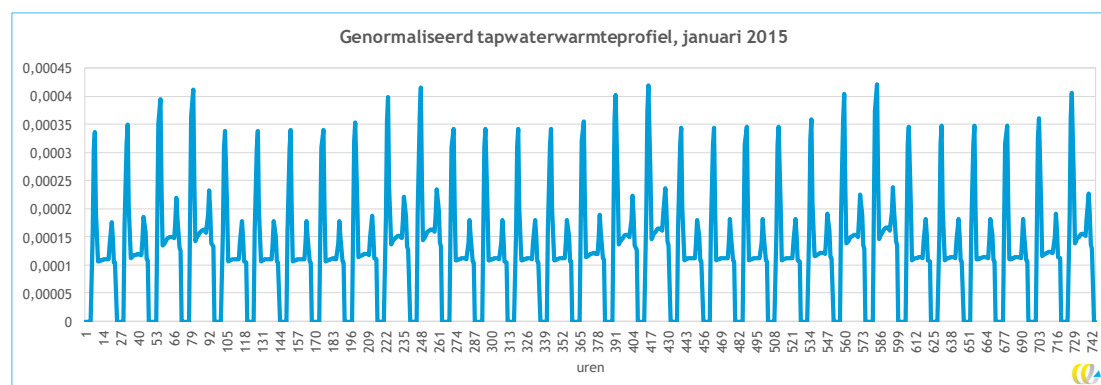
Elektrische boilers verwarmen water gestaag gedurende langere tijd op tot 60°C. Een warmtepompboiler is financieel interessanter dan een elektrische boiler met een eenvoudig verwarmingselement (Ecofys ; Greenvis, 2016). Indien de opwarmduur verspreid wordt over een etmaal zorgt dit voor een gemiddelde vermogenstoename orde grootte 1 kW_{th} voor een warmtepomp (Duurzaambo, 2018). Ook bij een warmtepompboilers zijn vermogens van 0,5 à 1 kW_{th} gangbaar (ISSO Kennisbank, 2020).

Doorstroomtoestellen verwarmen water als het water door het toestel stroomt. Er vindt nauwelijks of geen opslag plaats. Deze toestellen worden weinig ingezet in de woningbouw. In de utiliteitsbouw vinden doorstroomtoestellen hernieuwde aandacht vanwege het lagere risico op legionella. Als de doorstroomtoestellen op korte afstand van het tappunt geplaatst worden reduceert die het risico op legionellavorming. Omwille van de weinige toepassing in de woningbouw en de gelijktijdigheid in utiliteiten worden deze toestellen buiten beschouwing gelaten.

Profiel

Het profiel voor tapwatervraag komt uit het Energietransitiemodel van Quintel. Het gaat hier om een gemiddeld profiel, waardoor de tapwatervraag verspreid is over vrijwel de gehele dag. Deze kan met een COP omgerekend worden naar een elektriciteitsprofiel. Hierbij is uitgegaan van een elektrische boiler, dus een COP van één. Hieronder is het tapwaterwarmteprofiel voor januari 2015 weergegeven.

Figuur 11 - Genormaliseerd warmtapwaterwarmteprofiel (Quintel)



3.3.5 Koeling

Passieve koeling vraagt enkel pompenergie om koud water uit een koude bron rond te pompen. In het geval van een bodemwarmtepomp, kan de bodembron in de zomer gebruikt worden voor koeling. Er zijn dan slechts twee circulatiepompen aan elk ongeveer 60 Watt nodig om een woning te koelen. (Greenhome, sd) In geval van passieve vrije koeling beschikt het systeem over hoge EER van 8 tot 20, zie Tabel 13.

Actieve koeling vraagt veel meer elektriciteit dan passieve koeling. De temperatuur van de bron wordt verlaagd met behulp van elektriciteit. De EER is bijgevolg een stuk lager van 1,5 tot 5, zie Tabel 13. Een split-unit is de meest gekende aircovariant.

Tabel 13 - Gemiddelde EER-koelsystemen

Systeem	EER
Mobiele airco	1,5-2
Splitunit	2,5-3,5
Compressiekoelmachine	3-4,5
Warmtepomp in zomerbedrijf (bodem/grondwater)	4-5
Passieve koeling op bodemwisselaar	8-16
Passieve koeling op grondwater	10-20

Bron: (ISSO Kennisbank, 2020).

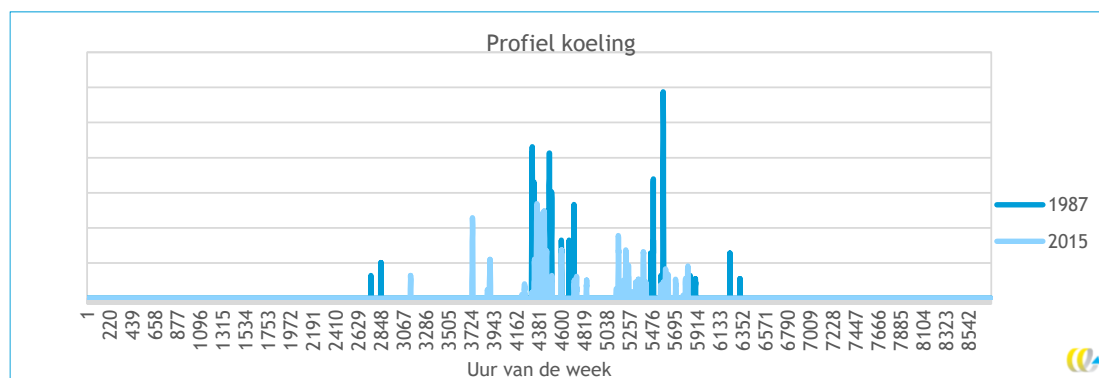
Regeling van koelmachines

Koeling in woningen vind plaats gedurende de warmste dagen in het jaar als het warmer is dan ca. 23 graden. Gemiddeld staat een apparaat zo een 200 uur aan. (Milieucentraal, sd) Er is een verschil in werking tussen een on/off airconditioner en een modulerende of inverter-airconditioner. Door middel van inverter-technologie kan de koelmachine zijn vermogen regelen naar de vraag en zo efficiënter werken (ISSO Kennisbank, 2020).

Profielen koeling

Voor koeling wordt aangenomen dat er gekoeld wordt als de buitentemperatuur boven de 23°C komt. Het profiel is te zien in Figuur 12.

Figuur 12 - Jaarprofiel voor koeling in woningen

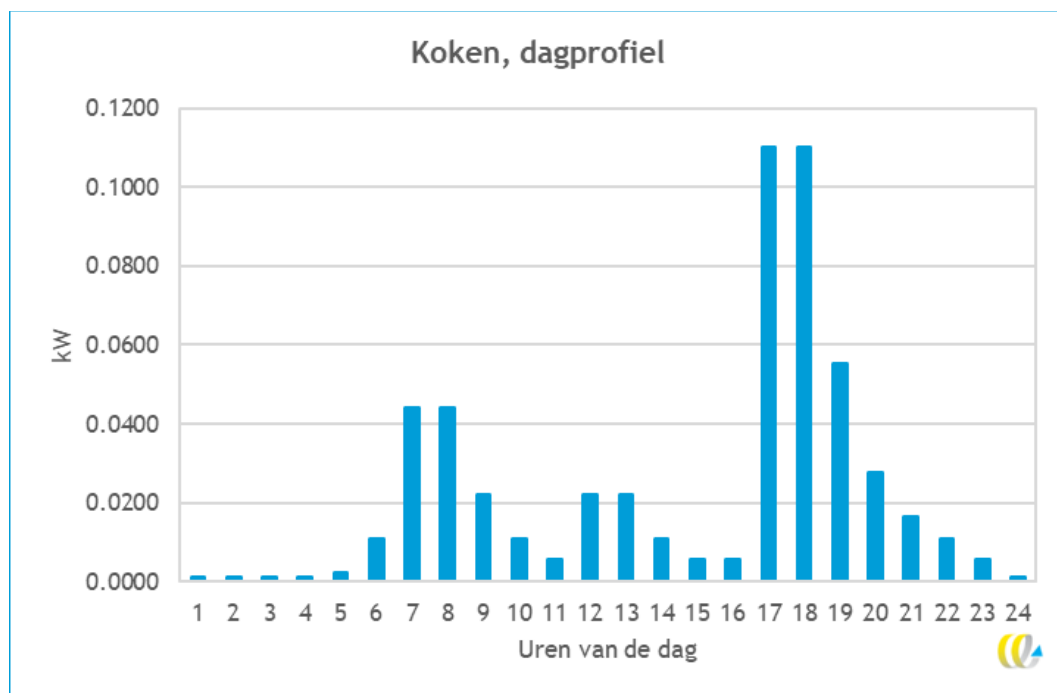


3.3.6 Koken

Een standaard elektrische kookset bestaat uit vier pitten met een totaal vermogen van ca. 7 kW (een gemiddeld vermogen per vuur van ca. 1,5 kW). Het jaarlijks verbruik is ca. 175 kWh voor inductie en ca. 225 kWh voor keramisch (Milieucentraal, sd).

Hieronder staat een dagprofiel weergegeven voor elektrische koken. Dit dagprofiel is overgenomen uit een studie van Ecofys en ECN uit 2015 (Ecofys : ECN, 2015). Het is een geconstrueerd gemiddeld profiel voor huishoudens dat voor alle dagen van het jaar herhaald wordt en dan optelt tot een gemiddelde elektrische kookvraag van 200 kWh per jaar. De verdeling over de uren lijkt logisch: ontbijt, middageten en avondeten.

Figuur 13 - Dagprofiel koken in woningen



Bron: (Ecofys : ECN, 2015).

We nemen aan dat het een gemiddeld profiel over meerdere huishoudens betreft. Een elektrische kookplaat heeft namelijk een piekvermogen van rond de 1.500 Watt. De piek in dit profiel ligt een factor 10 lager. Daarnaast is er zowel een middag- als avondpiek aanwezig.

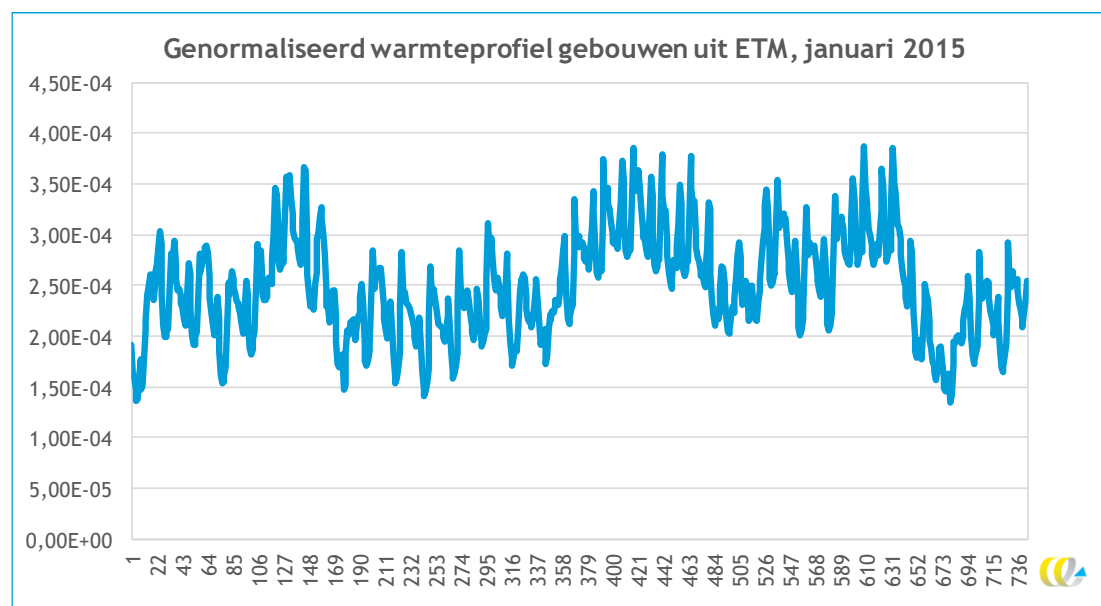
3.3.7 Elektrificatie Utiliteitsbouw

Woningen en utiliteit hebben sterk verschillende kenmerken. Dezelfde elektrificatietechnieken zijn ook bij utiliteit van toepassing. Het benodigde vermogen wordt ingeschat op basis van het Vesta Functioneel Ontwerp 4.0 (CE Delft, 2019e). Maar waar woningen over het algemeen eenzelfde gebruikspatroon vertonen, is dit bij utiliteit niet altijd het geval. Het inregelen van ruimteverwarming en het elektriciteitsverbruik hangt sterk samen met het verloop van activiteiten gedurende de dag. Zo worden winkels, kantoren en onderwijsgebouwen overdag het vaakst gebruikt. Cafés en restaurants zijn dan weer op andere

momenten open. De utiliteitssector is dus een diverse sector die moeilijk over één kam te scheren is.

Voor utiliteiten is enkel een algemeen profiel beschikbaar gebaseerd op de gasvraag van gebouwen (zie hieronder), terwijl we bij elektrificatie graag naar verschillende sectoren willen kijken. Denk aan kantoren, ziekenhuizen, scholen, etc. Deze informatie is simpelweg niet openbaar beschikbaar. Ook het expert panel deelt het gebrek aan beschikbare informatie.

Figuur 14 - Genormaliseerd warmteprofiel gebouwen uit ETM, januari 2015



3.4 Flexmogelijkheden

Omdat niet elke elektrificatie leidt tot gunstige momenten van afname is ook gekeken naar de mogelijkheid om de piek in de elektriciteitsvraag te verschuiven naar momenten dat dat gunstig is, bezien vanuit de netbelasting en/of van het aanbod aan elektriciteit. Pieken zijn vooral merkbaar in ruimteverwarming met warmtepompen en koeling tijdens de zomer. Vooral het sturen van de inzet van warmtepompen kan zorgen voor een meer egaal vraagpatroon dat zorgt voor een kleinere kans dat de piek in de elektriciteitsvraag samenvalt met een dip in de elektriciteitsproductie uit zon en wind. Ditzelfde geldt voor warmtepompen in warmtenetten. Daarnaast kunnen op momenten met lage tot negatieve elektriciteitsprijzen, hoge productie zon en wind, buffervaten worden verwarmd, die op een later moment het warmtenet voeden.

De koelvraag is moeilijk te sturen en vertoont hoge pieken op warme dagen.

De elektriciteitsvraag van koeling valt goed samen met een piek aan productie van elektriciteit uit zonne-energie. Wamtapwatervoorziening met een elektrische boiler incl. voorraadvat laat toe de wamtapwaterproductie te sturen op gewenste momenten. Elektrisch koken kent een moeilijk te sturen vraag. Het heeft een hoog piekvermogen, maar een beperkte energievraag. Het hoge piekvermogen wordt op grotere schaal sterk afgezwakt omwille van de lage gelijktijdigheid waarop meerdere huishoudens koken. Lokaal kan een kleine thuisbatterij of Vehicle-to-Grid de piek makkelijk opvangen. In de parallelle studie voor E-Top is specifiek naar flexmogelijkheden in de gebouwde omgeving gekeken.

In Hoofdstuk 6 zijn enkele varianten beschouwd om de hier weergegeven vraagpatronen waarbij elektrische warmtepompen meer 's nachts draaien en niet strak op de momentane warmtebehoefte worden ingeregeld.

3.5 Conclusie

Op basis van drie scenario's is de additionele belasting op het elektriciteitsnet als gevolg van elektrificatie in de gebouwde omgeving gemodelleerd. In Tabel 14 is de extra vraag ten gevolge van elektrificatie weergegeven per toepassing. Met name warmtepompen kunnen zorgen voor een toename van de elektriciteitsvraag. De totale additionele elektriciteitsvraag is berekend tussen de 3,9 en 5,7 TWh. In 2018 gebruikte de gebouwde omgeving 56,6 TWh aan elektriciteit (Klimaatmonitor, 2019). De totale additionele elektriciteitsvraag bedraagt tussen de 7 à 10 %.

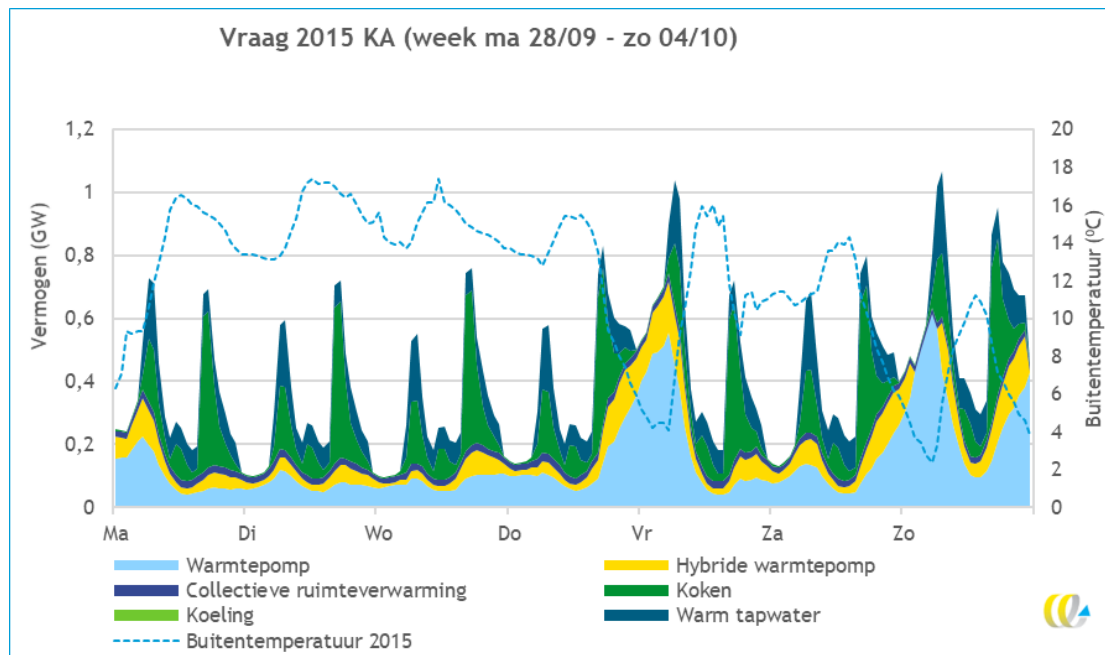
Tabel 14 - Totale additionele elektriciteitsvraag per toepassing in 2030 in TWh/j voor een gemiddeld klimaatjaar

	Minimaal	Klimaatakkoord	Maximaal
	TWh/j	TWh/j	TWh/j
Warmtepompen	2,31	3,15	3,5
Warmtenetten	0,11	0,21	0,25
Tapwater elektrische boiler	0,51	0,72	0,75
Koeling	0,19	0,21	0,22
Koken	0,81	0,90	0,99
Totaal	3,9	5,2	5,7

De belangrijkste factoren in de elektrificatie van zowel de woningbouw als utiliteitsbouw is het beleid met betrekking tot de energiebelasting en de voortgang van de verduurzaming in de bestaande bouw binnen de wijkgerichte aanpak. De klimaatneutrale alternatieven, waaronder elektrificatie, zijn bijna altijd (veel) duurder dan verwarmen met aardgas. Ook door wet- en regelgeving, voor de nieuwbouw en renovatie, maar ook voor het afkoppelen van wijken van het aardgasnet, kan nuttige elektrificatie worden gestimuleerd. Aan de andere kant heeft de wijkgerichte aanpak de doelstelling om 1,5 miljoen woning-equivalenten aardgasvrij te maken voor 2030. De uitvoering hiervan ligt bij de individuele gemeenten. Het is nog niet te zeggen in hoeverre de doelstellingen hiervan behaald worden.

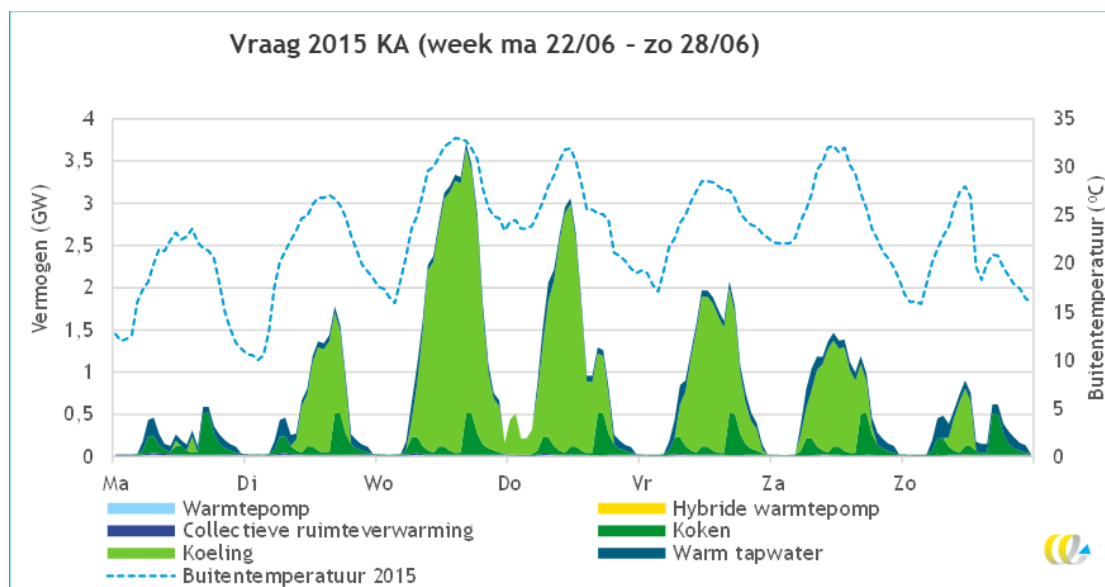
Het vraagpatroon van de gebouwde omgeving wordt gekenmerkt door een lage gemiddelde vraag met hoge pieken, met name in de winterperiode als de productie van zonne-energie laag is. De maximale elektriciteitsvraag bedraagt 5 tot 7 keer de gemiddelde vraag, afhankelijk van het weerjaar. In Figuur 15 is het patroon van de additionele elektriciteitsvraag van de gebouwde omgeving weergegeven voor week 40 van klimaatjaar 2015. Dit is een gemiddelde week. Er is een dagelijks patroon herkenbaar, met een variatie op basis van de buitentemperatuur, waarbij de technieken ten behoeve van ruimteverwarming een groot aandeel hebben.

Figuur 15 - Additionele vraag gebouwde omgeving, in week 40 van klimaatjaar 2015, scenario Klimaatakkoord

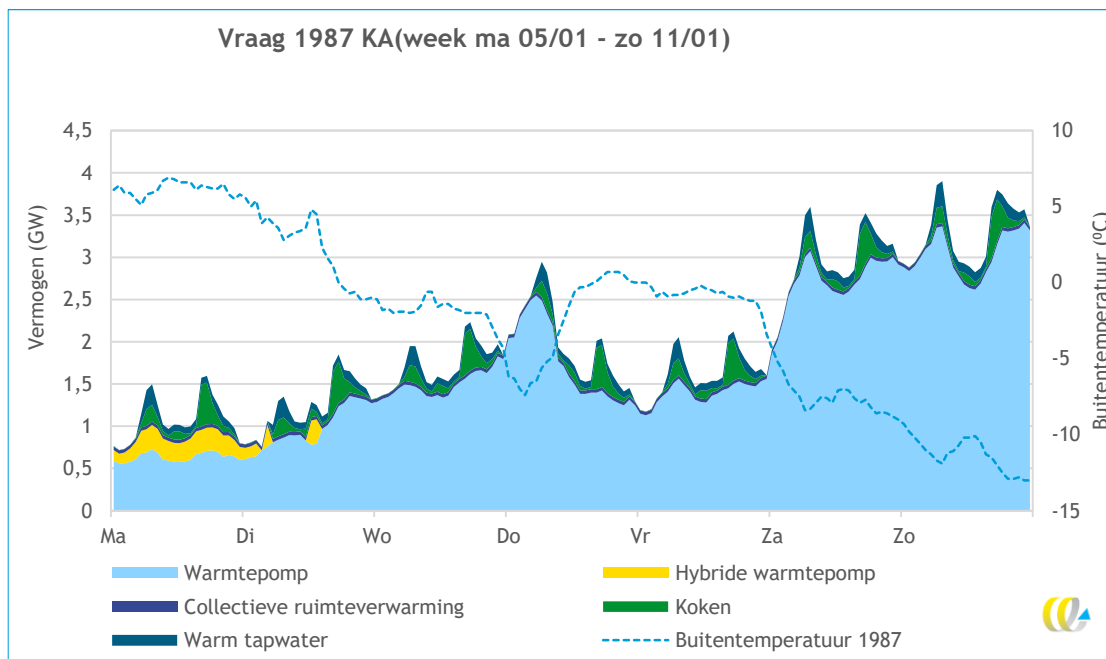


Het patroon is sterk weersafhankelijk, zoals te zien is in Figuur 16 welke een warme week weergeeft. Het patroon wordt hier bepaald door de koeling gedurende de dag. De additionele vermogensvraag ligt een factor 3 hoger dan in Figuur 15.

Figuur 16 - Additionele vraag gebouwde omgeving in week 26 van klimaatjaar 2015, scenario Klimaatakkoord



Figuur 17 - Additionele vraag gebouwde omgeving in week 2 van klimaatjaar 1987, scenario Klimaatakkoord



In Figuur 17 is de tweede week van klimaatjaar 1987 getoond. Dit is een koude week. Het elektriciteitsverbruik van warmtepompen ten behoeve van ruimteverwarming zorgt voor een constante basisvraag, met twee pieken per dag als gevolg van warmtapwaterbereiding en koken.

4 Mobiliteit

4.1 Scope en huidige vraag deelsectoren

4.1.1 Scope

In dit onderzoek beschouwen we elektrificatie in de deelsectoren binnen mobiliteit zoals deze worden gehanteerd in de Klimaat- en Energieverkenning, namelijk:

- wegverkeer:
 - personenauto's;
 - bestelauto's;
 - vrachtwagens;
 - bussen;
 - tweewielers.
- binnenvaart;
- mobiele werktuigen;
- rail;
- overig (luchtvaart, defensie, visserij en recreatievaart op Nederlands grondgebied).

We focussen daarbij op de deelsectoren waarin tot 2030 de grootste ontwikkeling in elektrificatie wordt verwacht, namelijk personenauto's, bestelauto's, vrachtwagens in de stadslogistiek en bussen. De ontwikkelingen op het gebied van elektrificatie van vrachtwagens voor lange afstandstransport, tweewielers, binnenvaart en mobiele werktuigen worden kort beschreven. Rail maakt gebruik van een eigen elektriciteitsnetwerk en wordt in de cijfers alleen meegenomen ter vergelijking met de overige sectoren.

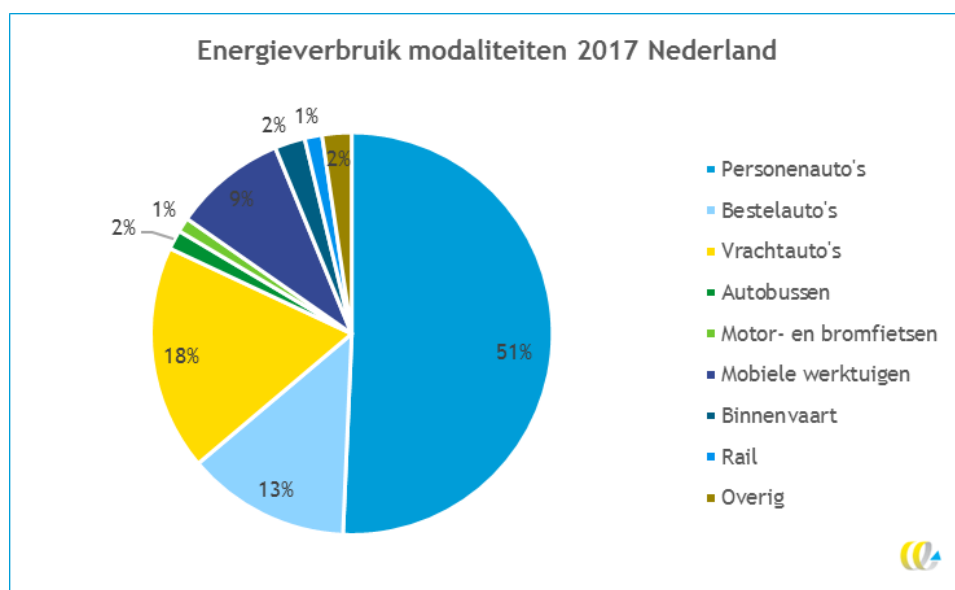
Voor de categorie 'overig' hebben we een korte beschrijving opgenomen over elektrificatie in de (binnenlandse) luchtvaart. De andere onderdelen in de categorie 'overig' (defensie, visserij en recreatievaart) laten we verder buiten beschouwing, vanwege de beperkte energievraag en verwachte elektrificatie tot 2030. Internationale lucht- en zeevaart worden buiten beschouwing gelaten, net als in de Klimaat- en Energieverkenning.

4.1.2 Huidige energievraag

Het huidige energiegebruik van de sector mobiliteit⁸ bedraagt ca. 142 TWh (510 PJ) per jaar (Klimaat- en Energieverkenning, 2019). Binnen de sector is ca. 85% van de energievraag afkomstig uit het wegverkeer. Mobiele werktuigen is daarna de grootste categorie met een aandeel van 9%. In de huidige situatie wordt ongeveer 96% van alle energie voor mobiliteit geleverd door fossiele brandstoffen tegenover 1,4% (1,9 TWh) door elektriciteit. Deze elektriciteitsvraag komt hoofdzakelijk van het railverkeer.

⁸ Met uitzondering van internationale lucht- en zeevaart.

Figuur 18 - Energiegebruik sector mobiliteit en transport in 2017 (PBL, 2019b). Overig bestaat uit luchtvaart, defensie, visserij en recreatievaart op Nederlands grondgebied



4.2 Potentieel elektrificatie

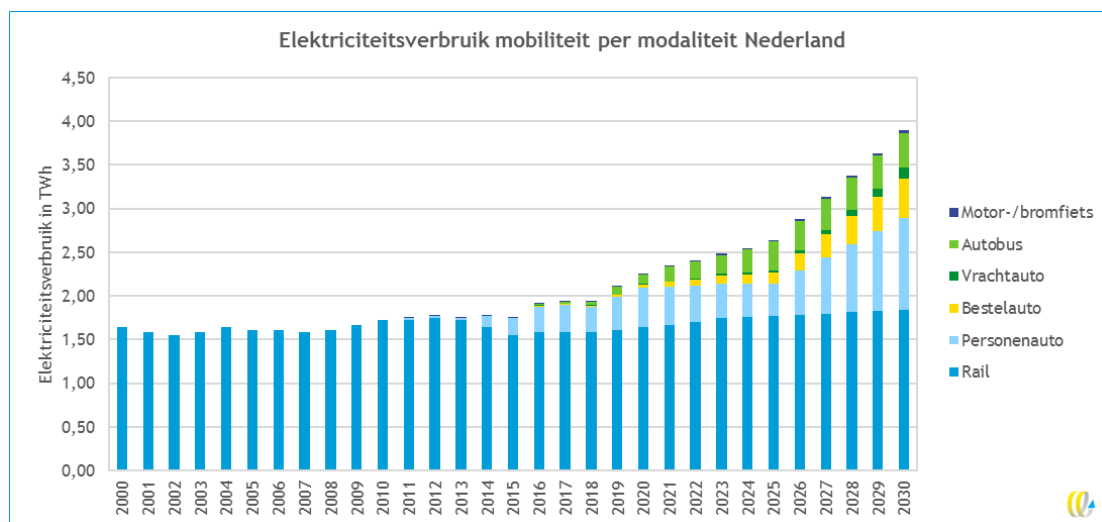
4.2.1 Ontwikkeling tot 2030 - basispad

Er zijn uiteenlopende prognoses over het potentieel van elektrificatie in de verschillende vervoerswijzen binnen mobiliteit.

Tot aan 2030 is – op basis van vastgesteld en voorgenomen beleid – de verwachting dat verdere elektrificatie vooral plaatsvindt bij personenauto's, bestelauto's en bussen.

In Figuur 19 is deze verwachte ontwikkeling weergegeven (PBL, 2019b). De totale elektriciteitsvraag voor mobiliteit verdubbelt van ca. 1,9 TWh in 2017 tot 3,9 TWh in 2030.

Figuur 19 - Ontwikkeling elektriciteitsvraag mobiliteit tot 2030 (o.b.v. KEV (PBL, 2019b))



Tabel 15 - Verwachte minimale elektrificatie cf. Klimaat- en Energieverkenning KEV 2019 (PBL, 2019b)

Modaliteiten	Elektrisch/ PHEV	Elektrische km's ⁹ (cf. PBL, 2019b)		Energievraag elektriciteit (TWh)		Schatting aantal elektrische voertuigen in wagenpark ¹⁰
		2017	2030	2017	2030	
Personenauto	<i>Elektrisch</i>	0,7%	5,1%	0,15	0,98	500.000
Personenauto	<i>Plug-in hybride</i>			0,16	0,07	
Bestelauto's	<i>Elektrisch</i>	0,2%	4,7%	0,02	0,45	49.000
Vrachtauto's						2.200
Autobussen	<i>Elektrisch</i>	3,9%	41,0%	0,04	0,39	2.900
Rail	<i>Elektrisch</i>			1,58	1,84	-
Totaal	-	-	-	1,9	3,9	-

Aanvullend beleid vanuit het Klimaatakkoord is er op gericht elektrificatie verdergaand te stimuleren. Voor 2030 is bijvoorbeeld het doel gesteld dat alle nieuw verkochte personenauto's elektrisch zijn. In het ZE-(zero emission)-Busakkoord is afgesproken dat vanaf 2030 alleen ZE-voertuigen in het OV worden ingezet, waardoor naar verwachting het merendeel van de bussen elektrisch zal zijn. Verder zullen ZE-zones in 30-40 grote middelgrote steden zorgen voor elektrificatie van bestelbussen en vrachtverkeer in de stadslogistiek.

Energievraag vs. voertuigaantallen

Om de totale energievraag van mobiliteit te bepalen kijken we in dit onderzoek, naast het verwachte laadgedrag verdeeld over de week, naar de totale energievraag per jaar per voertuigcategorie. Deze totale energievraag per voertuigcategorie hangt af van het totaal aantal gereden kilometers in die voertuigcategorie en het energiegebruik per kilometer van een gemiddeld voertuig in die categorie. Veel prognoses voor elektrisch rijden worden uitgedrukt in het aantal elektrische voertuigen in het wagenpark. De totale energievraag die daarbij wordt berekend is sterk afhankelijk van het jaarkilometrage per voertuig en het energiegebruik per km dat wordt aangenomen.

Om verschillende soorten data met elkaar te matchen, hebben we in ons onderzoek gegevens over het totale energiegebruik per voertuigcategorie uit de KEV omgerekend naar voertuigaantallen. Dit hebben we gedaan op basis van huidige cijfers over gemiddelde jaarkilometrages per voertuigcategorie.

Op basis van verwachte ontwikkelingen in techniek en markt zijn er ook verschillende prognoses die een hogere elektrificatie voor 2030 voorspellen dan in het Klimaatakkoord is afgesproken. In dit onderzoek zullen we deze cijfers weergeven om zicht te krijgen op de bandbreedte voor elektrificatie in 2030.

Wij zullen in dit onderzoek werken met drie scenario's voor 2030:

1. Minimaal: het basispad conform de KEV 2019.
2. Klimaatakkoord: de doelstellingen uit het Klimaatakkoord.
3. Maximaal: de maximale schattingen voor 2030 vanuit actuele literatuur.

⁹ Voor bestelauto's en bussen is het aantal voertuig km's geschat o.b.v. het energiegebruik.

¹⁰ Berekend o.b.v. KEV-cijfers over het totale energiegebruik en CBS-cijfers over het huidige gemiddelde jaarkilometrages per voertuigcategorie, zie toelichting in tekstbox voor enkele kanttekeningen bij deze berekening.

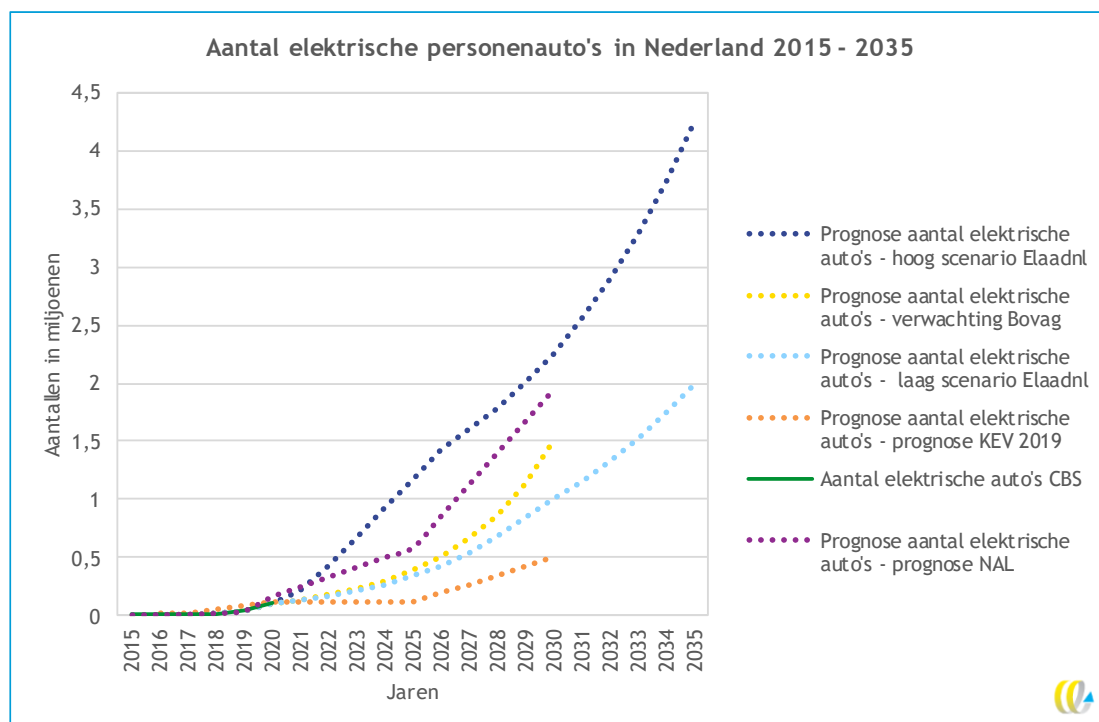
4.2.2 Personenauto's

In de aanloop naar 2030 worden fiscale maatregelen getroffen om de groei van elektrische personenauto's in het wagenpark te stimuleren. Deze maatregelen richten zich zowel op de zakelijke gebruiker (via verlaagde bijtelling) als de particuliere gebruiker (via aanschafsubsidies, aangepaste bpm en mrb). Daarnaast wordt via de Nationale Agenda Laadinfrastructuur geïnvesteerd in de uitbreiding van de laadinfrastructuur.

De productie van accu's zal de komende jaren goedkoper worden waardoor elektrische auto's betaalbaarder worden. Hoogleraar transportbeleid van de TU Delft Bert van Wee waarschuwt dat de prijs weer omhoog kan gaan als fabrikanten een hogere winstmarge willen gaan hanteren voor elektrische auto's. Ook de Corona-crisis zal gevolgen hebben voor de productie en kosten van elektrische auto's. Tijdens de Corona-crisis is de verkoop van personenauto's sterk gedaald. Het is op dit moment nog onduidelijk wat de gevolgen zijn voor de fabrikanten en welke gevolgen dit heeft voor de productie en prijsstelling van elektrische voertuigen in de komende jaren.

Op basis van de doelstellingen in het Klimaatakkoord wordt in de Nationale Agenda Laadinfrastructuur uitgegaan van ca. 1,9 miljoen elektrische auto's in 2030 (RVO, 2019). Onderzoek van Elaadnl laat zien dat het totale aantal elektrische personenauto's tussen de 1 en 2,2 miljoen zal komen te liggen in 2030 (ELaadnl, 2019b; AD, 2019), Bovag). In de Klimaat- en Energieverkenning is een energieverbruik voor elektrische auto's opgenomen dat – op basis van het huidige gemiddelde jaarkilometrage van personenauto's – ongeveer overeenkomt met 500.000 elektrische personenauto's in 2030. Hierbij merken we op dat in de KEV 2019 het beleid is opgenomen dat tot 1 mei 2019 vastgesteld of voorgenomen was. Het is de verwachting dat in de KEV 2020 het aandeel elektrische vervoer in 2030 hoger geraamd zal worden.

Figuur 20 - Verschillende prognoses van het aantal EV-personeelauto's in Nederland tussen 2015 en 2035



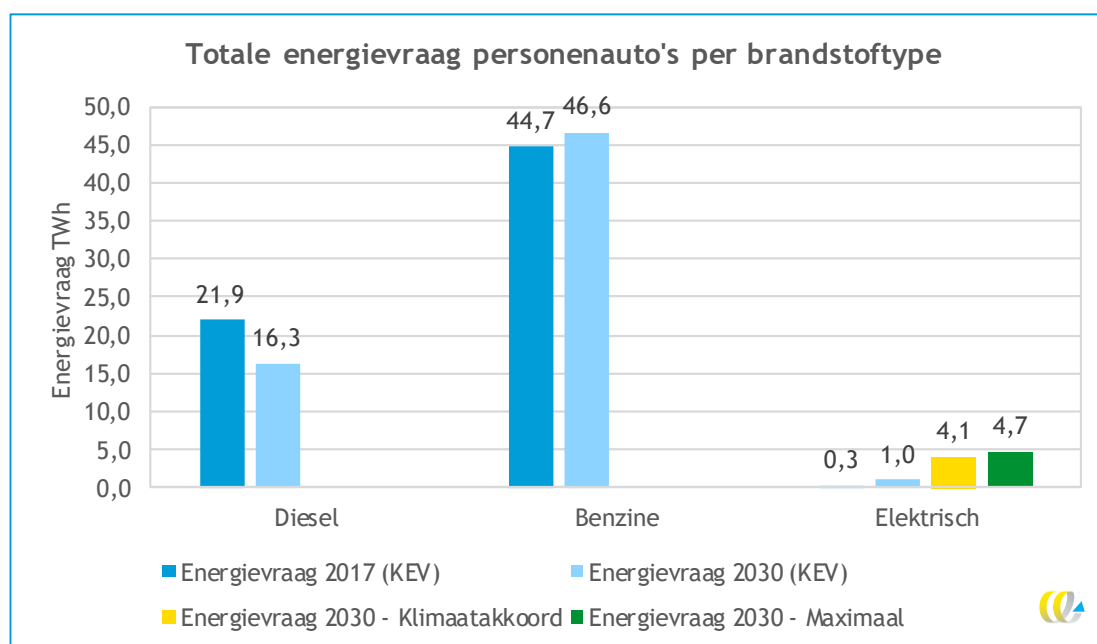
Energievraag per voertuig

Richting 2030 neemt het totale aantal kilometers dat wordt afgelegd door personenauto's in Nederland toe ten opzichte van 2017 met ca. 15% (PBL, 2019b). Dit wordt onder andere veroorzaakt door bevolkingsgroei. Samen met de verwachte elektrificatie heeft dit gevolgen voor de energievraag van personenauto's. In Figuur 21 is te zien dat er in 2030 een afname is in de energievraag van dieselauto's ten opzichte van 2017. Dit komt omdat het aandeel dieselauto's in de vloot sterk terugloopt. Voor benzineauto's is er een lichte stijging van het verbruik: hoewel het aandeel benzineauto's in de vloot iets terugloopt, is de toename van het totaal aantal afgelegde kilometers groter, waardoor het totale energiegebruik per saldo toeneemt t.o.v. 2017. Voor elektrische auto's stijgt het energiegebruik: het aantal elektrisch afgelegde kilometers neemt toe door de elektrificatie.

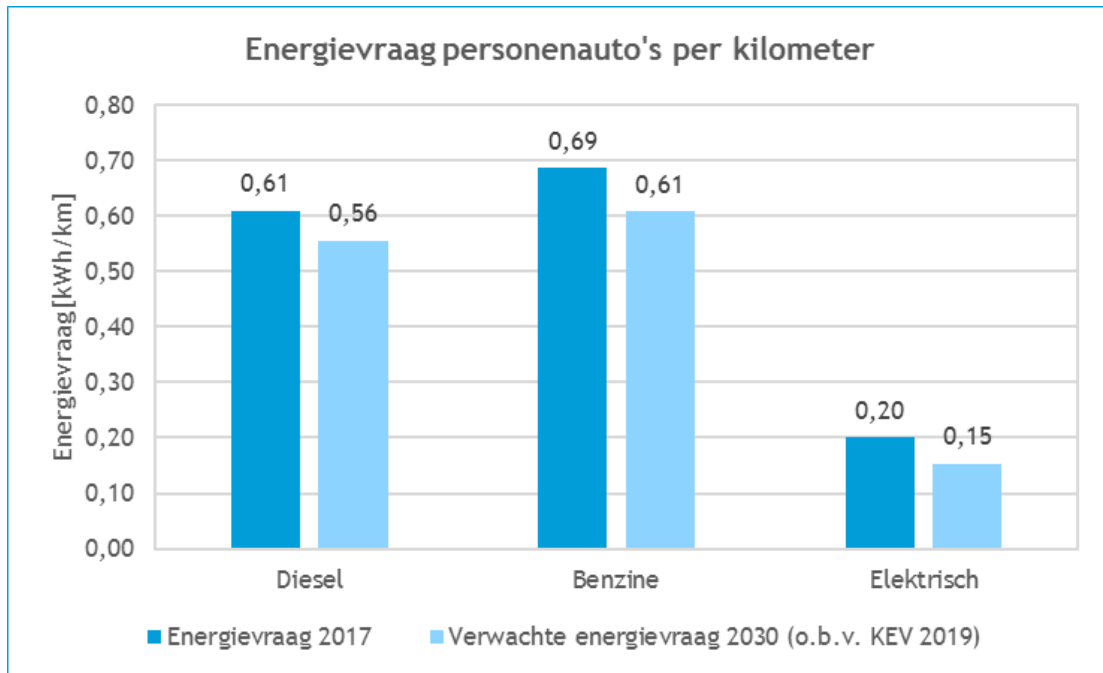
Het energiegebruik per kilometer ligt voor een benzine- en dieselauto in dezelfde orde grootte, terwijl het energiegebruik van een elektrische personenauto een factor 3 tot 4 lager is, zie Figuur 22. De reden hiervan is het lage rendement van verbrandingsmotoren (25 a 30%). Dit betekent dat bij vervanging van een conventionele auto door een elektrische auto het totale energiegebruik afneemt. Het wagenpark voor personenauto's wordt gedomineerd door benzineauto's, gevolgd door dieselauto's. Dieselauto's hebben daarentegen een hoger jaarkilometrage dan benzineauto's, namelijk 23.334 km respectievelijk 11.014 km (CBS, 2019). De energievraag per personenauto is weergegeven in Figuur 21. Hierin is zichtbaar dat het hoge jaarkilometrage van dieselauto's ervoor zorgt dat de energievraag per voertuig hoger ligt dan bij benzine en elektrisch.

In vergelijking met conventionele personenauto's is de energievraag van een elektrische personenauto per km op dit moment ongeveer 70% lager en in 2030 ongeveer 75% lager. Rekening houdend met het gemiddelde jaarkilometrage voor verschillende brandstofsoorten, ligt het jaarverbruik van een dieselauto in 2017 op ongeveer 14,2 MWh per jaar, van een benzineauto op 7,6 MWh per jaar en van elektrische auto ongeveer 3,1 MWh per jaar.

Figuur 21 - Totale energievraag personenauto's 2017 en 2030



Figuur 22 - Energievraag personenauto's per kilometer in 2017 en 2030



Bron: (PBL, 2019b)¹¹.

Impact op elektriciteitsvraag 2030

Op basis van bovenstaande inventarisatie schatten wij de bandbreedte van de elektriciteitsvraag voor personenauto's in 2030 tussen de 1,05 TWh (basispad KEV) en 4,72 TWh (op basis van o.a. Elaadnl).

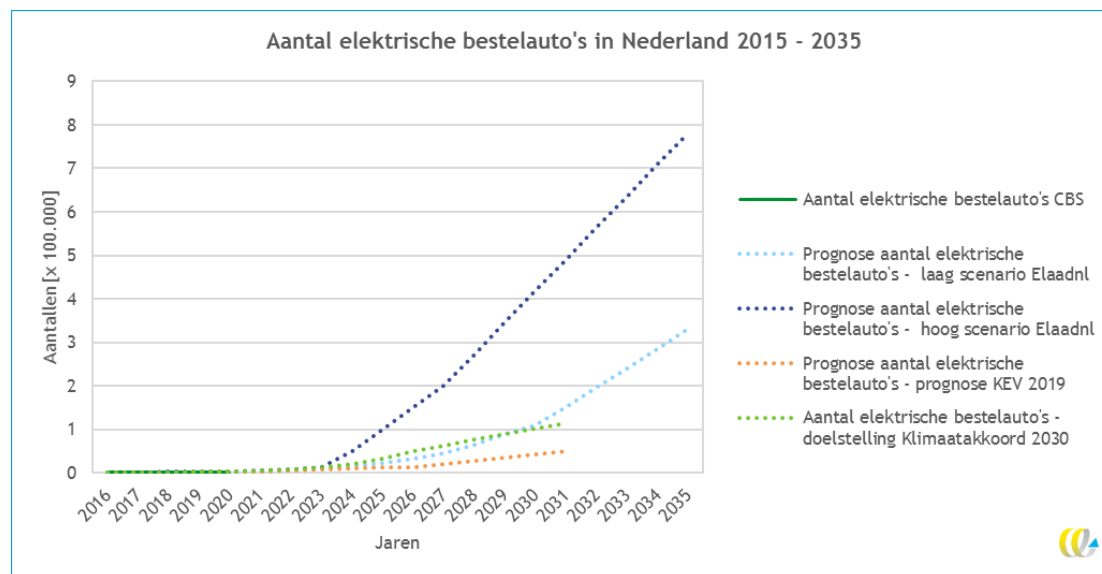
4.2.3 Bestelauto's

Er zijn momenteel nog weinig elektrische bestelauto's op de weg. Op 1 januari 2020 stonden er 4.328 elektrische bestelauto's geregistreerd van de in totaal 939.801 bestelauto's in Nederland, ca. 0,5% (CBS, 2020d). De verwachting is dat dit de komende jaren flink zal gaan stijgen naar een aantal van 110.000 tot meer dan 400.000 bestelauto's in 2030, zie Figuur 23 (Elaadnl, 2020). De bestelauto's zullen gedeeltelijk bij bedrijven en gedeeltelijk in woonwijken geladen gaan worden. Dat vereist aanleg van publieke laadpunten. Bestelauto's maken vooral gebruik van laadoplossingen van 3,7 kW (voor thuisladen), 11 kW (voor publiek en depot-laden) tot 50kW (voor snelladen), waarmee het gebruik van laadinfrastructuur grotendeels overlapt met het aanbod voor personenauto's (CE Delft, 2019b).

Vanuit het Klimaatakkoord zullen vooral de instelling van ZE-zones voor stadslogistiek invloed hebben op het aantal bestelbussen in Nederland. In 2025 dienen in 30-40 steden middelgrote ZE-zones te zijn ingericht. In het Klimaatakkoord wordt als gevolg van dit beleid uitgegaan van 115.000 elektrische bestelauto's in 2030.

¹¹ De HBEFA-database geeft een hoger verbruik per elektrische km, namelijk 0,23 kWh/km voor 2017 en 2030.

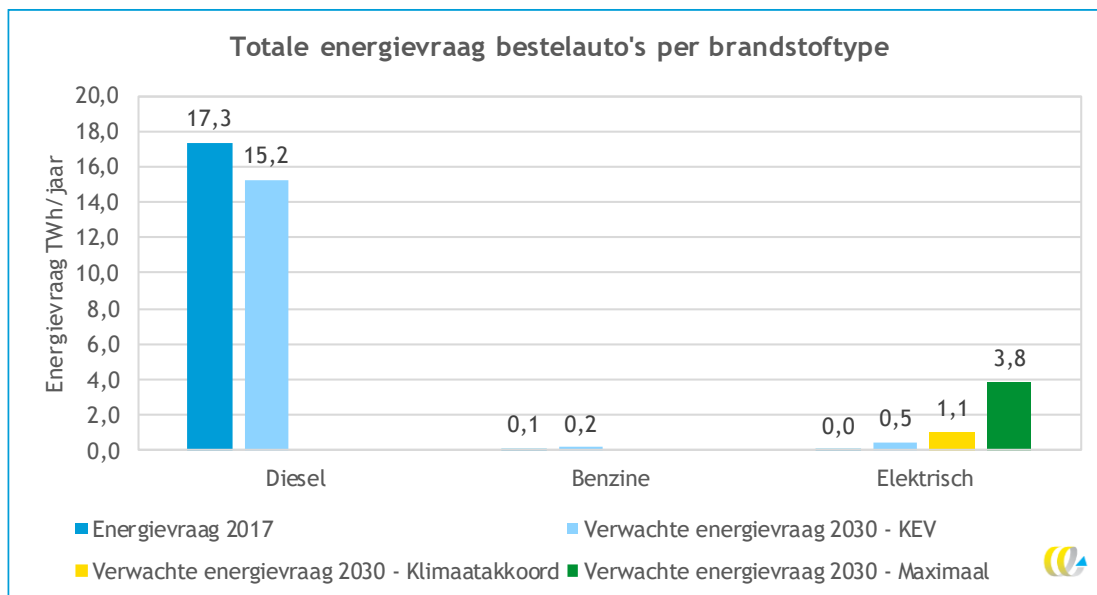
Figuur 23 - Groei van het aantal elektrische bestelauto's in Nederland tussen 2015 en 2035



Impact op elektriciteitsvraag 2030

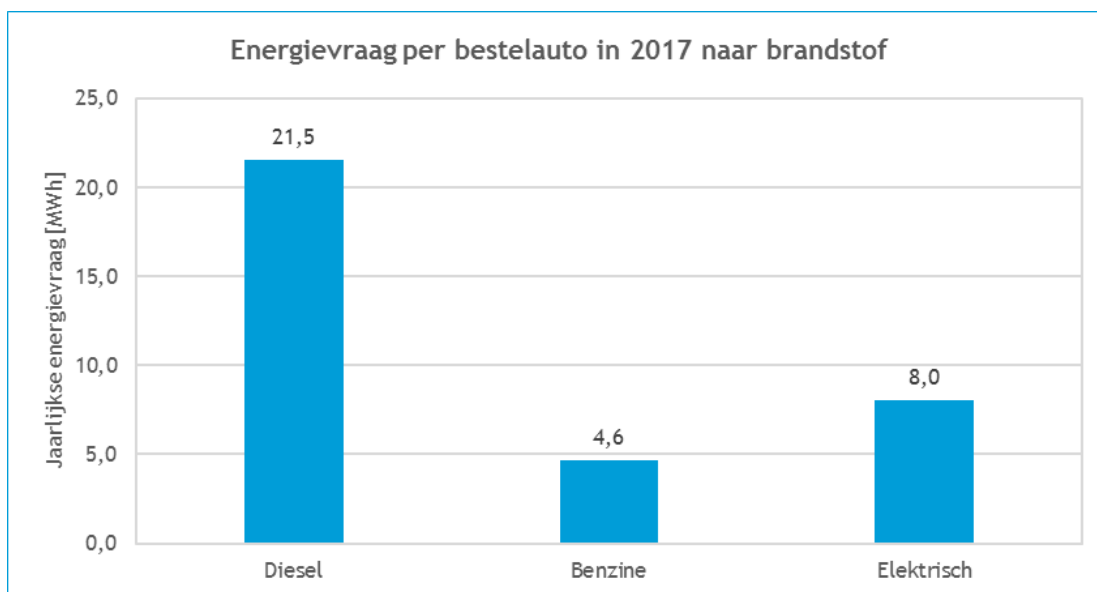
Op basis van bovenstaande inventarisatie schatten wij de bandbreedte van de elektriciteitsvraag voor bestelauto's in 2030 tussen de 0,45 TWh (basispad KEV) en 3,83 TWh. In Figuur 24 is de totale energievraag voor bestelauto's weergegeven per brandstof. Veruit het grootste aantal bestelauto's is diesel aangedreven. De prognose is dat door elektrificatie richting 2030 de energievraag naar diesel af zal nemen en de vraag naar elektriciteit toe zal nemen. In Figuur 25 is de totale energievraag per voertuig weergegeven in 2017. De energievraag naar diesel is meer dan vier keer zo groot als de energievraag naar benzine en elektriciteit. De relatief lage energievraag van benzinebestelauto's wordt verklaard doordat het gemiddelde jaarkilometrage van een benzinebestelauto ca. drie keer lager ligt dan het jaarkilometrage van een gemiddelde dieselbestelauto (CBS, 2019).

Figuur 24 - Totale energievraag bestelauto's 2017 en 2030



Bron: KEV.

Figuur 25 - Energievraag per bestelauto per jaar naar brandstof in 2017



Bron: (PBL, 2019b).

4.2.4 Vrachtverkeer

Trucks in stadslogistiek

De verwachting is dat tussen 2023 en 2026 de TCO¹² voor een elektrische truck in de stadslogistiek aantrekkelijk wordt waardoor het aandeel elektrische trucks in de stadslogistiek zal stijgen. Ook de regelgeving rondom emissies in stedelijke gebieden zal hieraan bijdragen. Bij 100% elektrificatie zal de vermogensvraag 1,17 TWh per jaar bedragen. In de outlook 'Volgeladen naar zero-emissie stadslogistiek' van Elaadnl is deze hoeveelheid gespecificeerd per gemeente. Ook wordt er per sector (zoals afvalinzameling en supermarktbevoorrading) een doorkijk gegeven naar het aantal laadpunten per locatie. Distributiecentra en standplaatsen zijn veelal geclusterd waardoor de lokale energievraag enorm kan toenemen. 's Nachts laden is hierbij een duurzame en goedkope optie (Noordijk et al. 2019).

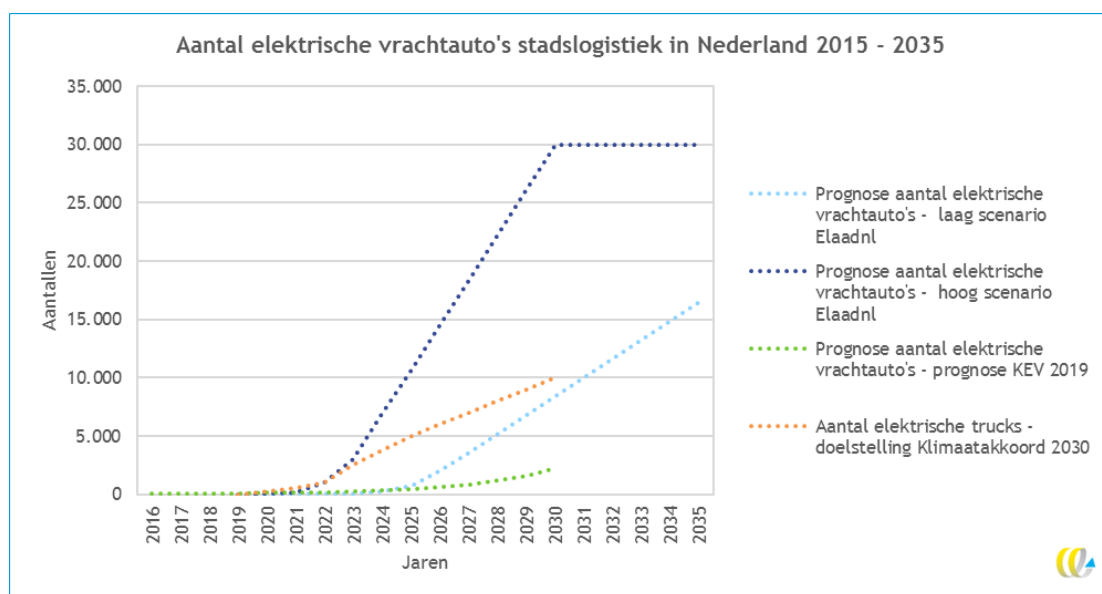
Impact op elektriciteitsvraag 2030

De verwachting is dat er tussen de 2.200 trucks (minimaal scenario o.b.v. KEV) en de 30.000 trucks (maximaal scenario) geëlektrificeerd zullen worden in de stadslogistiek (ELaad, 2020b). Dit is een elektrificatie tussen de 7,4% en de 100%. De elektriciteitsvraag komt daarmee naar verwachting tussen de 0,1 TWh en de 1,8 TWh te liggen, zie Figuur 27. In het Klimaatakkoord wordt uitgegaan van 10.000 ZE-trucks in de stadslogistiek in 2030, zie Figuur 26. Het uitgangspunt hierbij is dat de hoeveelheid van 30.000 trucks in de stadslogistiek niet zal toenemen tussen 2017 en 2030.

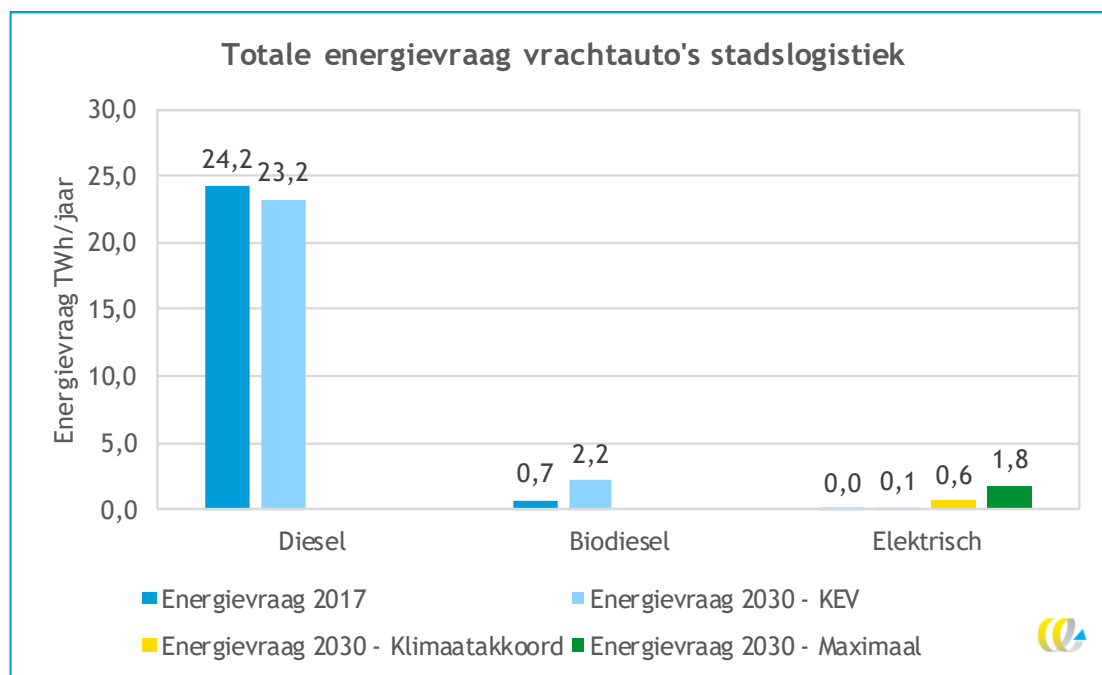
Bij volledige elektrificatie van de 30.000 trucks zal de totale energievraag dus 1,8 TWh worden in plaats van in totaal 5,2 TWh bij een bijna volledig diesel aangedreven wagenpark in 2017. Elektrificatie levert daardoor een besparing op van 3,4 TWh op jaarbasis vanaf 2030. In Figuur 28 is duidelijk te zien dat de jaarlijkse energievraag per vrachtauto voor diesel meer dan drie keer zo hoog is als voor elektrisch aangedreven vrachtauto's.

¹² TCO = Total Cost of Ownership, het totaal aan vaste en variabele kosten voor het bezit en gebruik van een voertuig.

Figuur 26 - Groei van het aantal elektrische vrachtauto's in de stadslogistiek in Nederland tussen 2015 en 2035



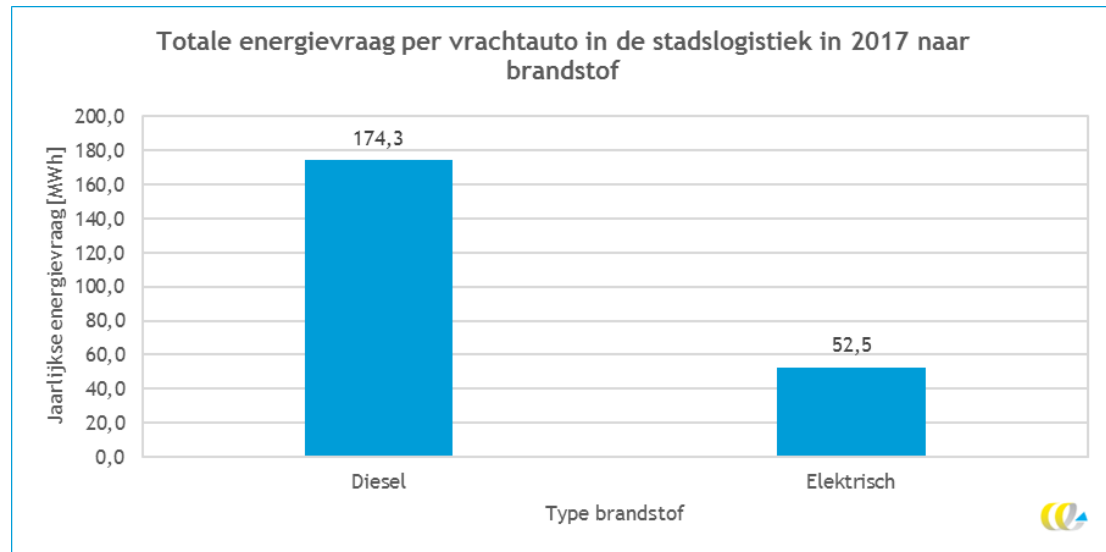
Figuur 27 - Totale energievraag stadslogistiek 2017 en 2030



Bron: KEV; ELaad.



Figuur 28 - Totale energievraag per vrachtauto in 2017 naar brandstof



Wegtransport

In het Klimaatakkoord zijn geen specifieke doelen gesteld voor elektrificatie in het wegtransport. ZE-technieken zijn in deze sector nog in een ontwikkelingsfase. Voor lange afstand-wegtransport worden op dit moment nog geen elektrische voertuigen gebruikt, vanwege de beperkte actieradius van elektrische trucks en het gebrek aan geschikte laadinfrastructuur. Tesla verwacht in 2021 de eerste truck voor lange afstand op de markt te brengen. Voor de toekomst wordt naast volledige elektrische trucks ook onderzoek gedaan naar trucks op waterstof (FCEV), op ethanol of hybride voertuigen. Daarnaast wordt onderzocht of bovenleidingen toepasbaar zijn op belangrijke transportroutes, zodat voertuigen tijdens het rijden kunnen worden bijgeladen. Siemens heeft een prototype pantograaf hiervoor ontwikkeld, waarmee sinds 2010 op verschillende testlocaties testen zijn uitgevoerd met hybride trucks (Siemens, 2017).

Uit verschillende onderzoeken (o.a. EVConsult ; ZEnMo, 2019) blijkt dat de vijfjarige TCO voor elektrische trucks in de komende jaren concurrerend wordt. Een korting op de vrachtwagenheffing kan hierbij stimulerend werken voor de inzet van elektrische trucks. Echter, de hogere aanschafprijs kan alsnog een barrière vormen, die mogelijk omlaag gaat wanneer batterijprijzen zullen dalen. FCEV-trucks zijn over het algemeen duurder dan elektrische trucks, maar hebben meestal ook een hogere actieradius.

Impact op elektriciteitsvraag 2030

Het aandeel elektrische vrachtwagens in het langeafstandstransport hebben we voor dit onderzoek niet gekwantificeerd. We schatten in dat er weinig aanvullend potentieel is, naast het potentieel dat in de stadslogistiek wordt benut.

4.2.5 Bussen

In het bestuursakkoord ZE OV-Bussen staat dat nieuwe OV-bussen vanaf 2025 alleen gebruik maken van hernieuwbare brandstoffen en dat het OV-busvervoer vanaf 2030 volledig emissievrij is. Momenteel rijdt 10% van de 4.950 OV-bussen in Nederland elektrisch.

In 2030 zal dit naar verwachting tussen de 4.100 en 4.950 bussen zijn.

Voor touringcars (ca. 50% van het totale aantal buskilometers) is geen beleid voor elektrificatie. Vanwege de hogere kostprijs en lagere actieradius van dit soort zwaardere elektrische voertuigen, verwachten we dat hier tot 2030 geen substantiële elektrificatie gaat plaatsvinden.

Impact op elektriciteitsvraag 2030

De ontwikkeling naar ZE-bussen zit reeds in het basispad van de KEV: in 2030 wordt een energievraag van ca. 0,39 TWh berekend (0,36 TWh hoger dan nu). Voor het Klimaatakkoord-scenario en het Klimaatakkoord+-scenario is dezelfde energievraag aangenomen.

4.2.6 Motor- en bromfietsen

Brom- en snorfietsen

In het Klimaatakkoord is afgesproken dat nieuwverkopen van snorfietsen in 2025 en van bromfietsen in 2030 100% emissieloos moeten zijn. Over motorfietsen zijn geen afspraken gemaakt. In 2019 was 15% van de nieuw verkochte snorfietsen en 14% van de nieuw verkochte bromfietsen elektrisch (BOVAG; RAI, 2020). Van de nieuw verkochte motorfietsen was in 2019 1% elektrisch (BOVAG; RAI, 2020).

Impact op elektriciteitsvraag 2030: De ontwikkeling naar ZE-tweewielers zit reeds in het basispad van de KEV: er wordt een energievraag berekend van 0,03 TWh. Voor het KA en KA+ is dezelfde energievraag aangenomen.

Elektrische fietsen

De elektrische fiets is sterk in opkomst. In 2019 was 42% van de nieuw verkochte fietsen elektrisch (RAI ; BOVAG ; GfK, 2020). De elektrische fiets wordt grotendeels gebruikt als vervanging voor gewone fietsen, maar kan voor korte ritten ook worden ingezet als vervanging van een rit per auto, OV of scooter. In eerste instantie werden elektrische fietsen vooral gebruikt voor recreatief fietsen bij senioren, maar inmiddels worden elektrische fietsen steeds vaker ingezet voor woon-werk verkeer en is de gebruikersgroep breder (KiM, 2018). In het Klimaatakkoord wordt ingezet op het stimuleren van de e-bike voor gebruik van woon-werkverkeer, maar er worden geen kwantitatieve doelstellingen benoemd.

Impact op elektriciteitsvraag 2030: niet gekwantificeerd, te weinig gegevens.

Light Electric Vehicles(LEVs)

LEVs bieden een alternatief voor auto's, bestelauto's en kleine vrachtwagens in steden. Steden zijn bezig om LEVs in te passen in de stad, waarbij verschillende voertuigtypen en toepassingen worden geïntroduceerd. Daarbij staat op dit moment onder andere de veiligheid centraal. Amsterdam is bezig om een visie te ontwikkelen op LEVs, waaronder de Biro.

Inmiddels is er een pilot gestart in Rotterdam met deelLEVs. De LEVs zijn in opkomst en er is in aantallen nog geen prognose vindbaar voor 2030.

Impact op elektriciteitsvraag 2030: niet gekwantificeerd, te weinig gegevens.

4.2.7 Mobiele werktuigen

De emissie van mobiele werktuigen wordt voornamelijk veroorzaakt binnen de sectoren bouw (42%) en landbouw (38%) en industrie en containeroverslag (14%). In het Klimaat-akkoord zijn afspraken gemaakt voor de inzet van zero-emissie bouwverkeer en zero-emissie mobiele werktuigen in de stad. Hierbij wordt een koppeling gemaakt met de invoering van ZE-zones. Samen met de uitwerking van de Green Deal Het Nieuwe Draaien en de Green Deal Bouwlogistiek wordt een besparing verwacht van 0,4 Mton CO₂ in 2030.

Bouw

Recent onderzoek (TNO; Spike; Connekt, 2020) naar elektrificatie van twee middelgrote bouwmachines laat zien dat elektrificatie van bouwmachines technisch mogelijk is en dat de terugverdientijd economisch interessant kan zijn. Een belangrijke voorwaarde voor toepassing in de bouw is dat er voldoende laadmogelijkheden (krachtstroom) nodig zijn op de bouwplaatsen. Het gebruik van bouwmachines kan per dag zeer wisselend zijn en per bouwmaschine grote pieken hebben, wat zowel op techniek als gedrag (planning van laadmomenten) aandacht vraagt. Uit een inventarisatie van Natuur & Milieu (2019b) blijkt dat financiering, aanbestedingseisen, laadinfrastructuur en beeldvorming als belangrijkste belemmerende factoren worden ervaren voor de toepassing van ZE-machines in de bouw. De invoering van ZE-zones kunnen juist helpen, mits er voldoende uniforme regelgeving komt en er ook wordt gehandhaafd op bouwplaatsen.

Impact op elektriciteitsvraag 2030: 10% van de mobiele werktuigen ZE in KA en in KA+ 20%. Dit leidt tot een extra elektriciteitsvraag van ca. 0,5 tot 1,1 TWh.

Landbouw

Op het gebied van mobiele werktuigen in de landbouw is relatief weinig informatie beschikbaar. Dit komt doordat de markt nog volop in ontwikkeling is en het landelijk beleid zich focust op mobiele werktuigen in de bouwsector. Er is inmiddels een volledig elektrische tractor ontwikkeld met een capaciteit van 80 kWh die ongeveer 5 uur kan rijden met een volgeladen batterij. Toch verwacht het grootste aandeel van de Nederlandse boeren dat volledig elektrische werktuigen niet de toekomst hebben en dat er altijd een combinatie zal zijn met een andere brandstof/aandrijving. Eén van de grootste fabrikanten van tractoren verwacht over tien jaar een marktintroductie en -penetratie van volledig elektrische tractoren. Tot dan gaat het vooral om gedeeltelijke elektrificatie van werktuigen.

Boeren en loonbedrijven zullen op termijn meer zelf elektriciteit op gaan wekken waardoor het interessant wordt om over te stappen op elektrische aandrijving. Belangrijk is wel dat de werktuigen snel opgeladen kunnen worden (Boerderij, 2019; 2020; Nieuwe Oogst, 2018).
Impact op elektriciteitsvraag 2030: niet gekwantificeerd, te weinig gegevens.

4.2.8 Binnenvaart

Bij de inzet van duurzame energiedragers in de binnenvaart zet het Klimaatakkoord in op een combinatie van (hybride) elektrisch, waterstof en duurzame biobrandstoffen (gezamenlijk 1,39 TWh). Het doel is om in 2030 150 ZE-schepen in te zetten.

De belangrijkste belemmering voor verduurzaming in de binnenvaart bedragen de meer-kosten van het benodigde materieel. Twee scheepsbouwers hebben in 2019 elektrische containerschepen voor de binnenvaart ontwikkeld. Het schip dat PortLiner ontworpen heeft kan 270 containers vervoeren en 35 uur varen. Daarnaast is er in Noorwegen een binnenvaartschip in de vaart genomen met een bereik van 56 kilometer¹³. De laadinfrastructuur voor de binnenvaart moet nog ontwikkeld worden. Elektrificatie is (op termijn) één van de opties maar de batterijtechnologie moet nog doorontwikkeld worden¹⁴. Daarnaast is waterstof (op langere termijn) en duurzame biobrandstoffen (op kortere termijn) zijn serieuze alternatieven. De toepassing van walstroom (o.a. voor cruiseschepen) is technisch beter te realiseren (De Ingenieur, 2019; BNR, 2019; Logistiek, 2019; Nieuwsblad Transport, 2020; EC, 2019).

Impact op elektriciteitsvraag 2030: de doelstelling van 150 ZE-schepen in het Klimaat-akkoord hebben we gekwantificeerd met de aanname dat 70% van deze schepen elektrisch worden aangedreven (met batterijpakketten) en 30% via een waterstofcel. Hierbij wordt een elektrische energievraag van 0,22 TWh/jaar berekend. Voor het Klimaat-akkoord-+-scenario hebben we het dubbele aangenomen.

4.2.9 (Binnenlandse) luchtvaart

Elektrificatie in de (binnenlandse) luchtvaart is bijvoorbeeld mogelijk via het elektrificeren van grondoperaties (taxiën). Op lange termijn is het wellicht ook mogelijk om korte (recreatieve) vluchten volledig elektrisch uit te voeren. Vanwege de beperkte omvang en onzekerheid van deze ontwikkelingen laten we deze deelsector in dit onderzoek verder buiten beschouwing.

Impact op elektriciteitsvraag 2030: niet gekwantificeerd, te weinig gegevens.

4.3 Factoren, barrières en kansen voor elektrificatie

In het algemeen zijn de onderstaande factoren van belang voor de elektrificatie binnen mobiliteit.

Techniek: Bij de ontwikkeling van elektrische voertuigen zijn een aantal technische aspecten van belang om te komen tot een volwaardig alternatief voor conventionele voertuigen. Batterij-ontwikkeling is hierin cruciaal. Batterijpakketten moeten met een beperkte massa en volume in voertuigen (of werktuigen) ingepast kunnen worden en een voldoende grote actieradius opleveren voor voertuigen. Ook de levensduur van de batterij is een belangrijk aandachtspunt. Voor lichtere voertuigen en bussen is de batterijtechniek inmiddels voorhanden, voor zwaardere voertuigen (vrachtverkeer, binnenvaartschepen) en mobiele werktuigen is dit in ontwikkeling.

Concurrerende technieken en brandstoffen: Omdat de techniek voor elektrische aandrijving voor zware voertuigen (vrachtverkeer, schepen) en mobiele werktuigen nog in ontwikkeling is, wordt hierbij ook gekeken naar alternatieve technieken en brandstoffen waarmee emissiereductie kan worden bereikt. Voor de korte termijn wordt vooral gekeken naar de (gedeeltelijke) inzet van schonere brandstoffen. Voor lange termijn is de inzet van waterstof of synthetische brandstoffen in deze sectoren een reëel alternatief voor elektrificatie. Ook is gedeeltelijke elektrificatie (hybride voertuigen of werktuigen) een mogelijkheid.

¹³ Bron: [Kongsberg: Autonomous ship project, key facts about Yara Birkeland](#)

¹⁴ Bron: [Wired: Want Electric Ships? Build a Better Battery](#)



Kosten: De aanschafprijs en TCO¹⁵ van elektrische voertuigen moeten economisch haalbaar zijn voor gebruikers. Voor personenauto's is de TCO van elektrische voertuigen inmiddels in steeds meer gevallen concurrerend met die van conventionele voertuigen. Voor bestelauto's wordt verwacht dat de TCO in veel gevallen rond 2022/2023 concurrerend wordt, voor licht vrachtverkeer wordt rond 2024 verwacht dat de TCO economisch haalbaar wordt (ELaad, 2020b). Subsidies en andere financiële prikkels (zoals vrijstelling van bpm of het verlagen van de bijtelling voor zakelijke personenauto's) kunnen eraan bijdragen dat deze barrières worden weggenomen. Voor de zakelijke markt is een concurrerende TCO doorslaggevend voor voertuigkeuze. Voor particulieren kan, ook bij een gunstige TCO, de hogere aanschafprijs van elektrische voertuigen een belangrijke barrière vormen, zowel in de beleving als in de feitelijke mogelijkheden om een elektrisch voertuig aan te schaffen.

Marktaanbod: Het marktaanbod, zowel voor nieuwe als gebruikte voertuigen, is van invloed op de keuze door bedrijven of consumenten om daadwerkelijk over te stappen op elektrische voertuigen. Niet alleen de prijs, maar ook de omvang en kwaliteit/aantrekkelijkheid van het aanbod is van invloed. De tweedehandsmarkt voor elektrische personenauto's is bijvoorbeeld nog erg klein, terwijl de ontwikkeling hiervan een belangrijke factor is voor het particuliere gebruik van elektrische personenauto's.

Laadinfrastructuur: De techniek van laadinfrastructuur moet, net als de voertuigtechniek, voldoende zijn ontwikkeld. Daarnaast is een dekkend netwerk van laadinfrastructuur nodig, dat toegankelijk en betaalbaar is voor gebruikers. Voor het wegverkeer is de verwachting dat er in 2030 1,7 miljoen laadpunten nodig zijn (NAL). In sommige regio's levert dit knelpunten op in het energienetwerk en zijn er aanpassingen nodig om dit op te vangen. Vooral bij het laden van vrachtauto's (vaak op 350 kW) zal dit sneller tot knelpunten leiden op het energienet, ook omdat depots vaak aan de rand van of buiten het stedelijk gebied gelegen zijn. Daarnaast is een belangrijke vraag hoe het laadgedrag van gebruikers eruit gaat zien en waar de laadpunten gerealiseerd moeten worden. Ook de inpassing van laadinfrastructuur in de openbare ruimte, of op particuliere locaties, kan knelpunten geven. Afhankelijk van de locatie zijn hier diverse procedures aan gekoppeld, die een lange doorlooptijd met zich mee kunnen brengen. Kansen voor laadinfrastructuur liggen in het koppelen van voertuigen aan het net, zodat tijdelijke opslag van energie-overschotten mogelijk wordt.

Veiligheid: Recent is naar aanleiding van enkele incidenten met elektrische voertuigen ook de discussie opgelaaid over de (brand-)veiligheid van elektrische voertuigen. Elektrische voertuigen vragen om een andere brandbestrijding. Met name bij de inpandige stalling van elektrische voertuigen is dit een aandachtspunt.

Inkoop- en concessievoorwaarden: bij OV-bussen en bijvoorbeeld de aanbesteding van bouwwerkzaamheden kan veel worden -concessies is veel bereikt in de elektrificatie van het busvervoer. Voor de elektrificatie van mobiele werktuigen is dit een kans om elektrificatie de komende jaren te stimuleren, bijvoorbeeld door inkoopvoorwaarden bij bouwwerkzaamheden. Elektrificatie in deze sector sluit tevens aan op eisen die vanuit het stikstofbeleid worden gesteld. Een belangrijke voorwaarden voor het opstellen van inkoop- en concessievoorwaarden is samenspraak met de markt, zodat de formulering van de voorwaarden ook het gewenste effect bereikt.

¹⁵ TCO = Total Cost of Ownership, het totaal aan vaste en variabele kosten voor het bezit en gebruik van een voertuig.

Kennis en bewustwording: Elektrificatie betekent toepassen van nieuwe technieken. Negatieve beeldvorming kan hierin belemmerend werken. Voorbeelden hiervan zijn een lage actieradius, veiligheidsissues of een hoge aanschafprijs. Overschakelen op elektrisch rijden vraagt een gedragsverandering – bijvoorbeeld rekening houden met laadtijd en beschikbaarheid van laadpalen. In de zakelijke markt tellen ‘zachte’ argumenten als milieubewustzijn minder, hier gaat het vooral om een concurrerende TCO en een korte laadtijd van voertuigen.

Wet- en regelgeving: De dominante factor is het Rijksbeleid, maar ook dat van gemeenten. De invoering van ZE-zones in steden, voor 2025 voorzien in het Klimaatakkoord, is een belangrijke aanjager van elektrificatie van voertuigen. Op dit moment zijn de ZE-zones voorzien voor de stadslogistiek, maar enkele steden (Amsterdam, Eindhoven) werken ook aan ZE-zones voor personenvervoer. In het Klimaatakkoord wordt ook gestreefd naar een volledig elektrische nieuwverkopen van personenauto's in 2030. Hierbij worden prijsprikkels ingezet om zowel autokopers als gebruikers (zoals leaserijders) sterk gesimuleerd om over te stappen op volledig elektrisch door geen bpm en mrb, en een veel lagere bijtelling voor leaserijders. De restwaarde van niet-elektrische personenauto's neemt hierdoor af, waardoor het minder aantrekkelijk wordt om een niet-elektrisch voertuig aan te schaffen. Dit effect zal waarschijnlijk vooral vanaf 2025 merkbaar worden.

4.4 Laadprofielen

4.4.1 Personenauto's

Elektrische personenauto's worden met verschillende methoden opgeladen, afhankelijk van de aansluiting en de locatie van laden. In dit onderzoek maken we onderscheid tussen vier soorten laadtypes: publiek laden (reguliere laadpalen), privaat laden (op eigen terrein), werkladen (semipubliek, bij kantoren) en snelladen.

Bij snelladen worden elektrische auto's met hoog vermogen (>43kW) zo snel mogelijk opgeladen. De aangesloten tijd (de periode dat de stekker in het voertuig zit) wordt bijna volledig gebruikt voor het laden. Bij thuisladen wordt met een lager vermogen geladen en wordt de aangesloten tijd vaak niet volledig benut om op te laden. De oorzaak hiervan is dat de meeste voertuigen gedurende de nacht worden opgeladen en na een aantal uren volledig opgeladen zijn. De rest van de aangesloten tijd wordt het voertuig niet meer bijgeladen.

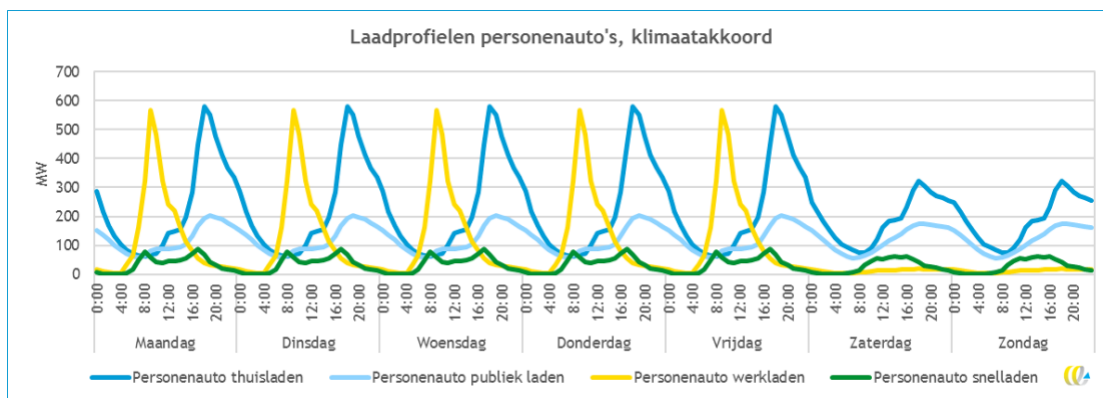
Simulaad (AUAS, 2020) heeft de laadvraag in 2020 kunnen verdelen naar laadtype. Deze verdeling is geschaald naar 2030 door middel van de tool CELINE, een CE Delft-programma wat projecties geeft op benodigde laadpalen. Deze verhouding gebruiken wij voor het verdelen van de totale benodigde energie voor elektrische personenauto's naar laadtype en naar het bijbehorende profiel.

Tabel 16 - Laadsoorten en verhouding op energievraag personenauto's (2030)

Soort laden	Aandeel totale laadvraag	Bron laadprofiel
Thuisladen/privaat laden	47%	Movaris
Publiek laden	26%	Simulaad
Werkladen	20%	Simulaad
Snelladen	7%	Movaris

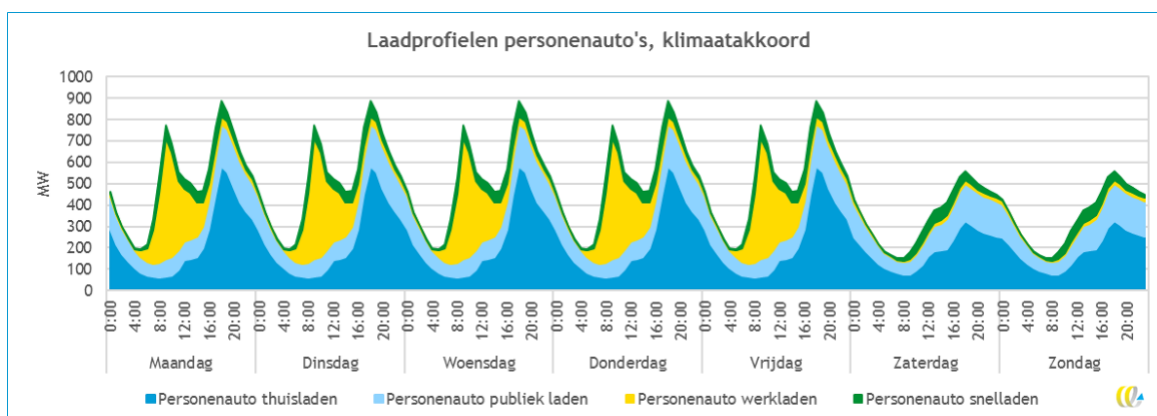
Voor de verdeling van de energievraag over de dag/nacht en de verschillende dagen van de week zijn voor dit onderzoek laadprofielen gebruikt uit rapporten van Movaris (2013) en Simulaad (AUAS, 2020).

Figuur 29 - Afzonderlijke laadprofielen elektrische personenauto's in 2030 (Movaris, 2013; AUAS, 2020). Naar verhouding Tabel 16, de hoogte van de vraag is gebaseerd op het middenscenario (Klimaatakkoord)



Figuur 30 laat zien wat het totale laadprofiel is in Nederland in 2030. Hierin zijn de laadprofielen van de afzonderlijke laadlocaties bij elkaar opgeteld. Op elke doordeweekse dag er twee duidelijke pieken waar te nemen. De eerste piek begint met een stijging van de laadbehoefte na 06:00 uur, waarbij de piek ligt rond 09:00 uur. De tweede piek neemt toe vanaf 16:00 uur met een maximum rond 19:00 uur. De eerste piek wordt voornamelijk veroorzaakt door werkladen. De tweede piek door een combinatie van privaat en publiek laden (Figuur 29). Het publieke deel komt van huishoudens die geen private laadgelegenheid hebben en bij thuiskomst een publieke laadpaal gebruiken. De laadprofielen van zaterdag en zondag laten slechts één piek per dag zien die ten opzichte van de andere pieken lager en breder is. Deze pieken worden veroorzaakt door een combinatie van thuisladen en publiek laden. De stijging begint rond het middaguur en heeft een piek rond 19:00 uur.

Figuur 30 - Totaal laadprofiel elektrische personenauto's in 2030. Naar verhouding Tabel 16, de hoogte van de vraag is gebaseerd op het middenscenario (Klimaatakkoord)



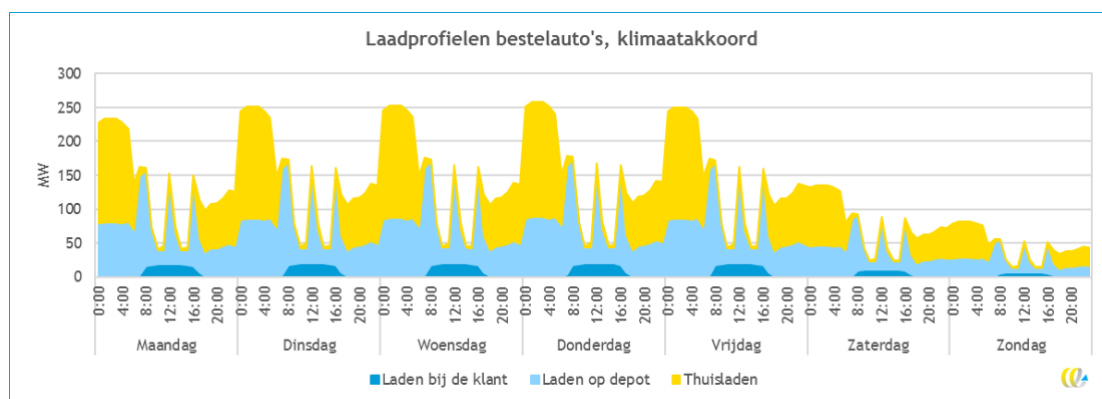
4.4.2 Bestelauto's en vrachtauto's

Vanwege het nu nog beperkte aantal elektrische bestel- en vrachtauto's zijn er minder gegevens bekend over laadprofielen van deze voertuigen. In een studie naar stadslogistiek in Amsterdam is een inschatting gemaakt van deze profielen. Hierbij is onder andere gebruik gemaakt van data over soorten voertuigen die per dag de milieuzone in Rotterdam in- en uitrijden. Tabel 17 en Figuur 31 geven afzonderlijke laadprofielen voor elektrische bestelauto's en vrachtauto's in stadsdistributie in Amsterdam (CE Delft, 2019b). Deze laadprofielen laten zien hoe het laden per locatie (op depot, bij klant of thuis) verschilt. Het laden van bestelauto's bestaat voor bijna de helft uit thuisladen. Wanneer de profielen bij elkaar opgeteld worden in een laadprofiel zijn meerdere pieken te zien, vooral aan het begin en einde van de werkdag en rond lunchtijd. Daarnaast is te zien dat gedurende de nacht op het depot (vrachtauto en bestelauto) en thuis (bestelauto) een hoge vermogensvraag is.

Tabel 17 - Laadsoorten en verhouding op energievraag bestelauto's en vracht voor het Klimaatakkoord-scenario

Modaliteit	Laadtype ¹⁶	Aandeel totale energievraag
Bestelauto	Laden bij de klant	5%
	Laden op depot	48%
	Thuisladen	46%
Vrachtauto	Laden bij de klant	23%
	Laden op depot	77%

Figuur 31 - Totale vermogensvraag gedurende de dag door laden bestelauto's, de hoogte van de vraag is gebaseerd op het middenscenario (Klimaatakkoord)



Bron: (CE Delft, 2019b).

4.4.3 Bussen, mobiele werktuigen en tweewielers

Het laden van OV-bussen vindt plaats op depot of onderweg (opportunity charging). Het laden op depot vindt vooral 's avonds (na de avondspits) en 's nachts (na het einde van de dienstregeling) plaats. Het opportunity laden gebeurt ook overdag (voornamelijk tussen 8:00 en 18:00 u). Voor dit onderzoek hebben wij aangenomen dat 80% van het laden op depot gebeurt en 20% onderweg. Bij de samenstelling van het profiel hebben we gebruikt

¹⁶ In de opgestelde profielen is geen rekening gehouden met (snel-)laden onderweg. Het is de verwachting dat in de stadslogistiek de afstanden tussen depot en bestemming dusdanig beperkt zijn, dat hiervoor niet zal worden gekozen.

gemaakt van de recente Outlook van Elaad (ELaadnl, 2019a). We hebben aangenomen dat de laadvraag in het weekend 65% van de laadvraag van doordeweeks is.

Over het mogelijke laadprofiel van mobiele werktuigen zijn nog weinig gegevens bekend. Wij hebben aangenomen dat 50% van het laden zal plaatsvinden bij de klant (op de bouwplaats) en 50% op depot.

Elektrische fietsen (inclusief bakfietsen, speed pedelecs, e.d.) worden over het algemeen thuis opgeladen, zonder speciale aansluiting. Het opladen van de accu duurt ongeveer 4 tot 8 uur, met ongeveer 75 Watt per uur (Vattenfall, sd). Omdat we te weinig gegevens hebben over de omvang van het gebruik van de elektrische fiets en omdat deze laadvraag relatief beperkt zal zijn t.o.v. de andere voertuigtypen, is er in dit onderzoek geen apart laadprofiel opgesteld voor elektrische fietsen.

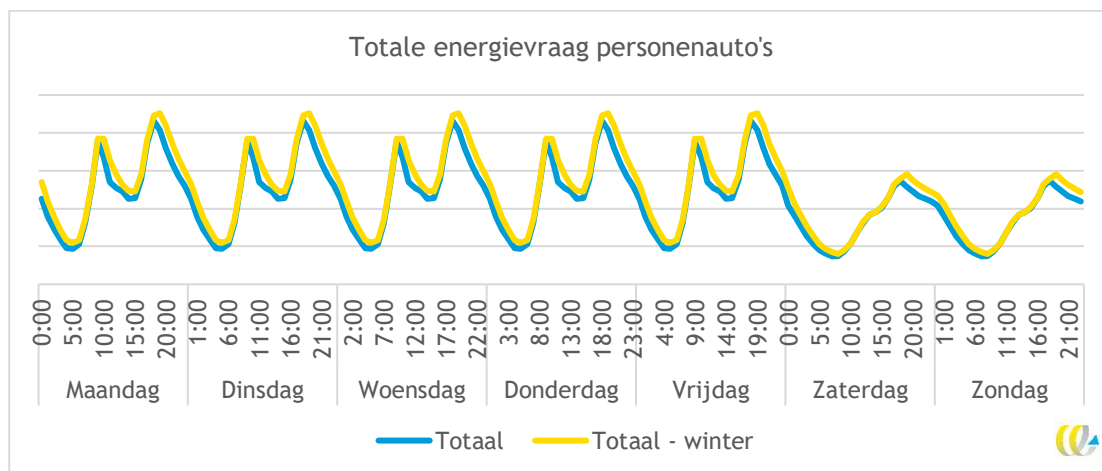
4.4.4 Seizoensinvloeden

In Paragrafen 4.4.1 en 4.4.2 zijn de laadprofielen besproken van de verschillende type voertuigen. Deze profielen gaan uit van gemiddelde temperaturen. Batterijen functioneren het beste bij 20°C. Een hogere temperatuur is gunstig voor de prestaties op korte termijn maar zal de levensduur van de batterij verkorten. Bij koude temperatuur vermindert de capaciteit van de batterij. Bij een temperatuur van 0°C vermindert de capaciteit met zo'n 10% (Battery University, 2019; Relion Battery, 2018). Het opladen van een elektrisch voertuig gaat bij lage temperaturen ook langzamer (Aziz & Oda, 2017). Daarnaast neemt het verbruik van een elektrisch voertuig in de winter per kilometer toe (EV-database, 2020). Dit komt enerzijds door het functioneren van de accu in koude omstandigheden en anderzijds door het gebruik van interieurverwarming (ANWB, 2019).

Warm weer zorgt dus niet direct voor een effect op het net omdat de capaciteit van de batterij niet afneemt. Koud weer zorgt voor een verlaging van de accucapaciteit en het verhogen van het verbruik, waardoor er een kleinere actieradius (EV-database, 2020) ontstaat. Hierdoor neemt de frequentie van laden toe. De energieoverdracht duurt ook langer, aangezien er meer geladen moet worden om tot een volle accu te komen. Logischerwijs is dit effect wel merkbaar bij de energievraag.

Voor dit onderzoek nemen wij profielen mee voor koude dagen gedurende het jaar. We schatten dat het totale verbruik van elektrische voertuigen toeneemt met 10% op koude dagen. Doordat het opladen ook meer tijd vergt en er door het hogere verbruik meer geladen zal moeten worden, neemt het profiel in de breedte toe (CE Delft, 2019c). De vermogensoverdracht zal namelijk langer duren. Figuur 32 laat dit zien voor het personenautoprofiel. We nemen aan dat de starttijden veelal gelijk blijven. Het gebied onder de lijn, de totale benodigde energie, neemt met 10% toe. Voor koude dagen nemen wij aan dat dit dagen zijn met een gemiddelde dagtemperatuur van < 5°C. De redenatie hierachter is dat tijdens de pieken (ochtend en avond) de temperatuur rond het vriespunt zal liggen.

Figuur 32 - Effect van winter op totale laadvraag personenauto's



4.4.5 Flexmogelijkheden

Voor de mobiliteitssector zijn er twee soorten flexmogelijkheden:

- verschuiving in het vraagpatroon (slim laden);
- tijdelijke opslag van overschotten: Vehicle-to-Grid.

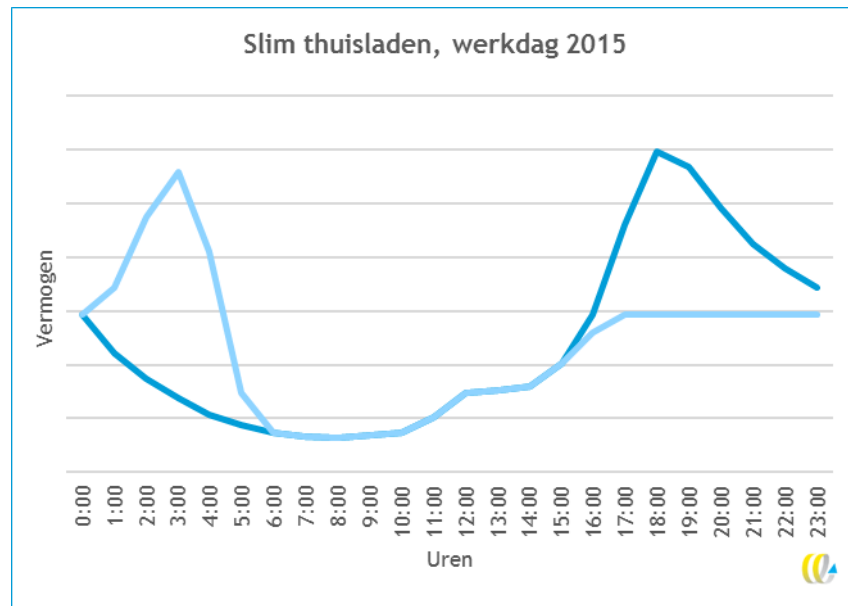
Verschuiven van het vraagpatroon: slim laden

Verschuivingen in het laadpatroon zijn vooral mogelijk in de deelsector personenvervoer omdat de laadbehoefte per etmaal gespreid kan worden over een groot aantal uren. Voor de logistiek en vrachtsector is dit sterk afhankelijk van de sector - in sommige sectoren is dit nauwelijks mogelijk doordat de logistieke eisen dwingend zijn voor de momenten van laden, maar in andere sectoren zijn er meer mogelijkheden.

De toename van elektrische voertuigen zorgt voor een grotere belasting op het elektriciteitsnet, voornamelijk in de piekmomenten tijdens de ochtend- en avonden (Figuur 30). De maximale vraag bedraagt zo'n 1,5 keer de gemiddelde vraag. Het verlagen en/of verplaatsen van deze piekmomenten kan ervoor zorgen dat dit beter aansluit bij momenten dat er minder energie gevraagd wordt voor andere segmenten. Slim laden maakt het mogelijk om elektrische auto's op te laden op een gewenst moment, bijvoorbeeld als duurzame energie beschikbaar is en de CO₂-uitstoot laag (CE Delft, 2019c). Slim laden kan een extra positief effect hebben op de CO₂-uitstoot van elektrisch rijden door een lagere bronemissie. Slim laden maakt het mogelijk om de connectietijd, de tijd dat het voertuig verbonden is met het net, optimaal te benutten. Dit kan bijvoorbeeld door het laden op een ander moment te starten, in delen op te knippen of te variëren in laadsnelheid (CE Delft, 2019c).

Een voorbeeld voor passagiersauto's is het verleggen van de laadpieken naar een later moment. Het verplaatsen naar de middag zorgt ervoor dat duurzame energieopwekking (zon) maximaal gebruikt kan worden. De piek in de avond kan verlegd worden naar de nacht wanneer daar de elektriciteitsvraag lager is dan in de avond.

Figuur 33 - Voorbeeld slim laden (lichtblauw) op een thuislaadprofiel werkdag 2015, personenauto. In dit geval wordt de piek verplaatst naar de nacht wanneer er meer netcapaciteit beschikbaar is. Oppervlak onder de lijn, totale energie, blijft gelijk



Vehicle-to-Grid (V2G)

Naast slim laden is het ook mogelijk om energie vanuit elektrische voertuigen terug te leveren aan het net. Vehicle-to-Grid (V2G) maakt het mogelijk om piekmomenten in elektriciteitsvraag te verlagen door voertuigen te gebruiken als buffercapaciteit. Daarnaast kunnen de accu's in voertuigen gebruikt worden om overtollige energieproductie op te vangen (Nederland elektrisch, 2019). Dit zorgt voor een grote mate van flexibiliteit op het elektriciteitsnet en daarmee een optimale balancerings van vraag en aanbod in het elektriciteitssysteem.

Steeds meer energie wordt lokaal geproduceerd door bijvoorbeeld zonnepanelen van woningcorporaties, gemeenten en consumenten. V2G kan helpen bij het in balans houden van vraag en aanbod van elektriciteit. Hierdoor kan lokaal duurzaam opgewekte energie efficiënt worden ingezet. Voorwaarden om V2G mogelijk te maken zijn auto's die V2G ondersteunen en een financieel systeem waarbij energiestromen traceerbaar zijn en te verrekenen met de eigenaar van het voertuig (ELaadnl, 2019c).

Een deel van de personenauto's heeft de mogelijkheid om zowel te laden als te ontladen zodat op momenten van overschotten de batterijen maximaal geladen kunnen worden en kunnen worden ontladen op momenten van tekorten. Op dit moment is het aantal merken dat dat al mogelijk maakt zeer beperkt. De verwachting is dat dit zal toenemen, maar dat er wel een incentive moet komen voor eigenaren van elektrische voertuigen om hun batterij daarvoor te gebruiken.

4.5 Conclusie

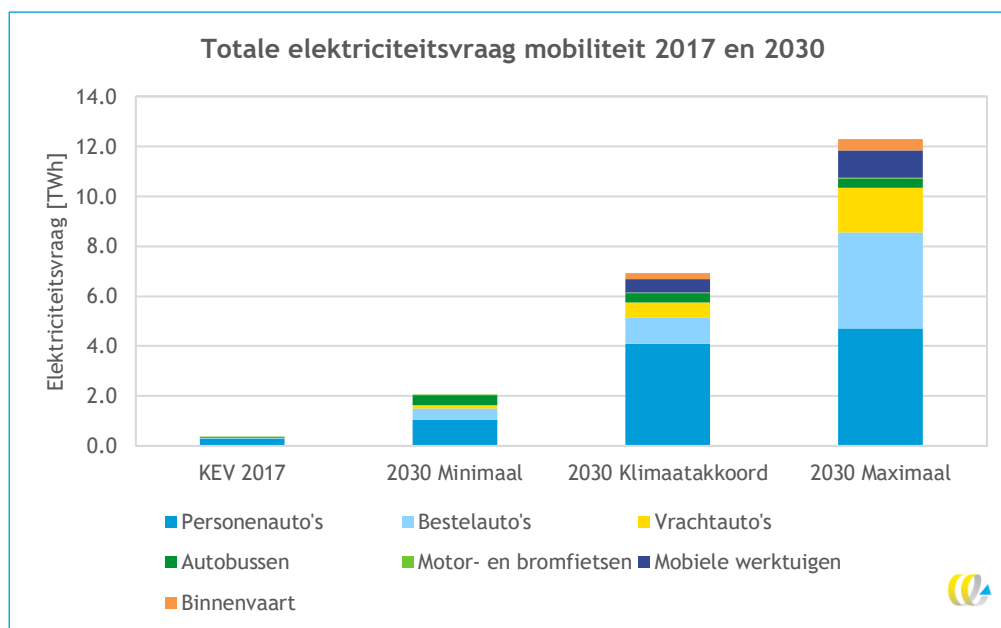
In Tabel 18 is de toename in elektriciteitsvraag in 2030 per toepassing weergegeven voor de drie scenario's. In alle scenario's is sprake van een forse groei van de elektriciteitsvraag van mobiliteit ten opzichte van de huidige situatie. In het basispad verdubbelt de vraag ongeveer, van 1,9 TWh in de huidige situatie naar 3,9 TWh in 2030. In het hoogste scenario is de vraag voor mobiliteit in totaal 14,1 TWh/jaar.

Tabel 18 - Toename in elektriciteitsvraag in 2030 per toepassing

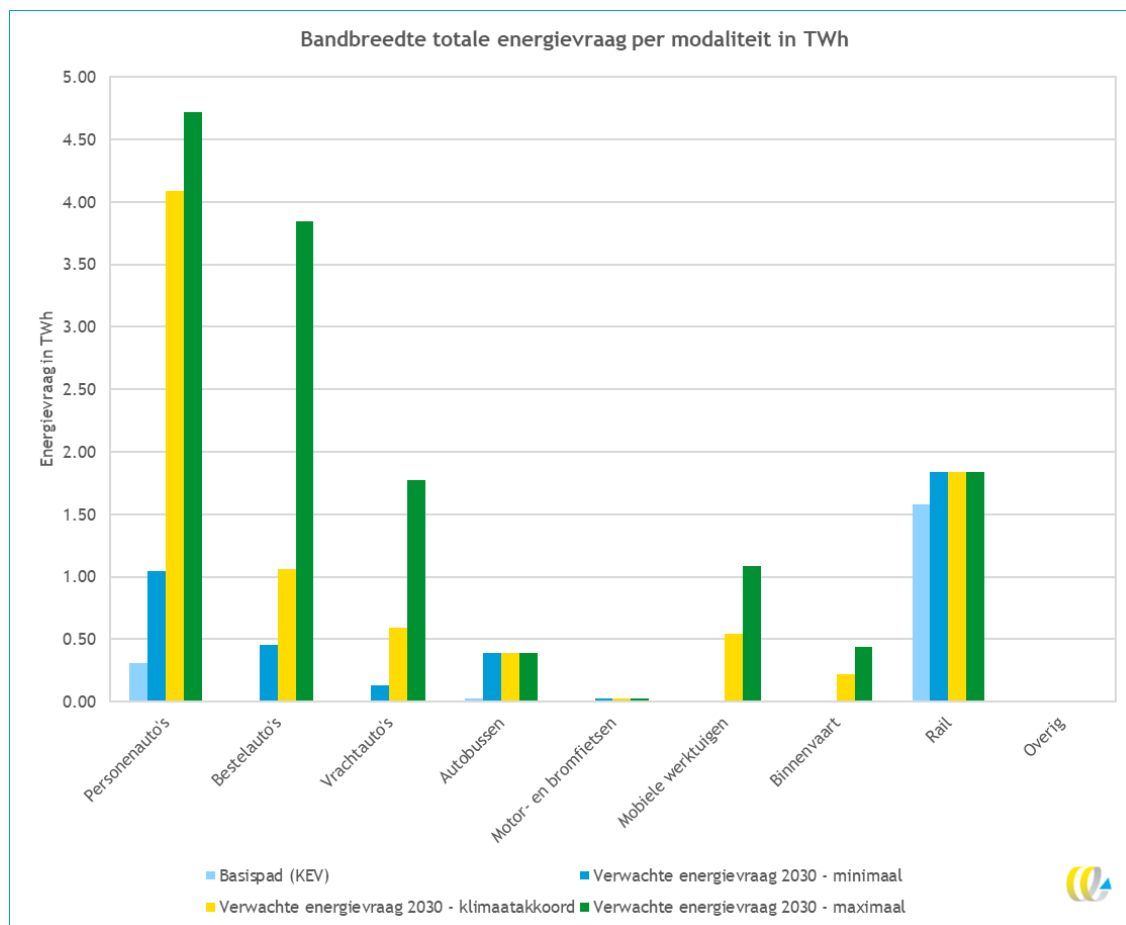
Energievraag in TWh	Huidig	Basispad (KEV)	Klimaatakkoord	Klimaatakkoord +
Personenauto's	0,3	1,05	4,1	4,7
Bestelauto's	0,0	0,45	1,1	3,8
Vrachtauto's	0,0	0,13	0,6	1,8
Autobussen	0,0	0,39	0,4	0,4
Motor- en bromfietsen	0,0	0,03	0,03	0,03
Mobiele werktuigen	0,0	0,00	0,5	1,1
Binnenvaart	0,0	0,00	0,2	0,4
Rail	1,6	1,9	1,8	1,8
Totaal	1,9	3,9	8,8	14,1
Totale extra vraag t.o.v. 2017	-	+ 1,9	+ 6,8	+ 12,2

De groei van de elektriciteitsvraag wordt veroorzaakt door verwachte elektrificatie van het wegverkeer. De totale elektriciteitsvraag voor het wegverkeer in 2030 ligt naar verwachting tussen de 1,6 TWh en de 10,3 TWh. De bandbreedte tussen het basispad KEV (PBL, 2019b) en het potentieel wordt voornamelijk veroorzaakt door de uiteenlopende prognoses voor de groei van elektrische personen- en bestelauto's en trucks in de stadslogistiek. In Figuur 35 is het totale potentieel voor elektrificatie in 2030 weergegeven per deelsector.

Figuur 34 - Totale elektriciteitsvraag mobiliteit 2017 en 2030



Figuur 35 - Elektriciteitsvraag per deelsector



Belangrijkste barrières

Voor lichtere voertuigen (personenauto's, tweewielers, bestelauto's en lichte vrachtoertuigen) zijn er steeds minder technische barrières voor het gebruik van elektrische voertuigen. Door beleid vanuit het Klimaatkkoord, vooral gericht op personenvervoer en de stadslogistiek, wordt verdergaande elektrificatie van het wagenpark gestimuleerd (lagere bijtelling voor leaseauto's, vrijstelling bpm, en mrb). Onzekerheid bij particulieren en ondernemers over elektrisch rijden, (fiscaal) beleid en prijsontwikkeling lijken hierbij de belangrijke belemmerende factoren. Ook de snelheid waarmee een dekkend netwerk van laadinfrastructuur kan worden gerealiseerd kan een barrière vormen voor een snelle elektrificatie van het wagenpark.

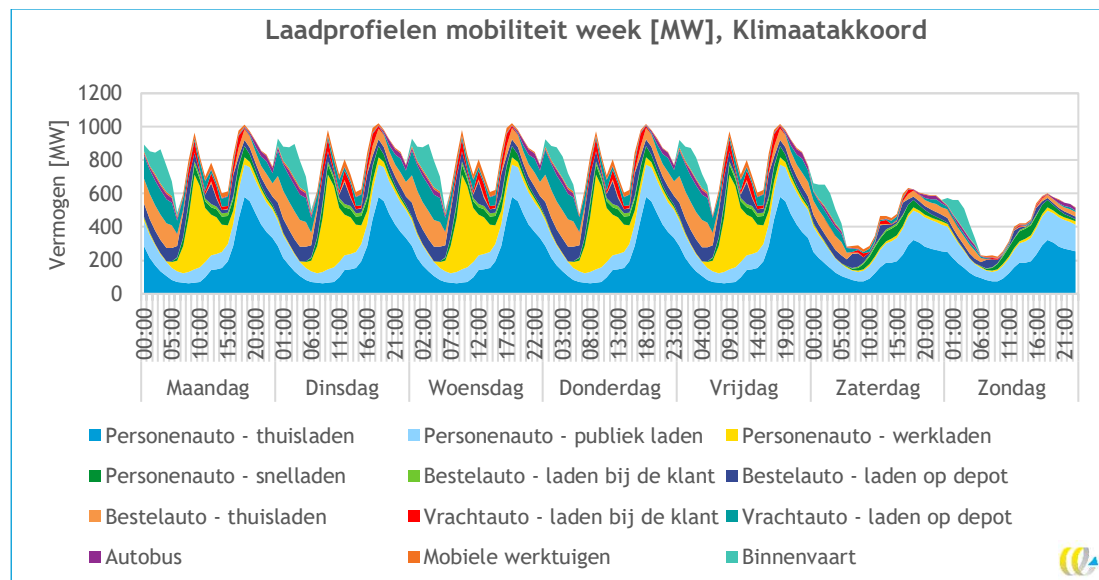
Voor zwaardere voertuigen (in lange afstandstransport en binnenvaart) en mobiele werktuigen zijn technische ontwikkelingen nodig om concurrerende alternatieven te bieden voor conventionele voertuigen en werktuigen. De aanbodmarkt voor elektrische voertuigen moet nog worden opgebouwd. Het is voor deze deelsectoren daarnaast nog onduidelijk in welke mate elektrificatie op lange termijn zal worden toegepast, omdat er ook alternatieve technieken worden onderzocht, zoals waterstof of synthetische brandstoffen. De TCO voor elektrische trucks zal richting 2030 in meerdere gevallen concurrerend worden, maar bij het laden van (meerdere) zwaardere vrachtwagens op depot zullen er eerder knelpunten op het energienetwerk ontstaan.

Kenmerken van het vraagprofiel

Het totale profiel van mobiliteit bevat diverse pieken gedurende de dag. Zoals in Figuur 39 is weergegeven is de elektriciteitsvraag hoog in de ochtend en in de avond. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door personenauto's in woon-werkverkeer. Bij aankomst op het werkadres of thuis worden de voertuigen gekoppeld aan het net. Wegens de hoge vraag is hier ook de belasting relatief hoog. Slim laden kan hier gebruikt worden om de pieken te verlagen en zo de belasting van het elektriciteitsnet. Het vermogen dat wordt geleverd is dan lager, waardoor de pieken uitgesmeerd worden over een langere periode. In Figuur 36 is hiermee, en ook niet met Vehicle-to-Grid (V2G) rekening gehouden.

De weekenddagen vertonen een ander profiel, voornamelijk door de verminderde activiteit van woon-werkverkeer bij personenauto's en van vrachtverkeer. De meeste laadmomenten, van bijvoorbeeld thuis- en publiekladen, zijn minder geconcentreerd en komen gedurende de dag voor.

Figuur 36 - Totaal vraagprofiel voor mobiliteit in MWh voor week 2 (maandag-zondag) van weerjaar 2015 (scenario conform Klimaatakkoord)



5 Bedrijven

5.1 Scope en huidige vraag deelsectoren

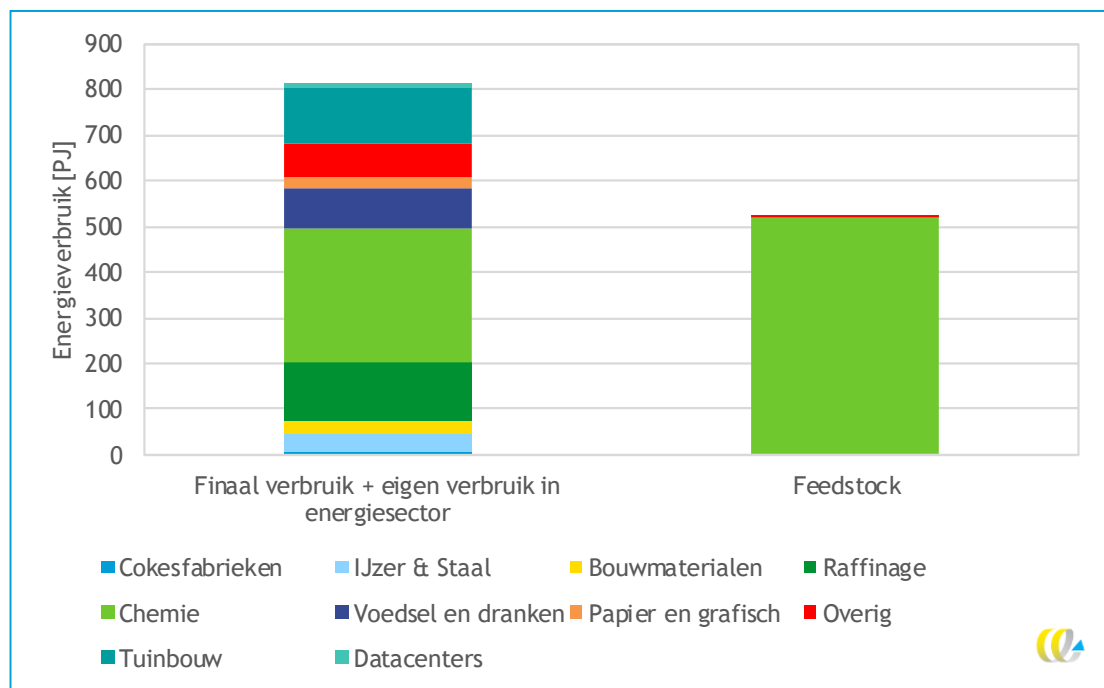
De volgende sectoren worden meegenomen in deze studie over elektrificatie bij bedrijven:

- zware industrie: ijzer en staal, cement, raffinaderijen, chemie;
- lichte industrie: voedsel en dranken, farmaceutisch, papier en grafisch;
- overige bedrijven: overige nijverheid, glastuinbouw, datacenters;
- feedstock ijzer en staal, chemie en raffinaderijen.

De olie- en gaswinning, bouwnijverheid, waterbedrijven en afvalbeheer worden uitgesloten.

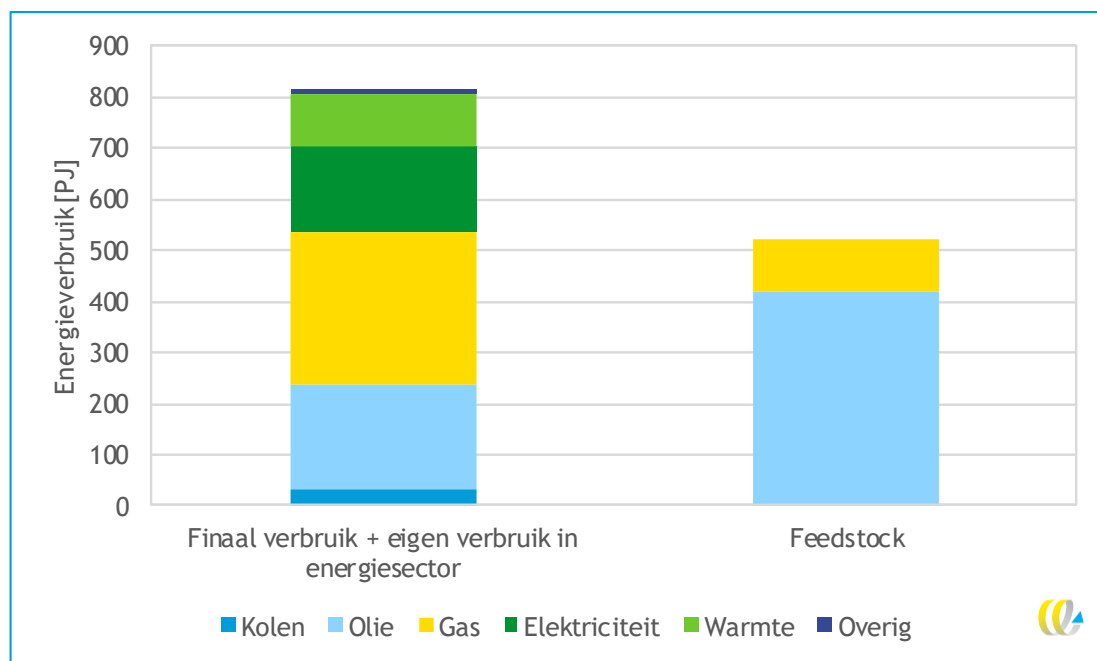
In Figuur 37 is het energiegebruik in 2018 weergegeven van bedrijven volgens de scope hierboven. Chemie, raffinage en de glastuinbouw nemen een prominente plaats in, waarbij de chemie ook een flink energiegebruik voor feedstock heeft.

Figuur 37 - Energiegebruik van de industrie in 2018 in PJ



Het energiegebruik staat in Figuur 38 uitgesplitst naar energiedrager. De raffinaderijen en de chemie gebruiken veel aardolie en aardolieproducten zoals kraakgassen in hun processen. Alle sectoren gebruiken aanzienlijke hoeveelheden aardgas, kolen worden voornamelijk nog in de staalsector gebruikt. Er wordt zo'n 166 PJ/j ofwel 46 TWh/j elektriciteit gebruikt door industrie, glastuinbouw en datacenters samen.

Figuur 38 - Energiegebruik van bedrijven per energiedrager in 2018 in PJ



Omdat de industrie zelf, de glastuinbouw, datacenters en feedstock voor de industrie allemaal een ander karakter hebben met andere mogelijkheden voor elektrificatie, zullen we de deelsectoren in voorgenoemde volgorde apart behandelen.

5.2 Potentieel elektrificatie industrie

Het Klimaatakkoord stelt de industrie voor de opgave om 14,3 Mton additioneel te reduceren in 2030 ten opzichte van het basispad. De hoofdinstrumenten hiervoor zijn de SDE++-subsidie en een CO₂-heffing. Voor de CO₂-heffing wordt een lineaire afname van de emissies aangenomen tot het doel van 2030, waarbij elk bedrijf naar rato van zijn CO₂-emissie een heffingsvrije voet krijgt. Bij overschrijden van deze heffingsvrije voet is de CO₂-heffing verschuldigd. De heffing wordt periodiek in hoogte bijgesteld, zodat het doel met hoge zekerheid gehaald wordt. Hoe de additionele besparing gerealiseerd moet worden, is aan de bedrijven zelf, enkel voor CCS is een maximum gesteld aan de hoeveelheid subsidie die verstrekt wordt.¹⁷ Uiteindelijk zullen de bedrijven zelf bepalen welke techniek voor hun het best is.

5.2.1 Beschouwde technieken voor elektrificatie in de industrie

Vanwege het grote aantal technieken dat beschikbaar is voor elektrificatie in de industrie, hebben we onze analyse beperkt tot de meest relevante (volume, kosten) technieken:

- Power-to-Power middels het vervangen van turbines door elektromotoren;
- warmtepomp in proces (COP >1);
- elektrisch drogen;
- warmtepomp voor heet water;
- membraanscheiding;
- elektrische kraker;

¹⁷ Bedrijven mogen meer CCS toepassen dan dit 'plafond', maar daar wordt dan geen subsidie voor verstrekt.

- elektrisch fornuis/oven;
- Power-to-Heat middels hybride of elektrische boiler (COP 1).

De bespreking per techniek vindt verderop in dit rapport plaats, als het potentieel besproken wordt. Feedstock wordt vanaf Pagina 77 apart besproken.

5.2.2 Factoren, barrières en scenario's elektrificatie industrie

De factoren en barrières die bepalend zijn voor het tot stand komen zijn bepaald op basis van de webenquête en input van experts, het KIVI-rapport (DNV-GL, 2020) en onze eigen kennis.

Prijs van elektriciteit t.o.v. aardgas

De grootste barrière voor elektrificatie is vooralsnog het verschil tussen de elektriciteitsprijs en de aardgasprijs inclusief CO₂-prijs: aardgas is goedkoop. Dit kan opgelost worden door aan één van de vele knoppen te draaien: aanpassen van de belastingen en heffingen op elektriciteit of aardgas, een minimum CO₂-prijs of CO₂-heffing invoeren of (exploitatie) subsidies verstrekken voor elektrificatie. In de praktijk zal echter goed rekening gehouden moeten worden met de concurrentiepositie. De Vergoeding voor Externe Kosten (VEK¹⁸) is een manier om dat te doen, deze bevat een grenscorrectie voor zowel invoer (CO₂-heffing) als uitvoer (teruggave gerelateerd aan CO₂-inhoud).

Warmte uit elektriciteit en de vrije allocatie onder ETS IV

In 2021 gaat de nieuwe handelsfase voor het Europese emissiehandelssysteem EU ETS in. Deze fase loopt tot 2030 en heeft grotendeels dezelfde regels als ETS III. Onder deze regels krijgen bedrijven gratis emissierechten ("vrije allocatie") afhankelijk van wat zij produceren. De regels voor ETS IV zijn nog niet helemaal duidelijk, maar wijzen erop dat een bedrijf een deel van zijn gratis rechten kan verliezen indien warmte geproduceerd uit fossiele brandstoffen wordt vervangen door elektriciteit. Dit geldt alleen als de warmte wordt geleverd aan een installatie die niet onder een van de 52 productbenchmarks valt, maar onder de zogenaamde heat benchmark. Dit zou betekenen dat de gratis rechten vervallen als warmte uit deze installaties vervangen wordt door warmte uit een elektrische boiler. Het effect van het niet hoeven afdragen van emissierechten wordt hiermee effectief opgeheven. Het effect hiervan op de beoogde CO₂-heffing is nog niet duidelijk.

Infrastructuur: De energievraag in de industrie wordt gekenmerkt door hoge vermogens geconcentreerd op een enkele locatie. Als van fossiele brandstoffen wordt overgestapt op elektriciteit is het net daar zelden op berekend. Voor betekenisvolle elektrificatie is uitbreiding en versteviging van het net dan ook vaak noodzakelijk. Hierbij is er sprake van een Catch 22: een netbeheerder mag pas investeren als er zekerheid is dat de capaciteit gebruikt gaat worden, een industriële partij wil voordat zij investeert zeker weten dat de infrastructuur op tijd beschikbaar is. De realisatie van infrastructuur kan bespoedigd worden door in te zetten op cluster- en regioplannen en netbeheerders vooruit te laten investeren in netverzwaring op basis van betrouwbare prognoses.

Tariefstructuur netbeheerskosten elektriciteit: De huidige tariefstructuur brengt hoge kosten in rekening voor maximale capaciteit, terwijl de afname van elektriciteit op momenten van overschot het elektriciteitsnet kan ondersteunen. Dit werpt een serieuze drempel op voor flexibele elektrificatie met een lage bedrijfstijd. Slimme sturing op basis van beschikbare netcapaciteit zou deze kosten aanzienlijk moeten kunnen drukken.

¹⁸ VEK of ECC, External Cost Charge, <https://www.ce.nl/publicaties/2189/external-costs-charge-a-policy-instrument-for-climate-change-mitigation>



Financiering: Als er een businesscase is, betekent dit nog niet dat het project gefinancierd kan worden. Het eigen investeringsbudget van bedrijven kan gereserveerd zijn voor andere reeds geplande of lucratievere investeringen. Dit kan opgelost worden met externe financiering (bijv. via Invest-NL of een bank).

Ontwikkeling technologie: Niet alle technologieën zijn nu al rijp om op industriële schaal toegepast te worden. Voor elektrificatie is het marktrijp maken van een aantal cruciale technologieën vastgelegd in de Meerjarig Missiegedreven Innovatieprogramma's (MMIP's) 7 en 8.

Betrouwbaarheid van beleid is cruciaal om investeringen met een langere terugverdientijd dan de lopende kabinetsperiode uit te lokken.

Beschikbaarheid van genoeg hernieuwbare elektriciteit is niet nodig om te *kunnen* elektrificeren, maar bij onvoldoende hernieuwbare elektriciteit worden de emissies verschoven naar de elektriciteitssector, wat Nederland verder verwijderd van het behalen van de klimaatdoelen. Andersom stimuleert extra elektriciteitsvraag ook de aanleg van extra hernieuwbare opwek, dus het netto effect zal beperkt zijn (PBL, 2020c).

In tegenstelling tot elektrificatie in de gebouwde omgeving of de mobiliteitssector, is elektrificatie in de industrie sterk afhankelijk van de prijzen van gas, elektriciteit en CO₂. Daarom zijn op basis van de KEV en de zojuist besproken barrières drie scenario's opgesteld, die ook prijzen bevatten:

Tabel 19 - Barrières voor elektrificatie in de industrie en hun invloed op de drie scenario's

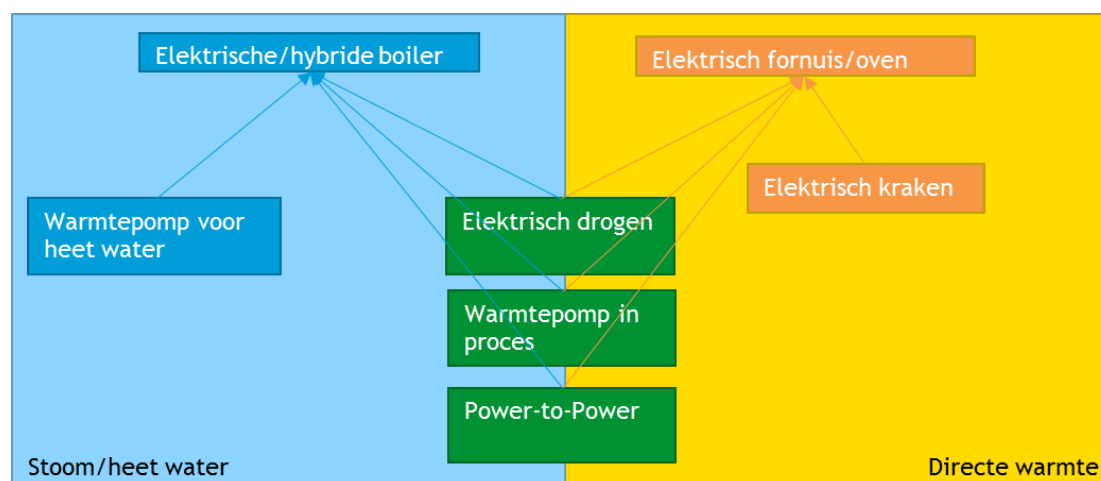
Factor	Minimaal	Klimaatakkoord	Maximaal
Doelen Klimaatakkoord	Niet gehaald	Gehaald	Gehaald
Elektrificatie	Enkel waar het een kostendaling betekent t.o.v. aardgas en CO ₂ -prijs	Enkel waar het een kostendaling betekent t.o.v. aardgas en CO ₂ -prijs	Gerealiseerde capaciteit wordt extra ingezet om CO ₂ -heffing te vermijden
Hernieuwbare opwek (Klimaatakkoord: afhankelijk van elektrificatie vraag)	Minder dan 84 TWh/j	84 TWh/j	Meer dan 84 TWh/j
Gasprijs	15 €/MWh	28 €/MWh	34 €/MWh
CO ₂ -prijs EU ETS	38 €/ton	47 €/ton	56 €/ton
CO ₂ -heffing in 2030	Niet ingevoerd	Ingevoerd, 135 €/t	Ingevoerd, 150 €/t
Kosten gas incl. belasting, CO ₂ -prijs EU ETS	26 €/MWh	42 €/MWh	50 €/MWh
Kosten gas incl. belasting, CO ₂ -heffing	26 €/MWh	60 €/MWh	69 €/MWh
Elektriciteitsprijs baseload incl. belasting	64 €/MWh	58 €/MWh	52 €/MWh
Netbeheerskosten elektriciteit	Als huidig	Als huidig	Lagere kosten zolang voldoende capaciteit beschikbaar is (50% korting voor flex)
Infrastructuur	Uitbreidingen pas na 2030 gereed	Clusteraanpak, maar komt traag op gang, enige knelpunten	Proactieve aanpak, slechts weinig knelpunten tot 2030
Ontwikkeling technologie	Stagnatie	Realisatie MMIP's	Realisatie MMIP's
Zekerheid beleid	Blijvende wisselingen in inrichting en hoogte beleidsinstrumenten	CO ₂ -heffing blijft tot 2030	CO ₂ -heffing blijft tot 2030

5.2.3 Bepaling potentieel elektrificatie industrie

Het technisch potentieel voor de technieken is bepaald op basis van het huidige warmtegebruik per toepassing. Op basis van CBS data voor de diverse sectoren is het energiegebruik per energiedrager en einddoel bepaald (CBS, 2020b). Vervolgens is dit verbruik op basis van schattingen uit eerdere studies toebedeeld aan toepassing (Berenschot et. al., 2017) en temperatuurbereik (CE Delft, 2015). Zo is per sector de energievraag per toepassing en temperatuurbereik beschikbaar. We bespreken eerst het potentieel per techniek, aan het eind volgt een samenvattende tabel. De potentiëlen voor de verschillende scenario's zijn ingeschat op basis van economische berekeningen, maar ook op basis van onze eigen ervaringen en gesprekken met experts. We presenteren een enkel potentieel voor het jaar 2030, waarbij we slechts kwalitatief in gaan op de weg er naartoe. Indien de implementatie pas laat op gang komt, is het mogelijk dat het potentieel uiteindelijk niet gehaald wordt.

Het potentieel voor elektrificatie in de industrie hangt sterk samen met de aantrekkelijkheid van de alternatieven, met name biomassa en CCS. De ontwikkeling van deze alternatieven is kwalitatief meegenomen in dit rapport, door de potentiëlen voor elektrificatie conservatief in te schatten voor sectoren waarbij het gebruik van biomassa of CCS voor de hand ligt. Voor biomassa is dit met name in de voedsel- en drankenindustrie en de papier- en pulpindustrie, aangezien deze sectoren vaak al beschikken over biomassa reststromen. Daarnaast houdt het basisscenario al rekening met een verhoogde toepassing van biomassa zoals becijferd in de KEV. CCS zal naar verwachting met name toegepast worden in de ijzer- en staalindustrie, in de chemie en bij raffinaderijen. Het potentieel van elektrische fornuizen, ovens en krakers in deze sectoren is dan ook conservatief ingeschat. In Figuur 39 is de samenhang tussen de verschillende technologieën weergegeven. Elektrische boilers en fornuizen/ovens kunnen de gehele warmtevraag vervangen, maar er zijn ook andere technologieën die een deel van deze vraag kunnen vervangen. Het potentieel voor elektrische boilers en fornuizen/ovens is zo bepaald dat het gerealiseerde potentieel van de onderliggende technologieën hier al vanaf is getrokken, zodat er geen dubbeltellingen plaats vinden.

Figuur 39 - Samenhang tussen de warmtevraag van de verschillende technologieën



Power-to-Power betreft het vervangen van gas- of stoomturbines door elektromotoren. Dit levert een emissiereductie op als de gebruikte elektriciteit een voldoende lage emissiefactor heeft. De besparing is hoger indien de bestaande aandrijving een laag

rendement heeft, zoals het geval is bij open cycle gasturbines of condenserende stoomturbines. Het achtergronddocument Power-to-Heat van de elektriciteitstafel noemt een potentieel van 16 PJ warmte-inzet dat vervangen kan worden.¹⁹ We nemen aan dat dit 80% backpressure stoomturbines betreft met een rendement van 90% en 20% gasturbines of condenserende stoomturbines met een rendement van 30%. Het geleverde vermogen is dan zo'n 350 MW, goed voor zo'n 390 MW elektriciteit bij een rendement van 90% voor de elektromotor. We nemen voor de drie scenario's een implementatie van 40%/70%/80% van het technisch potentieel voor de niet-backpressure turbines en 5%/10%/15% van de backpressure turbines. Na 2030 verwachten we een verdere uitfasering van turbines voor aandrijving, al zal dit met name voor de backpressure turbines langzaam verlopen omdat deze in alle scenario's lagere kosten blijven hebben dan de elektromotor.

Warmtepompen in het proces waarderen laagwaardige warmte op door middel van een externe cyclus (gesloten lus) of compressie van de processtroom zelf (mechanische damprecompressie, open lus). Tegen 2030 zouden gesloten lus warmtepompen met een maximale temperatuur van 150°C gestandaardiseerd moeten zijn (Klimaatakkoord, 2019). Open lus warmtepompen zijn tot een hogere temperatuur toepasbaar. De totale hoeveelheid warmte die onder de 200°C gebruikt wordt voor drogen en scheiden bedraagt zo'n 95 PJ. We nemen aan dat de helft hiervan wordt ingevuld door cascadering van hogetemperatuurwarmte die verloren zou gaan bij inzet van een warmtepomp. Het technisch potentieel is daarmee zo'n 50 PJ. Ter referentie: bedrijven in Nederland hebben zo'n 250 PJ restwarmte beschikbaar, waarvan 100 PJ nuttig te gebruiken (CE Delft, 2019d). De 50 PJ geeft een vermogen van 1.600 MW_{th} bij volcontinue operatie. Verder nemen we aan dat de gesloten en open lus warmtepompen in dezelfde mate worden toegepast en volgens een COP van 3,5 respectievelijk 7 hebben (PBL, 2020a). Op basis van een kostprijsanalyse in vergelijking met een bestaande gasketel komen we tot een potentieel van 10%/20%/35% in de drie scenario's oftewel -170/340/590 MW_{th} en 30/60/110 MWe. De techniek van warmtepompen gaat naar verwachting ook na 2030 nog forse ontwikkelingen doormaken, waardoor de inzet nog sterk toe kan nemen.

Elektrisch drogen is nog sterk in ontwikkeling, maar kan op termijn een alternatief zijn voor drogen met warme lucht of stoom. Elektrisch drogen kan met infrarood-, UV-, of microgolffstraling. Daarnaast kan er energie bespaard worden met impingement drogen of het toepassen van warmtepompen of damprecompressie. Als laatste kan soms het droogproces volledig vermeden worden, zoals bij waterloos papier maken. Het potentieel wordt bepaald voor elektrisch drogen met een algemeen toegepaste COP van 1 voor alle technieken, waarbij we wel 25% energiebesparing meenemen ten opzichte van gas (Berenschot et. al., 2017). Het totale energiegebruik voor drogen is naar schatting 52 PJ/j, waarvan we aannemen dat 85% technisch te elektrificeren is. Gas blijft in alle scenario's goedkoper dan elektriciteit, de energiebesparing is onvoldoende om investering in nieuw equipment te rechtvaardigen. Vervanging door elektrisch is wel realistisch als dit leidt tot hogere productie, betere kwaliteit of als het bestaande equipment einde levensduur is. Op basis hiervan schatten we in dat gemiddeld over alle sectoren 10%/20%/30% van het technisch potentieel voor drogers is geëlektrificeerd in 2030. Er is nog aanzienlijke ontwikkeling mogelijk van de technologie en praktische ervaring van elektrisch drogen, na 2030 is een verdere toename dan ook te verwachten.

Warmtepomp voor heet water De voedsel- en drankenindustrie en de papierindustrie verbruiken gezamenlijk zo'n 23 PJ/j aan heet water van 60-100°C. Dit wordt veelal met gasketels geproduceerd, maar kan uitstekend met een warmtepomp gemaakt worden, zeker

¹⁹ Deze 16 PJ wordt verklaard als 10% van het totale verbruik van 159 PJ voor aandrijvingen, waarvan ook een groot gedeelte reeds elektrisch is. Nauwkeuriger cijfers zijn helaas niet beschikbaar.



als er lagetemperatuurrestwarmte beschikbaar is. We gaan ervan uit dat al het heet water geproduceerd kan worden met een warmtepomp, die een COP heeft van 4,5. We nemen aan dat voor de warmtepomp voor heet water een groot deel van het technisch potentieel gerealiseerd gaat worden dan voor de warmtepomp in het proces, omdat de eerste iets efficiënter is en er gemiddeld iets kleinere bedrijven actief zijn in de voedsel- en papier-industrie, die een hogere energieprijis betalen dan de grootverbruikers. Zo komen we op 25%/50%/70% van het technisch potentieel. Dit komt neer op 200/400/550 MW_{th} en 45/90/120 MW_e als we aannemen dat er een voldoende grote warmtebuffer aanwezig is zodat de warmtepomp volcontinu aan kan staan. Richting 2050 verwachten we dat aard-gasgestookte ketels voor heet water volledig vervangen zullen worden door warmtepompen en een klein deel biomassaketels.

Membraanscheiding maakt gebruik van het verschil in diffusiesnelheid van verschillende stoffen door een membraan. Sommige mengsels laten zich uitstekend scheiden middels membranen, waardoor energie-intensieve destillatie vermeden wordt. De enige energie-vraag voor membraanscheiding is de pomp- of compressie-energie om het benodigde drukverschil over het membraan te creëren. De warmtevraag voor scheiden en destillatie bedraagt zo'n 190 PJ, waarvan zo'n 170 PJ in raffinage en chemie. Het is onbekend welk gedeelte hiervan vervangen zou kunnen worden door membraanscheiding, maar groot-schalige overstap van destillatie op membraanscheiding is niet voorzien. De technologie is voor veel scheidingen nog onvoldoende bewezen op grote schaal en implementatie vereist veelal een complete vervanging van het scheidingsproces. Vanwege het lage energiegebruik van membraanscheiding is het additionele elektriciteitsverbruik waarschijnlijk beperkt. In de raffinage en chemie zal elektrificatie van de warmtevraag van conventionele scheidingstechnieken middels warmtepompen, stoomrecompressie en elektrische boilers waarschijnlijk eerder tot stand komen dan membraanscheiding.

Elektrische krakers kunnen op termijn de huidige gasgestookte krakers vervangen. Krakers worden met name gebruikt voor de productie van olefinen uit nafta en waterstof uit aardgas. De fornuizen worden (deels) gestookt op gas uit het kraakproces zelf, bij een elektrische kraker moet hier dus een nieuwe bestemming voor gevonden worden. Het potentieel tot 2030 is beperkt tot een pilot installatie aangezien de techniek nog ontwikkeld moet worden. De Nederlandse naftakrakers verbruiken een geschatte 73 PJ per jaar, de fornuizen hebben een rendement van ongeveer 93% (TechnipFMC, 2017). Vervangen van alle krakers door elektrische krakers met een verondersteld rendement van 97% zou resulteren in een elektriciteitsvraag van zo'n 2.400 MW. De potentiële winst in efficiency is beperkt, daarnaast moet een andere bestemming voor de geproduceerde kraakgassen gevonden worden. Het is lastig te zeggen of de route van nafta- of ethaankraken na 2030 de dominante productieroute voor plastics blijft. Andere productieroutes zijn goed mogelijk, bijvoorbeeld dehydrogenatie van bioethanol tot ethyleen, maar andere producten zijn ook mogelijk, bijvoorbeeld dedicated bioplastics.

Power-to-Heat (P2H) zet elektriciteit met goedkope installaties één-op-één om in warmte als alternatief voor warmteopwekking met fossiele brandstoffen, voornamelijk aardgas. We gaan voor het potentieel uit van een hybride boiler op gas en elektriciteit, maar P2H kan ook een elektrische boiler betreffen of een andere vorm van elektrisch verwarming, bijvoorbeeld ten behoeve van heet water of thermische olie. Het elektrische gedeelte van de hybride boiler zal in principe enkel ingezet worden indien de marginale kosten ervan lager zijn dan die van verwarmen op aardgas.

Een typische hybride boiler wordt gemaakt door een elektrische boiler parallel aan een gasgestookte bestaande boiler te plaatsen. Een elektrische boiler van 20 MWe kost zo'n 1,2 M€ excl. netaansluiting (Berenschot et. al., 2017) en levert 38/42/50 t/h stoom op

20/40/80 barg. Hierbij wordt de elektrische boiler gevoed met verzadigd water vanuit de gasgestookte boiler en levert hij verzadigde stoom. Elektrische oververhitting is mogelijk, maar neemt veel ruimte in en is nog zeer kostbaar. Vanwege de integratie met de bestaande gasgestookte boiler is nabije plaatsing wenselijk, wat vaak lastig is in bestaande, volgebouwde fabrieken. Daarnaast is voldoende aansluitcapaciteit een vereiste, anders is netverzwaring noodzakelijk, dat kosten en vertraging met zich meebrengt.

Naar schatting wordt er 117 PJ/j aan warmte uit stoom gebruikt, wat neerkomt op zo'n 4.000 MW bij volcontinu gebruik²⁰. Op basis van diverse correctiefactoren uit (DNV-GL, 2018b) resteert een technisch potentieel van zo'n 2.300 MW. Voor ieder scenario wordt het potentieel verminderd met een gedeelte van het gerealiseerde van Power-to-Power, warmtepomp in proces en elektrisch drogen. De totale kosten²¹ voor een hybride boiler bedragen +19%/+2%/-10% ten opzichte van een afgeschreven gasboiler in de drie scenario's. Mede op basis van deze prijsstelling en de ontwikkelingen in infrastructuur gaan we uit van realisatie van 10%/50%/80% van het resterende potentieel in de drie scenario's (-250/1.200/1.900 MW). Het aantal draaiuren is gebaseerd op een eigen analyse met het PowerFlex-model van CE Delft. Bij de gas- en CO₂-prijzen in de bovenstaande tabel komt dit neer op 2.000, 3.200 en 4.300 uur per jaar voor respectievelijk het min-, basis- en plus-scenario waarin de marginale kosten van een elektrische boiler lager liggen dan die van een gasgestookte boiler. Voor het basis- en plusscenario is ook berekend hoeveel uur bedrijven hun elektrische boiler zouden bedrijven als ze een CO₂-heffing van 135 €/t willen ontlopen. Dit bedraagt maar liefst 5.900 uur in het basisscenario en 7.300 uur in het plusscenario. De onttrekking van grote volumes elektriciteit aan de markt zal echter een prijsopdrijvend effect hebben, dat de inzet weer wat limiteert.

Elektrisch fornuis/oven is een mogelijke oplossing om hogetemperatuurwarmte te leveren, maar is nog in ontwikkeling. De energie-inzet van kolen, olie en gas voor directe warmte bedraagt 445 PJ, waarvan zo'n 300 PJ in raffinage en chemie. Voor 73 PJ betreft dit inzet in krakers, daarnaast kan een deel vervangen worden door Power-to-Power.²² Het resterend potentieel is 360 PJ, hiervan is naar schatting 85% technisch gezien te vervangen. Bij elektrische fornuizen en ovens is er ook sterke concurrentie met biomassa en CCS. Sectoren die inherent biomassa reststromen beschikbaar hebben, zoals de voedsel- en papierindustrie, zullen deze waarschijnlijk blijven verstoken en niet investeren in een apart elektrisch fornuis. De raffinage en chemie zal naast elektrificatie sterk inzetten op CCS en waterstof. Bij fornuizen gestookt op restgassen moet een andere bestemming voor de restgassen gevonden worden, bijvoorbeeld invoeding op het gasnet na zuivering of waterstofproductie (H-vision, 2019). Op basis van bovenstaande schatten we in dat in 2030 er 7%/10%/16% van alle directe warmte is vervangen door elektriciteit, dat met name kleinere installaties in de bouwmaterialen en voedsel- en drankenindustrie betreft. Na 2030 zal dit aandeel verder toenemen door technologische ontwikkelingen.

²⁰ Gesteld op 8.000 uur per jaar.

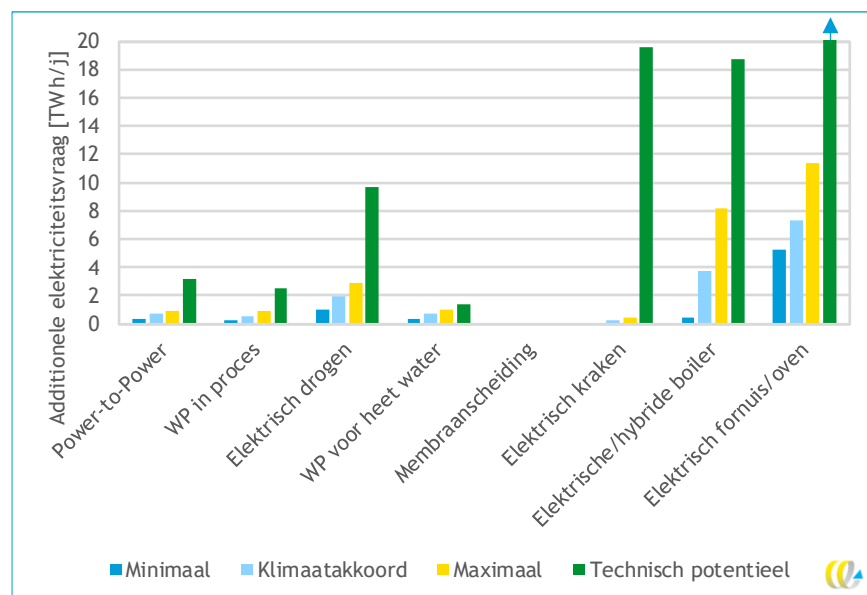
²¹ Investeringskosten in boiler, operatie, onderhoud, netbeheerskosten, brandstofkosten en CO₂. Installatiekosten anders dan een nieuwe netaansluiting zijn niet meegenomen.

²² Het gedeelte van het potentieel van Power-to-Power dat is gerelateerd aan directe warmte (i.t.t. stoom) wordt in zijn geheel afgetrokken van het potentieel van het elektrisch fornuis. Het heeft immers geen zin om met een elektrisch fornuis een medium op te warmen en dit weer over een turbine te leiden, de turbine direct vervangen door een elektromotor is dan logischer.

Tabel 20 - Potentiële additionele elektriciteitsvraag in 2030 in TWh/j voor de genoemde elektrificatieopties in drie scenario's

	Minimaal	Klimaatakkoord	Maximaal	Technisch potentieel
Power-to-Power	0,4	0,7	0,9	3,2
Warmtepomp in proces	0,3	0,5	0,9	2,6
Elektrisch drogen	1,0	1,9	2,9	9,7
Warmtepomp voor heet water	0,4	0,7	1,0	1,4
Membraanscheiding	p.m.	p.m.	p.m.	p.m.
Elektrisch kraken	0,0	0,2	0,4	19,5
Elektrische/hybride boiler incl. vermindering Wkk-productie	0,5	3,8	8,2	18,7
Elektrisch fornuis/oven	5,3	7,3	11,3	77,1
Totaal	7,7	15,1	25,6	132

Figuur 40 - Visuele weergave van de potentiële additionele elektriciteitsvraag. Het technisch potentieel van elektrische fornuizen en ovens valt buiten de grafiek (77 TWh)



5.3 Glastuinbouw

De volledige bespreking van de glastuinbouw is te vinden in Bijlage A, hieronder volgt een samenvatting.

Voor de glastuinbouw zijn de volgende technieken beschouwd:

- geothermie (pompenergie, warmtepomp);
- warmtekoudeopslag (wko);
- Power-to-Heat;
- restwarmte (pompenergie).

Daarnaast is de elektriciteitsvraag sterk afhankelijk van de toe- of afname van het areaal, de groei in de hoeveelheid belicht areaal en de toegepaste belichtingsintensiteit. Op basis

van een bestaande scenariostudie (van der Velden, et al., 2018) zijn drie scenario's doorgerekend voor de glastuinbouw.

Tabel 21 - Areal en potentiële extra elektriciteitsvraag in 2030 per onderwerp ten opzichte van 2018

Optie	Eenheid	Minimaal	Klimaatakkoord	Maximaal
Areaal totaal	ha	6.945	8.900	9.055
Waarvan belicht	ha	3.267	4.237	4.586
Geothermie	TWh/j	+0,04	+0,10	+0,23
Warmtepomp geothermie	TWh/j	0,00	+0,03	+0,11
Wko	TWh/j	+0,00	+0,03	+0,05
Power-to-Heat	TWh/j	+0,04	+0,04	+0,04
Restwarmte	TWh/j	+0,00	+0,02	+0,04
Extra belichting	TWh/j	-1,1	+1,0	+2,1
Totale vraag	TWh/j	-1,1	+1,3	+2,7

5.4 Datacenters

De volledige bespreking van datacenters is te vinden in Bijlage B, hierna volgt een samenvatting.

De energievraag van datacenters komt reeds vrijwel geheel uit elektriciteit, er is hier dan ook geen sprake van elektrificatie, maar van extra elektriciteitsvraag. Deze additionele vraag komt door een voorspelde toename in het datagebruik, met name door clouddiensten. Een continue verdere toename in efficiency moet de elektriciteitsvraag binnen de perken houden. Van beide factoren is de ontwikkeling onzeker, dit geeft een grote variatie in de eindwaarden omdat het exponentiële groei betreft.

Tabel 22 - Groei in het dataverbruik en de energie-efficiëntie tot en met 2030 voor drie scenario's en de resulterende elektriciteitsvraag

Factor	Eenheid	Minimaal	Klimaatakkoord	Maximaal
Groei dataverbruik	% jaar-op-jaar	+23,1% (-20%)	+28,9%	+34,7% (+20%)
- totaal t.o.v. 2018	factor	12,1	21	35,5
Groei energie-efficiency	% jaar-op-jaar	+16%	+16%	+19,2% (+20%)
- totaal t.o.v. 2018	factor	5,9	5,9	8,2
Totaal elektriciteitsgebruik	% jaar-op-jaar	+6,1%	+11,1%	+13,0%
- totaal t.o.v. 2018	factor	2,0	3,5	4,3
Elektriciteitsverbruik totaal 2030	TWh/j	9,4	16,3	19,9
Gemiddeld vermogen	GW	1,1	1,9	2,3
Aansluitvermogen	GW	3,1	5,3	6,5
Toename verbruik t.o.v. 2018	TWh/j	4,8	11,7	15,3
Toename aansluitvermogen t.o.v. 2018	GW	1,6	3,8	5,0

De ontwikkeling van de vraag naar data is marktgedreven en er is slechts beperkt beleid op het gebied van energie-efficiëntie. Bij problemen rondom de inpassing van datacenters zou de vergunningverlening wel opgeschort kunnen worden of kunnen aanvullende eisen gesteld

worden, zoals een verplichte aansluiting op het hoogspanningsnet of het stellen van efficiency eisen. In de praktijk blijkt dit wel lastig en juridisch onzeker.

Zowel de toename in dataverbruik als in energie-efficiëntie zal zich doorzetten na 2030. Hoe deze factoren zit tot elkaar verhouden is echter niet zeker. De ontwikkelingen van datacenters gaan dusdanig snel dat een kwantitatieve doorkijk naar 2050 grenst aan speculatie, om die reden weerhouden wij ons hier dan ook van.

5.5 Feedstock industrie (waterstof uit elektrolyse)

De volledige bespreking van feedstock voor de industrie is te vinden in Bijlage C, hieronder volgt een samenvatting.

Naast het energiegebruik van de industrie, zal ook het grondstofverbruik tegen 2050 CO₂-neutraal moeten zijn. Dit kan op meerdere manieren: volledig circulaire ketens zodat er geen uitstoot meer is, biobased producten zodat het enkel kortcyclische CO₂ betreft, gebruik van groene waterstof en CO₂ of direct elektrochemisch met CO₂. We gaan uit van het gebruik van groene waterstof en CO₂ omdat we geïnteresseerd zijn in een toename van de elektriciteitsvraag en dit de meest energie-intensieve route is. Het is niet mogelijk om alle chemische producten te beschouwen, daarom gaan we op basis van eerdere studies (ICF, Fraunhofer, 2019) (DECHEMA, 2018) uit van de volgende productieroutes, die het grootste deel van de CO₂-afdruk van industriële grondstoffen vertegenwoordigen:

- waterstof uit elektrolyse voor raffinaderijen;
- ammoniak uit groene waterstof en stikstof;
- methanol uit groene waterstof en CO₂;
- etheen en propeen uit methanol;
- benzeen uit methanol;
- benzine, diesel, kerosine, gasolie en stookolie vervangen door methanol;
- staalproductie met waterstof.

Alle routes beginnen met waterstof, vele verlopen via methanol. De energiebehoefte van iedere route is bepaald op basis van (DECHEMA, 2018) en een eigen model.

Op basis van bestaande plannen van bedrijven is de volgende inschatting gemaakt van het opgestelde vermogen van elektrolyzers in 2030:

Tabel 23 - Opgesteld elektrolysevermogen in MW in 2030 per scenario en toepassing

		Minimaal	Klimaatakkoord	Maximaal
Waterstofraffinaderijen	MW	250	1.000	2.000
Ammoniak	MW	250	500	1.000
Methanol	MW	20	60	200
Etheen	MW	0	10	50
Propeen	MW	0	10	50
Benzeen	MW	0	10	50
Brandstoffen	MW	0	10	50
Staal	MW	0	100	250
Totaal	MW	520	1.700	3.650

Bij producten zonder concrete projecten zijn we uitgegaan van een 10 MW pilotinstallatie in het basisscenario en een 50 MW opschalingsinstallatie in het plusscenario.

De huidige opzet van de SDE+-regeling stelt 2.000 uur per jaar subsidiabel voor waterstofproductie uit elektrolyse. Deze subsidie compenseert de vaste lasten om 2.000 uur per jaar te produceren. Om zonder subsidie meer te produceren, hoeft dus enkel gerekend te worden met de marginale elektriciteitsprijs en de variabele onderhoudskosten.

De verwachte bandbreedte voor de kostprijs van importwaterstof bedraagt omgerekend 45-68 €/MWh HHV in 2030 (CE Delft, Nuon, Gasunie, 2018).²³ Dit resulteert in ongeveer 2.000 tot 3.000 rendabele uren voor groene waterstof, op basis van de verwachte elektriciteitsprijs en marginale kosten uit een eerdere studie van CE Delft (CE Delft, 2020). In deze eerdere studie is de extra elektriciteitsvraag door elektrificatie echter nog niet meegenomen, dat een prijsopdrijvend effect heeft en zo het aantal rendabele vollasturen beperkt. Daarom stellen we het aantal bedrijfsuren voor elektrolyse op 2.000 uur per jaar in alle scenario's.

Tabel 24 - Additionele elektriciteitsvraag in TWh/j in 2030 per scenario en toepassing

		Minimaal	Klimaatakkoord	Maximaal
Groene waterstofraffinaderijen	TWh/j	0,5	2,0	4,0
Ammoniak	TWh/j	0,5	1,0	2,0
Methanol	TWh/j	0,0	0,1	0,4
Etheen	TWh/j	0,0	0,0	0,1
Propeen	TWh/j	0,0	0,0	0,1
Benzeen	TWh/j	0,0	0,0	0,1
Brandstoffen	TWh/j	0,0	0,0	0,1
Staal	TWh/j	0,0	0,2	0,5
Totaal	TWh/j	1,0	3,4	7,3

Alleen als gedachtenexperiment: Bij volledige vervanging van de huidige vraag door de voorgestelde routes zou de additionele elektriciteitsvraag zo'n 1.650 TWh/j bedragen, dat neer komt op ongeveer 200 GW bij volcontinue productie.²⁴ Dit is niet realistisch. Er moet dus ingezet worden op een combinatie van vraagvermindering, circulariteit, import en andere productieroutes dan hier beschreven worden.

5.6 Kenmerken vraagprofiel

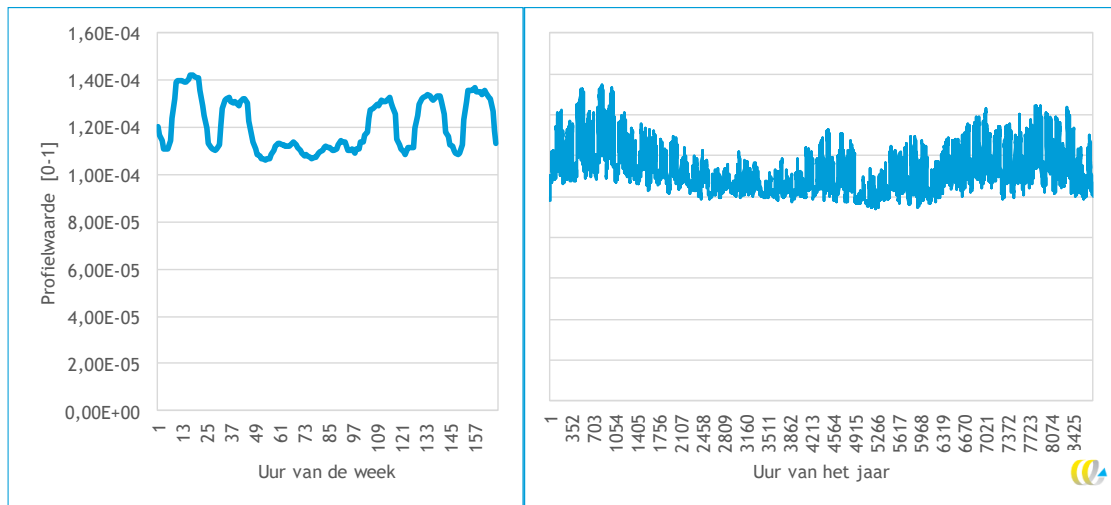
5.6.1 Industrie

De grotere bedrijven produceren volcontinu in ploegendienst, bijvoorbeeld de chemie, de staalindustrie en raffinaderijen. Deze bedrijven hebben een vlak profiel. Andere bedrijven werken 5 of 6 dagen. Sommige bedrijven draaien productiecampagnes, bijvoorbeeld de suikerindustrie. Het patroon voor de voedsel-, bouwmaterialen- en papierindustrie is een combinatie van een fluctuerend patroon en een vlak patroon om recht te doen aan de verschillende bedrijfsgroottes.

²³ Hierbij moet opgemerkt worden dat de daadwerkelijke totstandkoming van deze keten nog een vraagteken is.

²⁴ Dit is aanzienlijk meer dan het huidige totale energieverbruik van Nederland. Dit komt omdat we uitgaan van vervanging van de huidige productie, die voor de meeste genoemde producten hoger is dan het binnenlands verbruik. Daarnaast is de efficiëntie van de meeste routes tussen de 45% en 65%, dat ook voor een factor 1,5-2 hogere energievraag zorgt.

Figuur 41 - Fluctuerend profiel voor de voedsel-, bouwmaterialen- en papierindustrie. De linker grafiek geeft een week in januari weer, de grafiek rechts het hele jaar

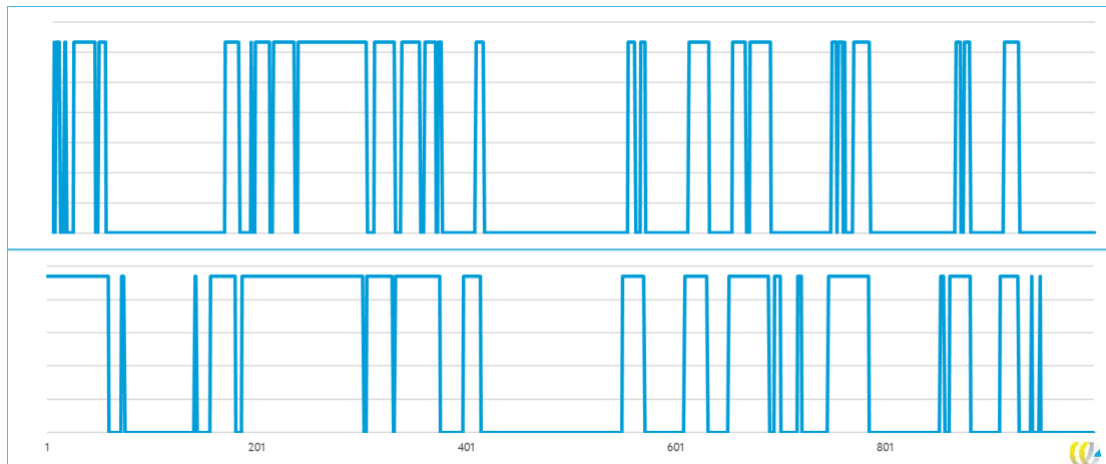


De meeste elektrificatietechnieken worden op basislast bedreven. Deze technieken volgen het vraagprofiel van de industrie waarin ze ingezet worden.

Hybride boilers worden ingezet indien elektriciteit goedkoper is dan het alternatief, grofweg komt dit erop neer dat elektriciteit goedkoper moet zijn dan gas + CO₂. De prijsdrempels in de drie scenario's bedragen afgerond 32, 50 en 59 €/MWh, dat resulteert in 2.000, 3.200 en 4.300 vollasturen.²⁵ De elektriciteitsprijs en de residuele vraag (de elektriciteitsvraag na aftrek van productie van elektriciteit uit zon en wind) staan met elkaar in verband omdat de residuele vraag wordt opgevuld door regelbare centrales die op volgorde van marginale prijs worden ingeschakeld. De inzet van hybride boilers stellen we in andere weerjaren zodanig in dat de residuele vraag in het beschouwde weerjaar niet hoger is dan de maximale residuele vraag waarbij de boilers nog ingezet werden in het basisjaar. Bij een gemiddeld lagere productie uit hernieuwbare bronnen hoort dus een hogere elektriciteitsprijs en navenant minder inzet van elektrische boilers. De invloed van import en export wordt bij deze aanpak niet meegenomen, maar we gaan uit van een grote gelijktijdigheid in hernieuwbare opwek met omliggende landen, waardoor de gemaakte fout beperkt is.

²⁵ Op basis van een eerdere studie met het PowerFlex-model van CE Delft.

Figuur 42 - Profielen voor de eerste 1.000 uur in het jaar voor elektrische boilers de scenario's Klimaatakkoord (boven) en Maximaal (beneden)



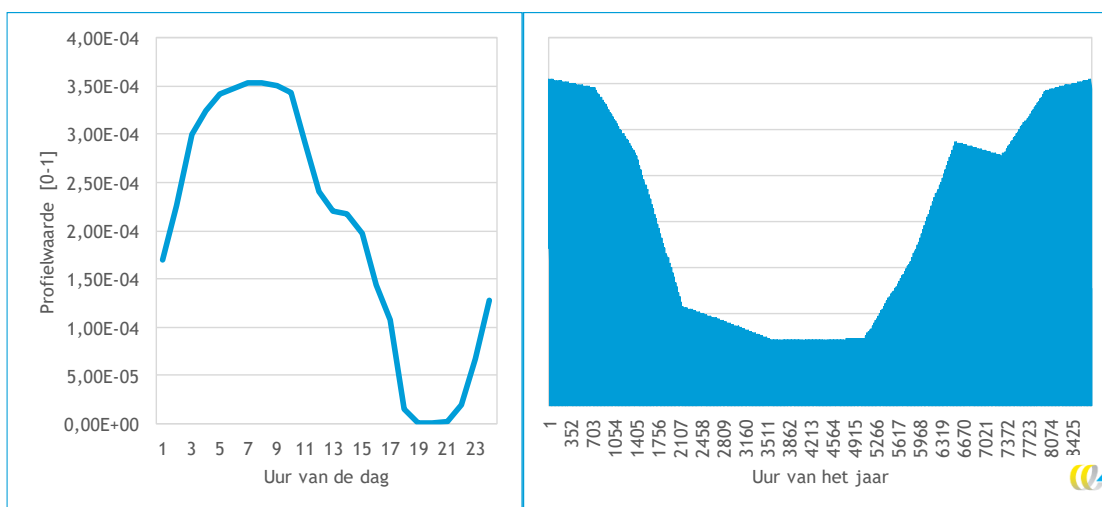
5.6.2 Glastuinbouw

Het vraagprofiel van de glastuinbouw beschouwen we los van de opwek uit wkk. Het betreft dus de gehele vraag, ook de vraag die niet vanuit het net gedekt wordt.

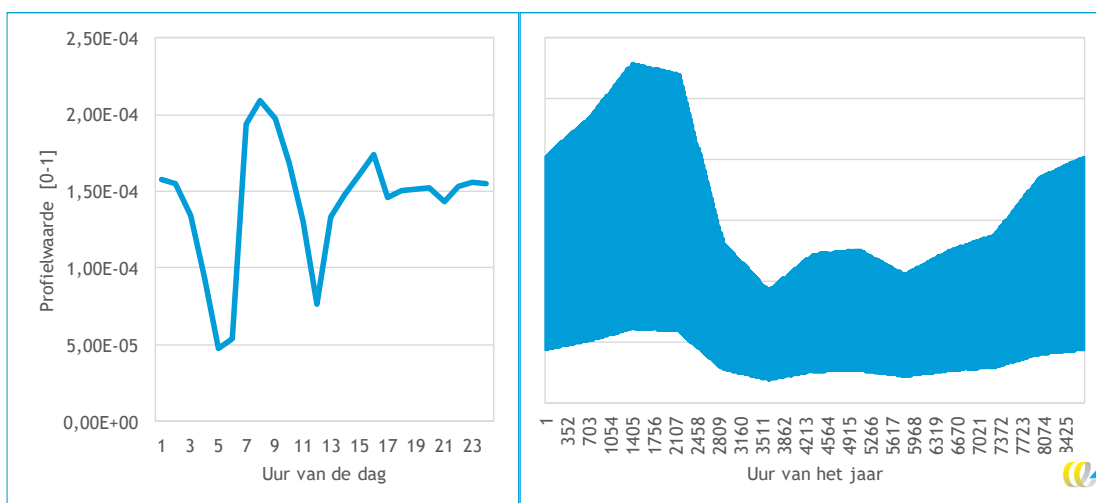
De elektriciteitsvraag is op te delen in vraag voor belichting (circa 80%), vraag voor (CO₂-vrije) verwarming en vraag voor overige apparatuur, bijvoorbeeld om de luiken te openen of de rijen te verplaatsen.

De elektriciteitsvraag voor belichting is voornamelijk tussen september en april, waarvan 80% 's nachts. De lampen gaan rond of iets na middernacht aan en blijven aan totdat de zon voldoende licht geeft. Het vraagprofiel verschilt per teelt en per seizoen. We maken onderscheid tussen de belichte groente- en fruitteelt en de belichte bloemen- en plantenteelt. Omdat er geen landelijke vraagprofielen voor belichting in de glastuinbouw beschikbaar zijn, maken we gebruik van profielen op basis van een studie van de glastuinbouw in Ontario, Canada (Posterity Group, 2019). Deze provincie ligt net als Nederland op ongeveer 50° NB en heeft dus een vergelijkbare hoeveelheid daglicht. Het profiel wijkt zeker af van de Nederlandse situatie, maar de hoofdkarakteristieken (vermogen en volume) komen ruwweg overeen.

Figuur 43 - Profielen voor de elektriciteitsvraag van belichting in de groente- en fruitteelt. Links is het dagprofiel, rechts is het jaarprofiel

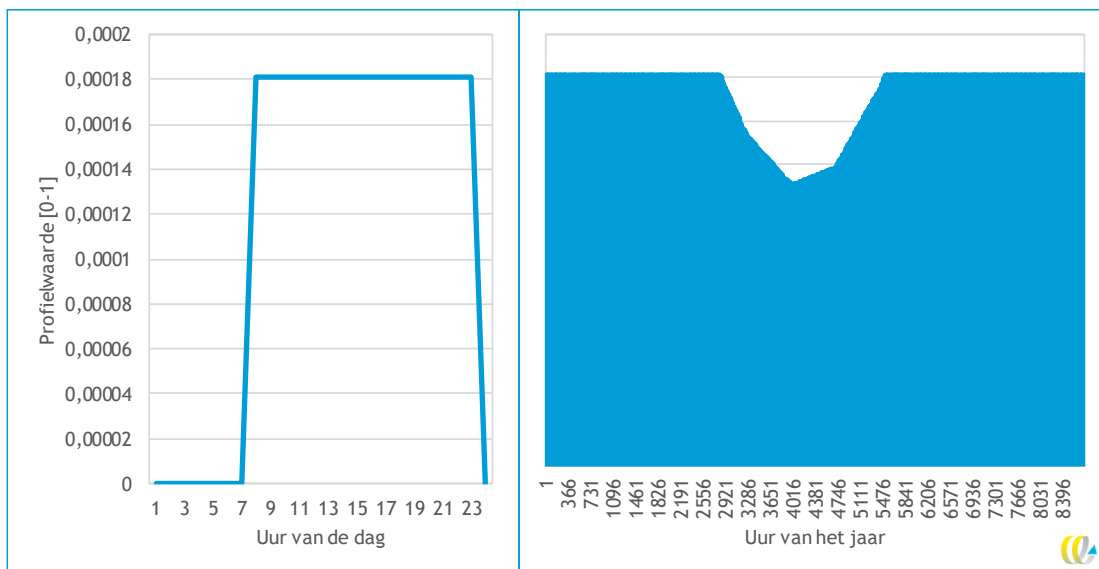


Figuur 44 - Profielen voor de elektriciteitsvraag van belichting in de bloemen- en plantenteelt. Links is het dagprofiel, rechts is het jaarprofiel



De warmtevraag van de kas is gerelateerd aan de buitentemperatuur en de instraling. De warmtevraag is dus voornamelijk in de winter. Voor de belichte teelt is de warmtevraag lager op de uren dat de belichting aan staat, omdat de belichting zelf ook veel warmte produceert. De kastemperatuur is over het algemeen 's nachts 1-2 °C lager. Het meeste elektriciteitsverbruik voor duurzame warmte komt van geothermie en de totale extra elektriciteitsvraag voor alle opties samen is bescheiden. Daarom hanteren we voor alle warmteopties hetzelfde profiel als voor geothermie. Dit profiel is een profiel voor basislast, waarbij er een constante warmtevraag is van 07:00 tot 22:00 op alle dagen van het jaar. De warmtevraag is lager in de zomer, zie Figuur 45. Het is met name op dagbasis een grof profiel, maar heeft de belangrijkste kenmerken van de basislast warmtevraag.

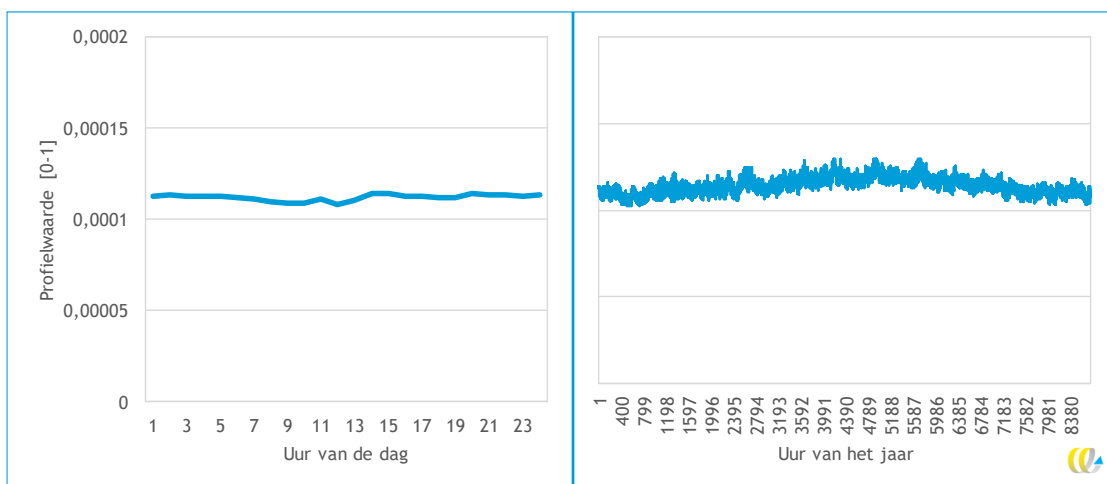
Figuur 45 - Profiel voor elektriciteitsvraag voor duurzame warmte in de glastuinbouw. Links is het dagprofiel, rechts is het jaarprofiel



5.6.3 Datacenters

Het dagprofiel van een datacenter is weergegeven in de linkerhelft van Figuur 46 en is verkregen via de Dutch Data Center Association. Aangezien het verbruik van een datacenter erg vlak is over het jaar, is het profiel hetzelfde genomen voor iedere dag, waarbij het verbruik varieert aan de hand van de buitentemperatuur. Hierbij zijn we uit gegaan van een Power Usage Efficiency (PUE) van 1,2, waarvan 80% voor koeling. We hebben aangenomen dat de koeling een maximaal verbruik heeft bij een buitentemperatuur van 30°C. De koelvraag is 50% van het maximum bij een buitentemperatuur van 0°C en varieert lineair tussen de 0 en de 30°C in.

Figuur 46 - Vraagprofiel datacenters. Links is het dagprofiel, rechts is het jaarprofiel



5.6.4 Feedstock industrie

De routes voor productie van feedstock zijn gebaseerd op waterstofproductie middels elektrolyse. Voor alle scenario's nemen we 2.000 uur per jaar aan. Dit is hetzelfde profiel als de 2.000 uur per jaar voor de elektrische boiler. De processen om waterstof om te zetten naar andere moleculen zullen volcontinu draaien.

5.7 Flexmogelijkheden

De meeste vormen van elektrificatie in de industrie kennen een vlak patroon, met een piekvraag van zo'n 1,25 keer de gemiddelde vraag.²⁶ Alleen hybride boilers (zowel aardgas als elektrisch) en elektrolyzers kennen de mogelijkheid om overschotten van zon en wind nuttig te gebruiken. Bij de huidige lage aardgasprijzen zal het aantal momenten dat hybride ketels overschakelen tussen aardgas en elektrisch beperkt zijn. Ook zal hierdoor het aantal bedrijven dat een hybride ketel aanschaft of een aardgasketel ombouwt beperkt zijn, omdat de verwachting dat de investering kan worden terugverdiend klein is. Pas als de aardgasprijs weer substantieel stijgt kan dit effect verdwijnen. Op basis van een overall kostenbenadering zou kunnen worden berekend hoe hoog een subsidie kan zijn om deze flexopties aantrekkelijk te maken voor industriële partijen.

Elektrolyzers voor de productie van waterstof zijn zeer snel op en af te regelen. PEM elektrolyzers zijn zelfs zo goed regelbaar dat ze ook inzetbaar zijn als frequency containment reserve om de netfrequentie constant te houden (Alshehri, et al., 2019).

Flexibiliteit zou ook kunnen komen door het snel op- of afregelen of zelfs tijdelijk stopzetten van het productieproces zelf. Dit is bij de meeste energie-intensieve processen simpelweg niet mogelijk, laat staan economisch. De opstarttijd van chemische fabrieken kent een tijdschaal van dagen tot soms enkele weken. Voor processen die beter regelbaar zijn, is het maar de vraag of de uitgespaarde energiekosten opwegen tegen de verminderde productie en of fabriekseigenaren aan te sporen zijn demand side response toe te passen. Een uitzondering hierop zijn elektrochemische processen, die wel goed schakelbaar zijn en waar de energiekosten een substantieel aandeel hebben in de prijs van het product. Voorbeelden hiervan zijn de chloor- en aluminiumproductie, waar demand side response dan ook al wordt toegepast.

5.8 Conclusie

Het potentieel voor elektrificatie in de industrie is groot omdat een groot deel van het huidig energiegebruik bestaat uit warmte, dat veelal geëlektrificeerd kan worden. Elektrificatie zal dan ook gaan gebeuren, de vraag is alleen hoeveel. In Tabel 25 is de vraag voor de beschouwde sectoren weergegeven voor de drie scenario's.

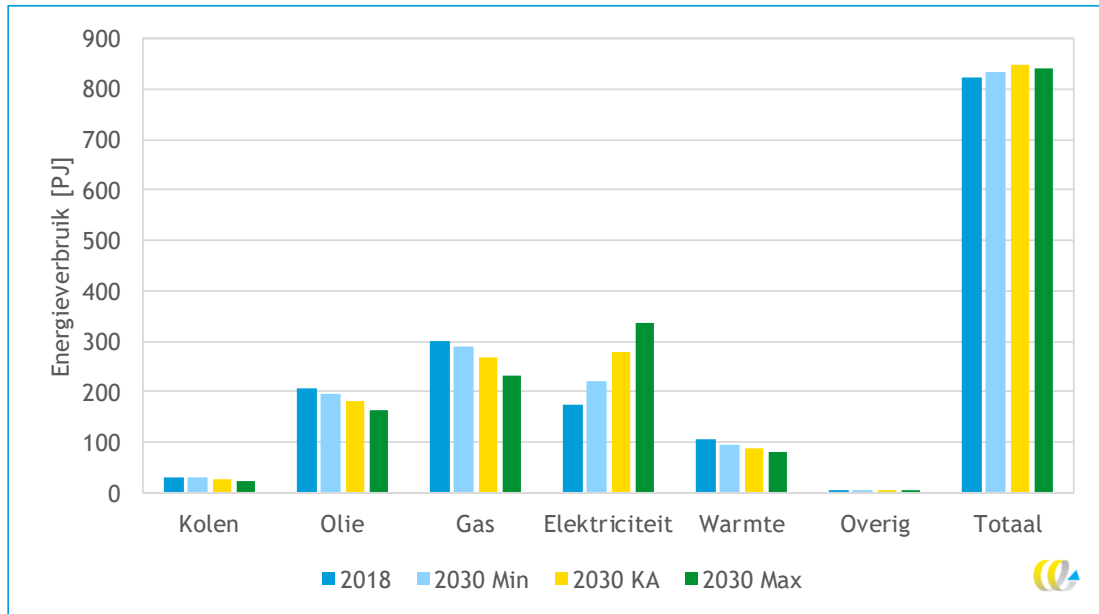
Tabel 25 - Additionele elektriciteitsvraag in TWh/j voor de industrie

	Minimaal	Klimaatakkoord	Maximaal
	TWh/j	TWh/j	TWh/j
Industrie	7,7	15,1	25,6
Glastuinbouw	-1,1	1,3	2,7
Datacenters	4,8	11,7	15,3
Feedstock industrie	1,0	3,4	7,3
Totale additionele vraag	12,4	31,5	50,9

²⁶ Profiel van totale elektrificatie in de industrie, excl. hybride boilers en elektrolyzers.

In Figuur 47 is het energiegebruik per energiedrager weergegeven voor de verschillende scenario's. Feedstock is hier buiten beschouwing gelaten.²⁷ Het is duidelijk te zien dat alle fossiele brandstoffen afnemen en elektriciteit sterk toeneemt. Het totale energiegebruik neemt ook toe, waarbij de besparingen door efficiency lager uitvallen dan de toegenomen vraag vanuit datacenters en de glastuinbouw. De gegevens zijn gebaseerd op de werkelijke cijfers van 2018 en de KEV 2019.

Figuur 47 - Energiegebruik in PJ/j voor alle sectoren excl. feedstock in de verschillende scenario's



De additionele elektriciteitsvraag vanuit datacenters en de glastuinbouw betreft grotendeels autonome ontwikkelingen. De overstap op CO₂-vrije verwarming in de glastuinbouw is wel sterk beleidsafhankelijk, maar heeft maar beperkte consequenties voor de totale energievraag vanuit de sector.

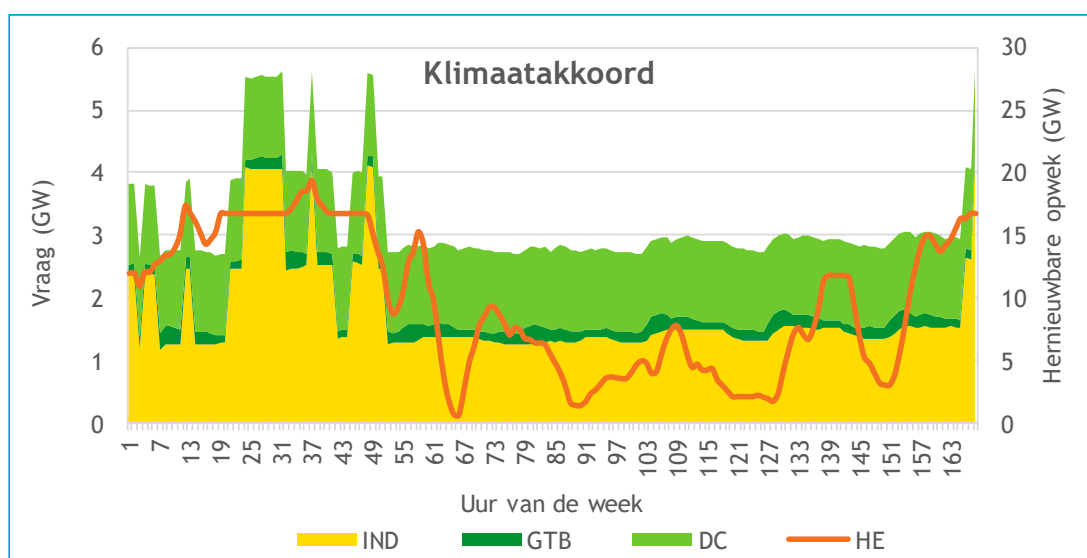
Voor de energie-intensieve industrie is de belangrijkste barrière voor elektrificatie de hogere prijs van elektriciteit ten opzichte van fossiele brandstoffen in combinatie met de investeringen in nieuwe installaties. Hoewel algemeen verwacht wordt dat elektriciteit goedkoper zal worden en aardgas duurder, zal deze ontwikkeling in veel gevallen niet sterk genoeg zijn om elektrificatie rendabel te maken. Het doel voor emissiereductie in 2030 in de industrie zoals gesteld in het Klimaatakkoord en het instrument van de CO₂-heffing voor de industrie kunnen een effectief middel zijn om deze verandering alsnog tot stand te brengen, dat tot uiting komt in het verschil tussen het minimale scenario en het Klimaat-akkoordscenario. Hierbij is het voor de daadwerkelijke realisatie in 2030 nog de vraag of de businesscase van elektrificatie op tijd goed is. Als er bijvoorbeeld pas in 2028 een gunstige businesscase is, zal dit in veel gevallen te laat zijn om de uitvoering van een elektrificatieproject in 2030 rond te hebben, nog afgezien van de aanlooptijd van netverzwaring.

²⁷ Het betrouwbaar bepalen van het energiegebruik en de CO₂-uitstoot van de huidige processen was niet mogelijk binnen de beschikbare tijd.

Een deel van de elektrificatie is echter minder afhankelijk van prijs alleen. Inmiddels is duidelijk dat de CO₂-vrij verwarmen de norm wordt, bedrijven zullen hier dan ook rekening mee houden als installaties vervangen of gerenoveerd worden. Elektrificatie is dan een toekomstbestendige investering. Met warmtepompen, membraanscheiding of de aanschaf van een elektrische oven kunnen veel (kleinere) bedrijven snel overstappen op CO₂-vrije verwarming en hebben daarmee in een keer hun klimaatdoelstellingen gehaald. Deze ontwikkeling komt tot uiting in het minimumscenario.

De huidige warmtevraag in de industrie is vaak veel groter dan de elektriciteitsvraag. Bij het vervangen van fossiele brandstoffen door elektriciteit zitten bedrijven dan ook al snel aan de limiet van hun aansluiting. Omdat het gaat om een hoge elektriciteitsvraag op een enkele locatie, zal (lokale) netverzwaring vaak noodzakelijk zijn voordat er vergaand geëlektrificeerd kan worden. De extra elektriciteitsvraag kan variëren van enkele megawatt tot meer dan een gigawatt op een enkele locatie. Verzwaring van bovengenoemde netten of zelfs de aanleg van een nieuwe hoogspanningsverbinding kunnen dan ook nodig zijn om elektrificatie bij grote afnemers mogelijk te maken.

Figuur 48 - Totaal vraagprofiel voor de industrie in GW voor week 1 van weerjaar 2015 samen met de hernieuwbare opwek. Vraag en aanbod volgens het Klimaatakkoord-scenario, feedstock industrie valt onder industrie



Het karakter van de meeste industrie is volcontinu, het vraagprofiel is dan ook vrijwel vlak, zoals te zien in Figuur 48. Er zijn geen toepassingen die een sterke correlatie hebben met de opwek uit zon en wind. Daarnaast is vraagsturing maar beperkt mogelijk. De inzet van hybride boilers en elektrolyzers volgt de marktprijs en helpt daarmee het energiesysteem. De overige elektrificatie in de industrie is baseload en past daarmee niet bij het aanbod uit zon en wind, dat kan leiden tot een (beperkte) toename in CO₂-emissie. Elektrificatie in de industrie vereist dat afnemers uit de industrie, producenten van hernieuwbare elektriciteit en netbeheerders tijdig samen optrekken en samenwerkingsverbanden aangaan om elkaar zekerheden verschaffen zodat zij op tijd de benodigde investeringen kunnen doen.

6 Match vraag en productie 2030

In dit hoofdstuk beschouwen we de match van aanbod (met een toenemende productie van elektriciteit uit zon en wind) en de elektriciteitsvraag, inclusief de te verwachten elektrificatie zoals eerder beschreven.

6.1 Hernieuwbare elektriciteitsproductie in 2030

Voor de productie uit zon-pv, wind op land en wind op zee beschouwen we een scenario gebaseerd op het Klimaatakkoord (KA) en een versnellingscenario, Klimaatakkoord Plus (KA+). Voor beide scenario's zullen we de hernieuwbare opwek laten zien voor twee weerjaren. Als gemiddeld jaar nemen we 2015, als extreem jaar 1987. Dit jaar had een koude winter met donkere en windstille periodes ('Dunkelflaute').

Voor het Klimaatakkoord-scenario is de jaarlijkse opwek van zon-pv, wind op land en wind op zee overgenomen van de KEV (PBL, 2019b). De jaarlijkse opwek is omgerekend naar opgesteld vermogen door middel van vollasturen. Hiervoor zijn de aannames van de doorrekening van het ontwerp-Klimaatakkoord gebruikt (PBL, 2019c), aangezien dit niet expliciet terugkomt in de KEV. Voor het weerjaar 1987 blijft het opgestelde vermogen gelijk, maar het aantal vollasturen – en dus de jaarlijkse productie – ligt lager. Het aantal vollasturen voor het weerjaar 1987 is gebaseerd op het productieprofiel.²⁸ De productieprofielen voor zowel weerjaar 2015 als weerjaar 1987 zijn afkomstig uit het energietransitiemodel (ETM) van Quintel (Quintel, 2020).

Het Klimaatakkoord Plus-scenario is gebaseerd op de ambitie voor hernieuwbare productie voor het 55%-reductiepakket van het Klimaatakkoord. De ambitie voor hernieuwbare productie is in dit pakket 120 TWh, ten opzichte van 84 TWh bij het reguliere pakket. De invulling van deze 120 TWh, dus de verdeling over zon-pv, wind op land en wind op zee, is niet gedefinieerd. Daarom is aangenomen dat de verdeling van de verdeling over de technologieën gelijk is als in de KEV (PBL, 2019b). Het aantal vollasturen voor de twee weerjaren is gelijk aan het Klimaatakkoord-scenario. Voor het KA+-scenario worden dezelfde productieprofielen gebruikt als voor het KA-scenario.

Het opgesteld vermogen per scenario en de productie per klimaatjaar zijn te vinden in Tabel 26. De weerjaren worden hierna in meer detail besproken.

Tabel 26 - Hernieuwbare energie voor een gemiddeld en een extreem jaar

	2019		2030 Klimaatakkoord			2030 Klimaatakkoord Plus		
	Opgesteld vermogen	Opwek 2019	Opgesteld vermogen	Opwek 2015	Opwek 1987	Opgesteld vermogen	Opwek 2015	Opwek 1987
	GW	TWh/j	GW	TWh/j	TWh/j	GW	TWh/j	TWh/j
Zon-pv	6,8	5,2	26,9	24	24	35	32	31
Wind op Land	3,5	7,9	6	18	16	8,6	25	23
Wind op Zee	1,0	3,6	10,8	47	39	16	70	58
Totaal		16,7		89	79		127	113

Bron data 2019: (CBS, 2020c).

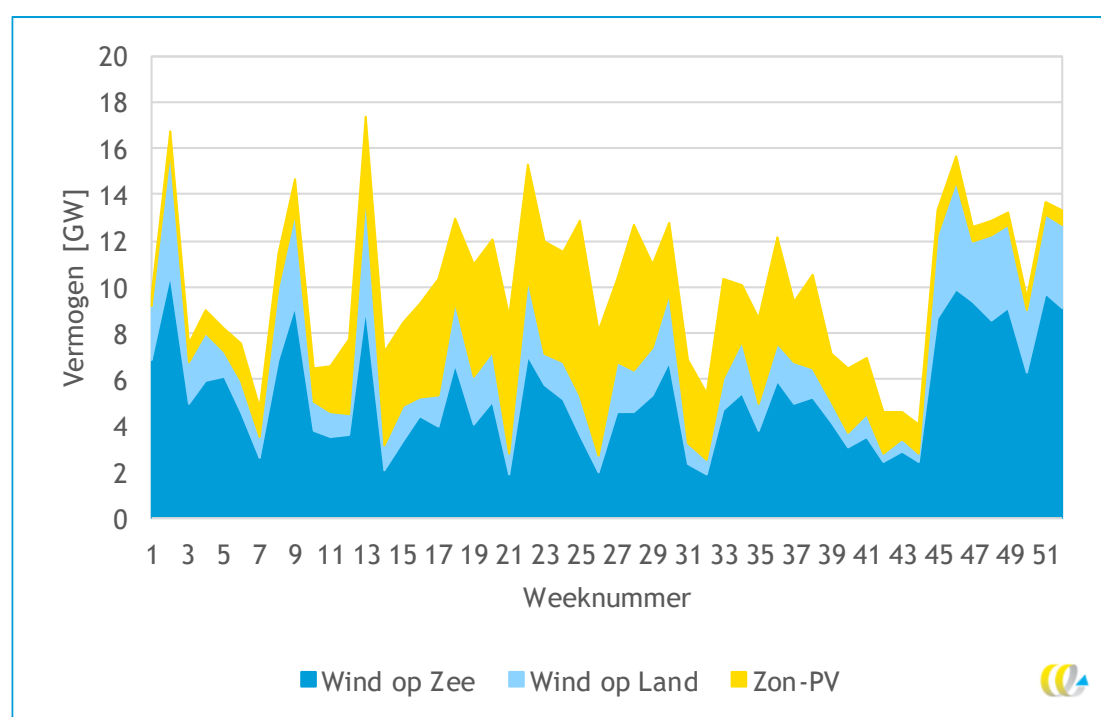
²⁸ Hierbij zijn technologische ontwikkelingen die zorgen voor een hoger aantal vollasturen, zoals bijvoorbeeld hogere windmolens, meegenomen. Er is aangenomen dat de relatieve toename van het aantal vollasturen door technologische ontwikkelingen gelijk is voor de weerjaren 2015 en 1987.

6.1.1 Gemiddeld weerjaar - 2015

Voor het gemiddelde jaar nemen we weerjaar 2015. 2015 begon met een zachte, maar natte en winderige winterige januari. Februari was ook zacht, maar de lente was koel en zonnig. De zomer was vrij warm. September en oktober waren relatief koud, maar november en december waren weer historisch zacht. Met 1.894 zonuren was 2015 een zeer zonnig jaar. De gemiddelde temperatuur was 10,9°C (KNMI, 2016).

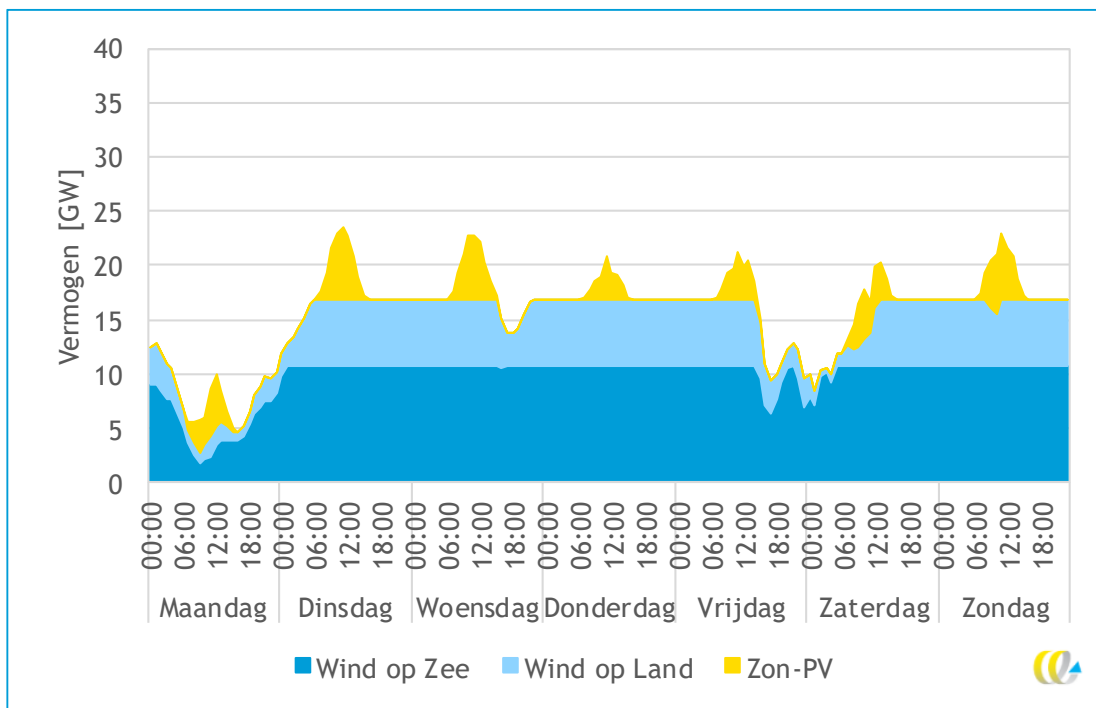
De weekgemiddelde hernieuwbare elektriciteitsproductie voor klimaatjaar 2015 is weergegeven in Figuur 49. Het maximale vermogen uit hernieuwbare productie is 37,5 GW, het minimale vermogen 0 GW en het gemiddelde vermogen 10,2 GW.

Figuur 49 - Weekgemiddelde productie van hernieuwbare opwek in het jaar 2030 met weerjaar 2015 voor het Klimaatakkoord-scenario

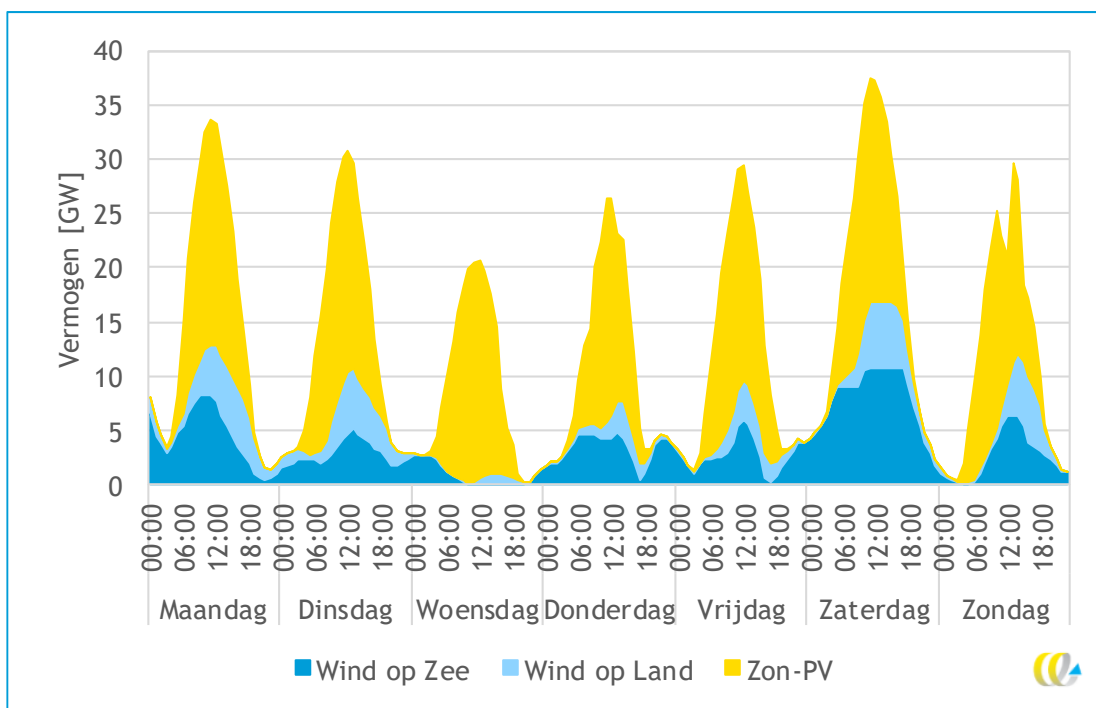


In Figuur 50 en Figuur 51 zijn een zeer winderige en een zeer zonnige week ter illustratie weergegeven. Interessant is dat de *toekomstige* productie van zon-pv in de *winderige* week hoger is dan de *huidige* productie van zon-pv in een *zonnige* week. Andersom is de *toekomstige* productie van windmolens in de *zonnige* week ruimschoots hoger dan de *huidige* maximale productie uit wind in een *winderige* week.

Figuur 50 - Een erg winderige week in weerjaar 2015: week 46 voor het Klimaatakkoord-scenario. Wind op Land en Wind op Zee leveren een flink aantal uren op vol vermogen (ca. 17 GW)



Figuur 51 - Een zeer zonnige week in weerjaar 2015: week 25 voor het Klimaatakkoord-scenario. De dagelijkse zonnepiek is rond de 20 GW



Het Klimaatakkoord Plus-scenario levert op ieder moment een hoger vermogen, tot een maximum van 51,8 GW, maar heeft qua vorm een vergelijkbaar profiel.

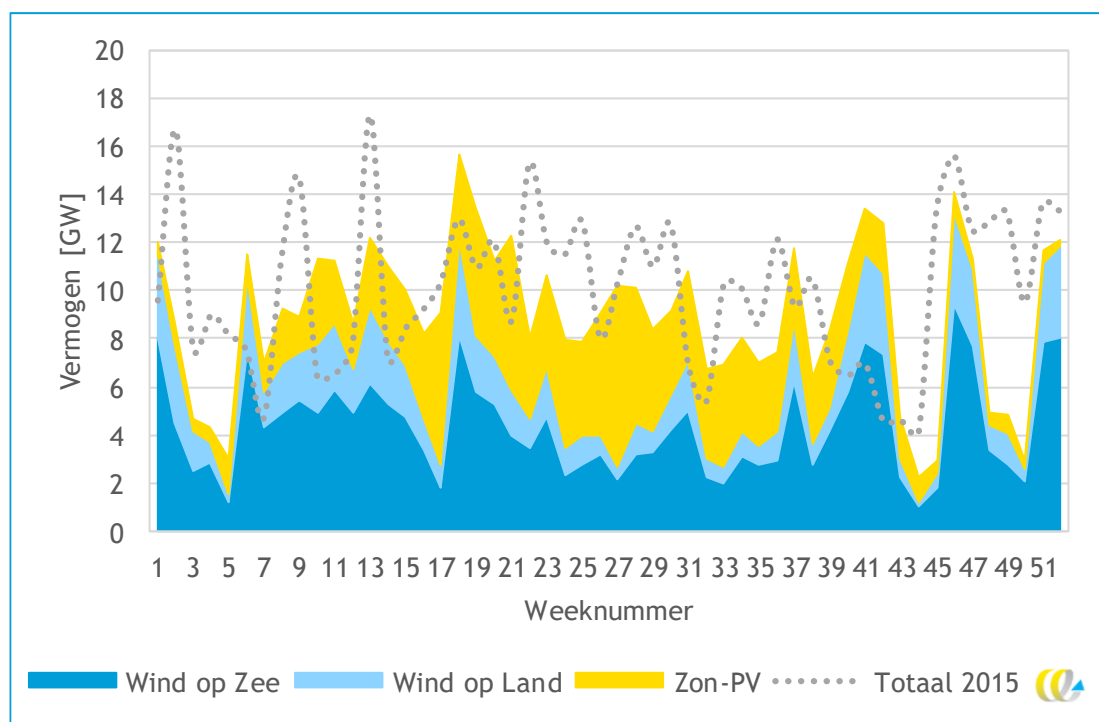
6.1.2 Extreem weerjaar - 1987

Als extreem jaar nemen we het weerjaar 1987. Het jaar werd door het Reformatorisch Dagblad in 1987 omschreven als “tamelijk koud, iets te nat en vrij somber” (Berg, 1987). Het jaar ging met een gemiddelde etmaaltemperatuur van $-2,7^{\circ}\text{C}$ in januari zeer koud van start. Ook februari en maart waren met gemiddelde temperaturen van $2,1^{\circ}\text{C}$ en $2,3^{\circ}\text{C}$ nog koud. April was warm, maar tot oktober was het wederom koel. Het najaar was zacht, waardoor de jaargemiddelde temperatuur op $8,9^{\circ}\text{C}$ kwam. Het aantal zonuren bedroeg 1.308 (Weerstatistieken, 2020).

De weekgemiddelde hernieuwbare elektriciteitsproductie voor klimaatjaar 1987 is weergegeven in Figuur 52. Het maximale vermogen uit hernieuwbare productie is 36,0 GW, het minimale vermogen 0 GW en het gemiddelde vermogen 9,0 GW. Hoewel er in 1987 beduidend minder energie geleverd werd door hernieuwbare bronnen, is het verschil met een goed weerjaar wellicht minder drastisch dan verwacht: de productie bedroeg 88,6 TWh in 2015 en 78,9 TWh in 1987, dat neerkomt op 11% minder.

Het Klimaatakkoord Plus-scenario levert op ieder moment een hoger vermogen, tot een maximum van 49,9 GW, maar heeft qua vorm een identiek profiel.

Figuur 52 - Weekgemiddelde productie van hernieuwbare opwek in het jaar 2030 uit PowerFlex met weerjaar 1987 voor het Klimaatakkoord-scenario. Ter vergelijking is de productie voor weerjaar 2015 in grijs opgenomen



6.2 Gezamenlijke volumes en patroon elektrificatie sectoren

De veranderingen als gevolg van elektrificatie worden bij het basisprofiel opgeteld bij toegenomen vraag en ervan afgetrokken bij afgenomen vraag.

Het basis vraagprofiel is een genormaliseerd profiel van 2017 gebaseerd op uurdata van ENTSO-E.²⁹ Voor de periode 2017-2030 is verondersteld dat de elektriciteitsvraag daalt overeenkomstig de algemene energiebesparing van 0,9% per jaar die in de KEV genoemd wordt. Hiermee komt het basisprofiel op een elektriciteitsvraag van 104 TWh/j. Ter herinnering, de totale elektriciteitsvraag in 2018 bedroeg 122 TWh/j.

Voor de additionele vraag ten gevolge van elektrificatie wordt voor iedere toepassing het specifieke vraagprofiel gebruikt zoals beschreven in de voorgaande hoofdstukken. De profielen zijn waar nodig aangepast aan de weersomstandigheden van het bestudeerde weerjaar.

Het totale vraagpatroon voor 2030 wordt verkregen door het potentieel van iedere toepassing te combineren en met het vraagprofiel van deze toepassing. Dit wordt vervolgens opgeteld bij het huidige vraagprofiel. Tabel 27 geeft de potentiële volumes weer van alle sectoren samen. De industrie heeft naar verwachting de grootste vraag, gevolgd door mobiliteit en datacenters.

Tabel 27 - Potentiële additionele elektriciteitsvraag in TWh/j per sector voor weerjaar 2015

TWh/jaar	Minimaal	Klimaatakkoord	Maximaal
Gebouwde Omgeving	3,9	5,2	5,7
Mobiliteit	1,9	6,9	12,3
Industrie	7,7	15,1	25,6
Glastuinbouw	-1,1	1,2	2,6
Datacenters	4,8	11,7	15,3
Feedstock industrie	1,0	3,4	7,3
Totaal t.g.v. elektrificatie	18	43	69
Basisvraag incl efficiëntie	104	104	104
Totale vraag	122	147	173
Extra t.o.v. 2018	+0,3	+26	+51
	+0,3%	+21%	+42%

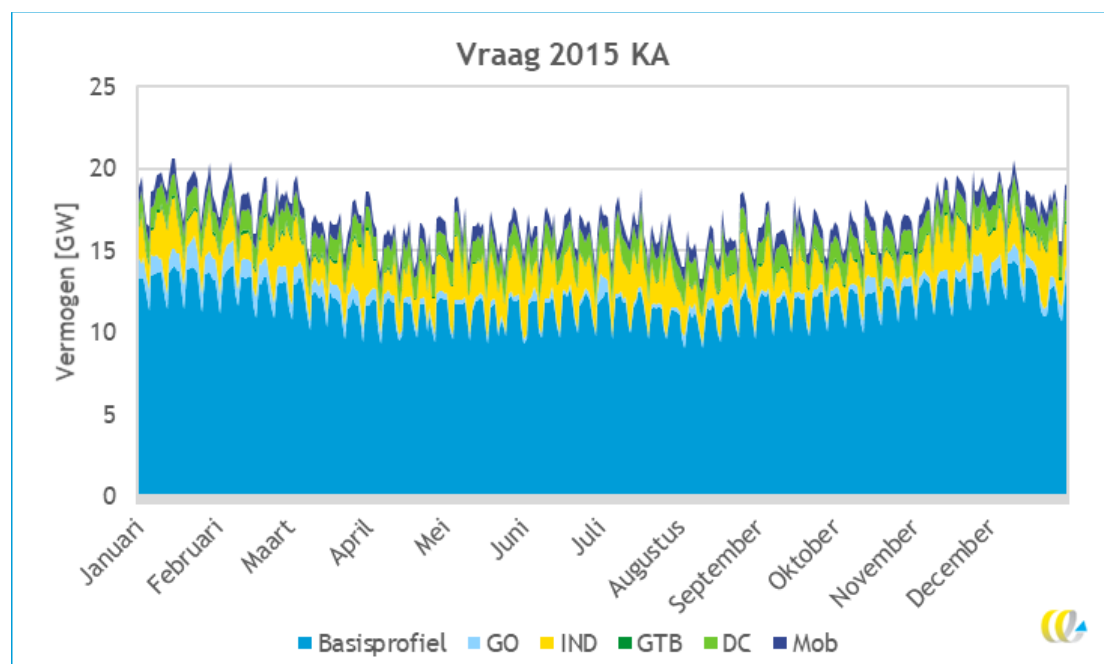
Hoewel de toename door extra elektrificatie fors is, wordt dit effect gedempt door afname van het basisprofiel door verbeteringen in efficiency. In het Klimaatakkoord-scenario neemt de netto vraag zo'n 21% toe, in het maximale scenario zo'n 42%.

²⁹ ENTSO-E Actual Total Hourly Load voor Nederland en het jaar 2017, verschoven naar de tijdas van 2015, waarop alle profielen zijn gebaseerd.

6.2.1 Vraagprofiel weerjaar 2015

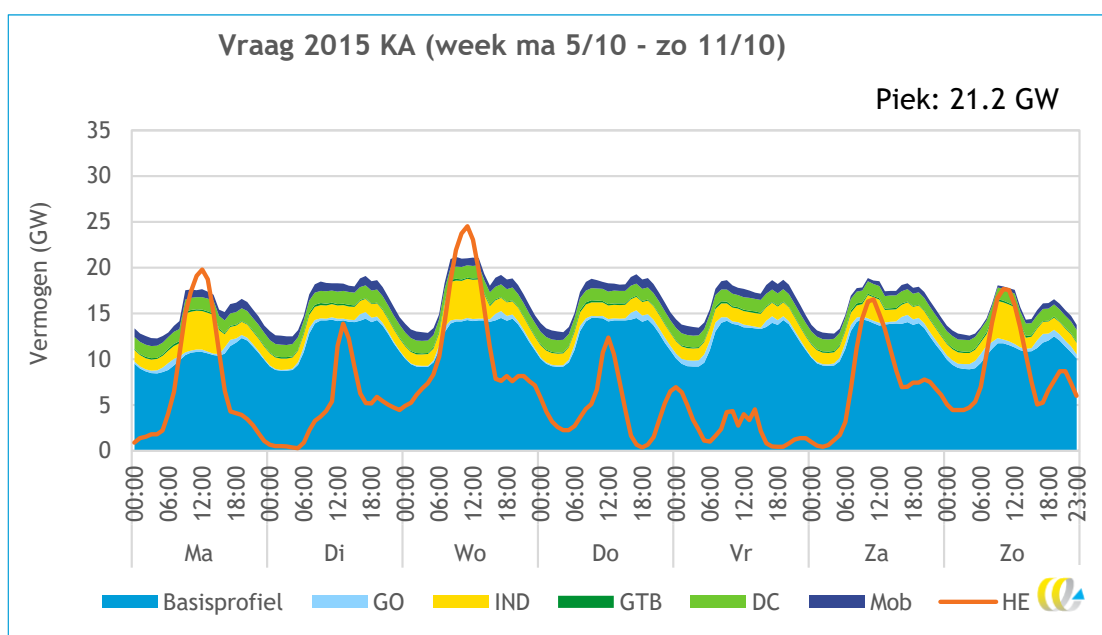
De gemiddelde elektriciteitsvraag bedraagt 147 TWh/j, ofwel gemiddeld 16,8 GW. De minimale vraag bedraagt 11,5 GW, de maximale vraag 24,2 GW. De verhouding tussen gemiddelde en piek is 1,44. Het daggemiddelde totale vraagprofiel is weergegeven in Figuur 53. Hierin is het verschil tussen week- en weekend goed te zien. Daarnaast komt de seizoensafhankelijkheid van het basisprofiel en de gebouwde omgeving duidelijk naar voren.

Figuur 53 - Totale daggemiddelde elektriciteitsvraag in 2030 voor weerjaar 2015



Ter illustratie staat in Figuur 54 het vraagprofiel weergegeven voor week 40, een gemiddelde week zonder extreem warm of koud weer. De vorm van het totale vraagprofiel komt redelijk overeen met de vorm van het basisprofiel met een voorspelbare variatie tussen ca. 12,5 GW in het dal en 21 GW op de piek. De hogere pieken in de industrie worden veroorzaakt door de inschakeling van elektrische boilers en elektrolyzers (ten gevolge van lage prijzen). In de grafiek komt duidelijk terug dat elektrificatie in het Klimaatakkoord-scenario 4 GW toevoegt in het dal ten opzichte van het basisprofiel van zo'n 8,5 GW, oftewel zo'n 45% extra. Op de piek is dit zo'n 6,5 GW (+45%) tegenover zo'n 14,5 GW van het basisprofiel. Elektrolyzers en elektrische boilers voegen 2,9 GW (+20%) toe aan de totale piekvraag.

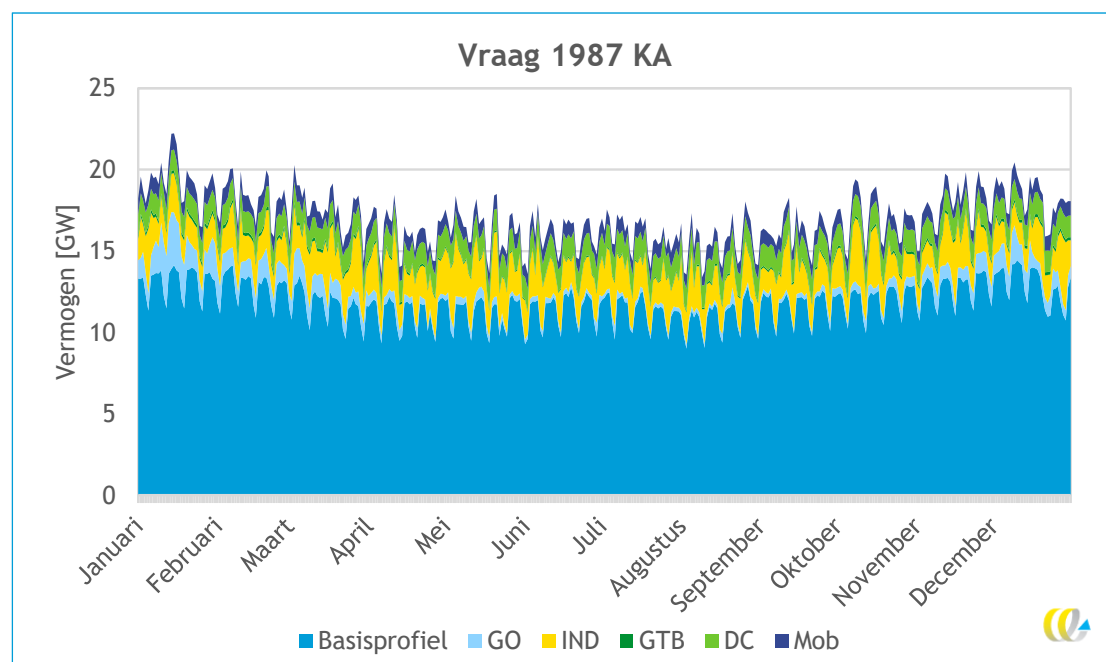
Figuur 54 - Totale elektriciteitsvraag in GW voor week 40 van 2030 met weerjaar 2015. De oranje lijn is de totale hernieuwbare opwek



6.2.2 Vraagprofiel weerjaar 1987

De gemiddelde elektriciteitsvraag bedraagt 149 TWh/j, ofwel gemiddeld 17,0 GW. De minimale vraag bedraagt 11,6 GW, de maximale vraag 25,8 GW. De verhouding tussen de maximale en de gemiddelde vraag is 1,52. Het totale daggemiddelde vraagprofiel is weergegeven in Figuur 55. De voornaamste oorzaak van het hogere elektriciteitsverbruik in 1987 ligt in de gebouwde omgeving, met 1,6 TWh extra vraag voor warmtepompen en warmtenetten dan in weerjaar 2015.

Figuur 55 - Totale daggemiddelde elektriciteitsvraag in 2030 voor weerjaar 1987



6.2.3 Vergelijking weerjaren 2015 en 1987

Uit de voorgaande bespreking blijkt dat de elektriciteitsvraag op jaarbasis voor de weerjaren 2015 en 1987 minder verschilt dan wellicht op basis van het verschillende weer te verwachten valt. Toch zijn de verschillen in sommige periodes erg groot, daarom zullen we nu focussen op het vraagprofiel en enkele interessante verschillen tussen de weerjaren uitlichten.

Week 1 - Extreme kou in weerjaar 1987

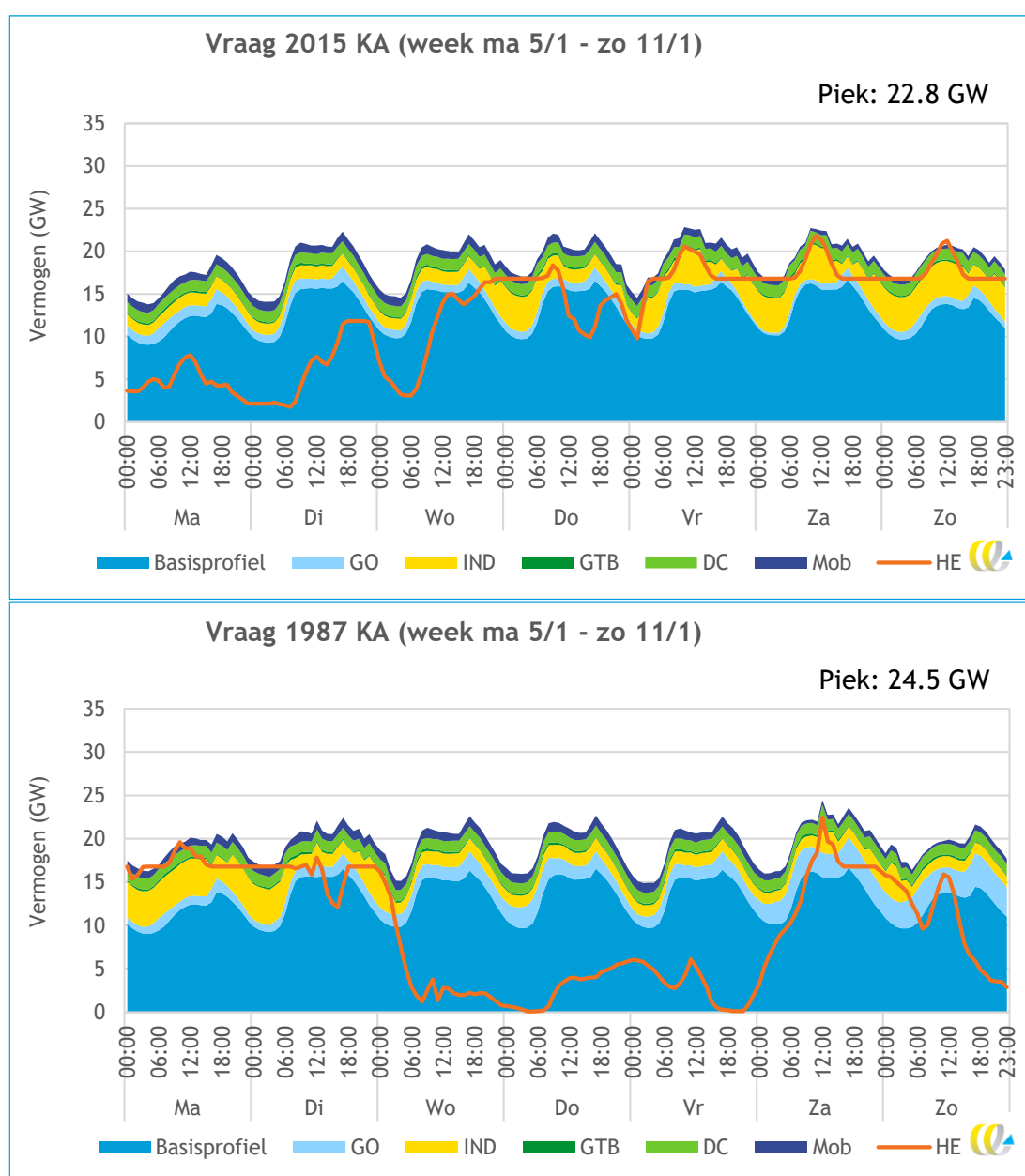
Om de invloed van extreme kou op de elektriciteitsvraag vanuit met name de gebouwde omgeving te bekijken, beschouwen we week 1 van zowel weerjaar 2015 als 1987, zie Figuur 56. Dit was in 1987 een erg koude week, in 2015 was de temperatuur meer gematigd. De week begon in 1987 redelijk warm, met 6°C gemiddeld op maandag 5 januari, maar vanaf woensdag lag de temperatuur gemiddeld onder nul, met zondag 11 januari als dieptepunt: -11,3°C gemiddeld. In 2015 was het warmer met een gemiddelde temperatuur van 2°C aan het begin van de week tot 10°C gemiddeld in het weekend. (Weerstatistieken, 2020). De extra vraag vanuit de gebouwde omgeving bedraagt op zondagochtend 11 januari zo'n 3,9 GW extra voor weerjaar 1987, voor weerjaar 2015 is dit slechts 1,5 GW. De vraag

vanuit het basisprofiel is op dat moment zo'n 11,2 GW, dus 35% extra vraag ten gevolge van warmtepompen is mogelijk.

De variatie in hernieuwbare opwek is ook goed zichtbaar. Zowel weerjaar 2015 als 1987 heeft in deze week een periode waarin het aanbod de vraag (bijna) dekt. Voor weerjaar 1987 is er echter een langere periode van geringe opbrengst uit hernieuwbare bronnen.

Tenslotte is de invloed van elektrische boilers en elektrolyzers goed zichtbaar, deze springen op duidelijk andere momenten aan; dit resulteert in 2,8 GW extra vraag voor de industrie.

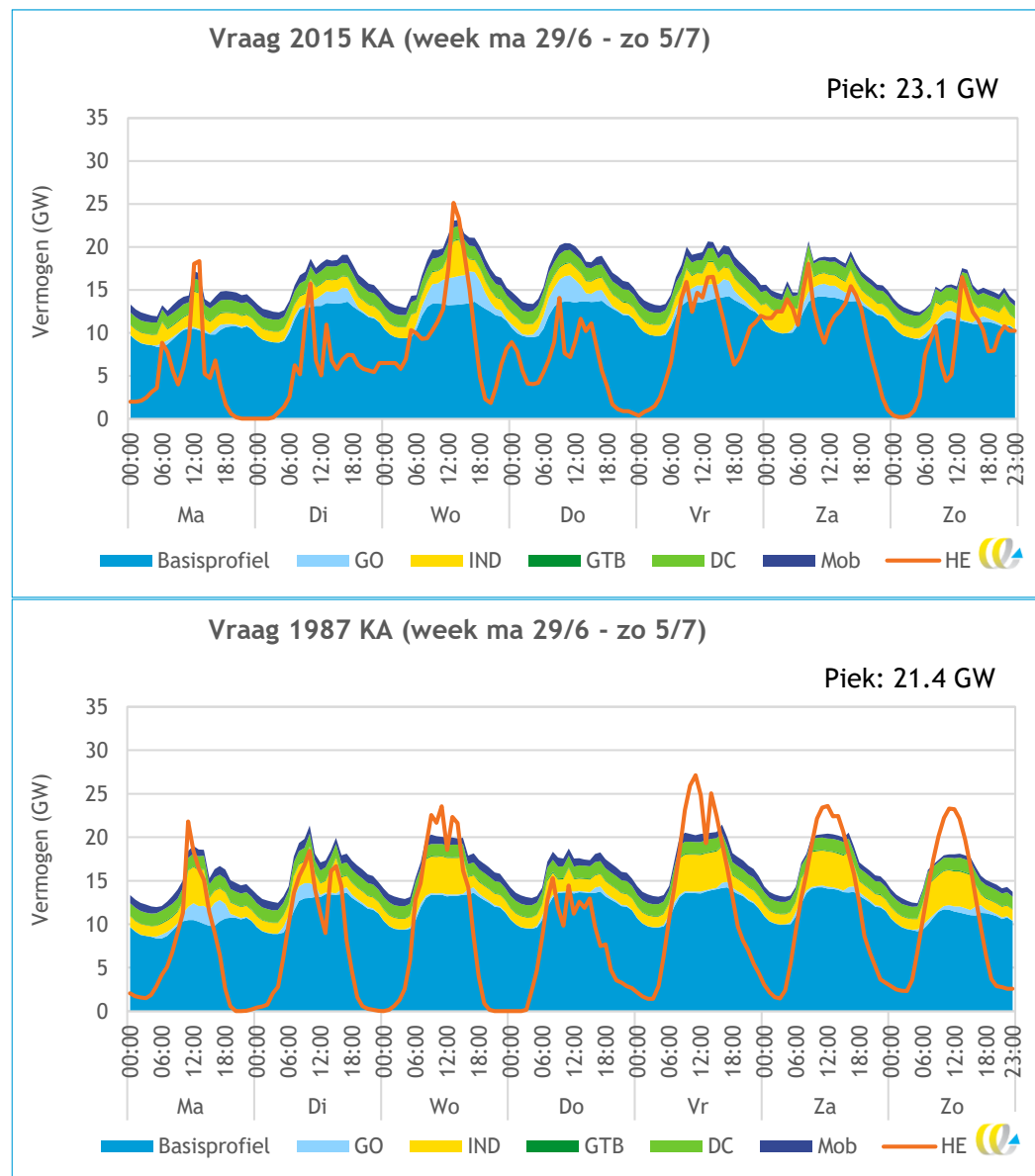
Figuur 56 - Totaal vraagprofiel in GW voor het Klimaatakkoord-vraagscenario voor week 1 van 2030 met weerjaar 2015 en 1987. De oranje lijn is de totale hernieuwbare opwek



Week 26 - Erg warm in 2015, koel in 1987

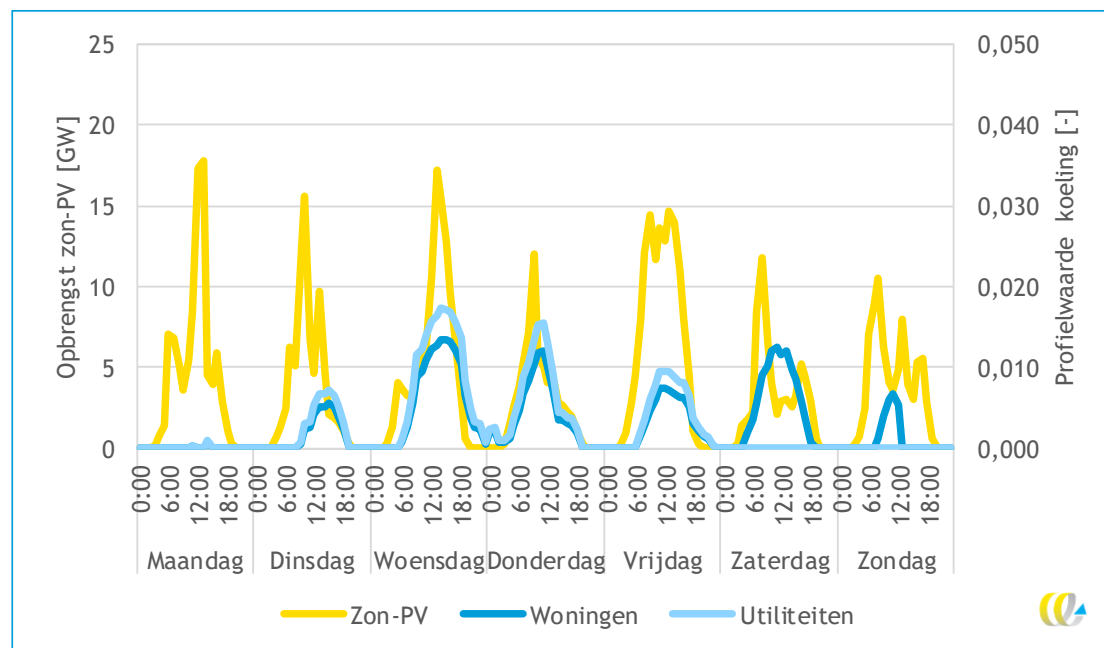
De invloed van hitte op de elektriciteitsvraag van de gebouwde omgeving valt goed te zien in week 26 van de beide klimaatjaren, zie Figuur 57. In 2015 was deze week erg heet, met maximumtemperaturen van 27-33°C van dinsdag t/m zondag. In 1987 waren maandag en dinsdag even warm als in 2015, maar de rest van de week was met 15-20°C beduidend koeler (Weerstatistieken, 2020). Deze verschillen zijn goed terug te vinden in de figuur. Woensdagmiddag is de elektriciteitsvraag vanuit de gebouwde omgeving maximaal zo'n 3,7 GW voor weerjaar 2015, tegenover slechts 0,6 GW voor 1987. De piekvraag door elektrificatie stijgt op dat moment van zo'n 13,5 GW voor het basisprofiel met 7 GW (+50%) naar 21 GW voor alle sectoren samen. De elektrische boilers zijn op dit moment niet ingeschakeld, maar kunnen nog 2,8 GW toevoegen.

Figuur 57 - Totaal vraagprofiel in GW voor het Klimaatakkoord vraagscenario voor week 26 van 2030 met weerjaar 2015 en 1987. De oranje lijn is de totale hernieuwbare opwek



Het valt te verwachten dat de koelvraag goed samenvalt met de opbrengst uit zon-pv. Voor week 26 van weerjaar 2015 hebben we deze correlatie gevisualiseerd, zie Figuur 58. De vraag uit koeling kent een hoge mate van gelijktijdigheid met de opbrengst uit zon-pv, al is de piek in koelvraag over het algemeen meer aan het eind van de middag, terwijl de opbrengst uit zon-pv iets na het middaguur piekt.

Figuur 58 - De opbrengst van zon-pv en de koudevraag vanuit de gebouwde omgeving in 2030 voor week 26 van weerjaar 2015



Het is te zien aan Figuur 54 en Figuur 56 dat de vraagpiek in de winter vrijwel gelijk is aan de vraagpiek in de zomer bij het Klimaatakkoord-scenario met weerjaar 2015. Momenteel zijn de vraagpieken hoger in de winter. Deze verschuiving wordt voornamelijk veroorzaakt door de flexibele inzet van de industrie op de momenten dat de productie van hernieuwbare bronnen groot is. Voor weerjaar 1987 is de piek in de winter aanmerkelijk groter door de grotere vraag van warmtepompen door de koude winter.

6.3 Overschotten en tekorten

In deze paragraaf kijken we hoe het aanbod van hernieuwbare elektriciteit overeenkomt met de elektriciteitsvraag. Dit doen we door een analyse van het residueel vermogen: het gedeelte van de vraag dat niet door zon of wind opgewekt wordt. Bij een positief residueel vermogen zijn er regelbare elektriciteitsopwekkers, import, vraagsturing of batterijen nodig om het tekort aan te vullen. Bij een negatief residueel vermogen overstijgt het aanbod de vraag en zijn er extra afnemers nodig zodat afschakeling ('curtailment') van hernieuwbare opwek voorkomen kan worden.

We bespreken achtereenvolgens de volgende scenario's:

- vraag en opwek volgens Klimaatakkoord-scenario, gemiddeld weerjaar;
- vraag en opwek volgens Klimaatakkoord-scenario, extreem weerjaar;

- vraag volgens maximaal potentieel elektrificatie, opwek volgens Klimaatakkoord Plus-scenario, gemiddeld weerjaar.

6.3.1 Statistieken

De overschotten en tekorten op jaarbasis worden het best weergegeven aan de hand van hun statistieken, zie Tabel 28. In het Klimaatakkoord-scenario is voor beide weerjaren sprake van iets meer dan 1000 uur aan overschotten van maximaal zo'n 20 GW. Het volume aan overschotten verschilt niet wezenlijk. Weerjaar 1987 heeft daarentegen wel zo'n 10 TWh extra tekorten, dat met name voortkomt uit de lagere productie van hernieuwbare bronnen. Daarnaast is het piekvermogen van de tekorten aanzienlijk hoger.

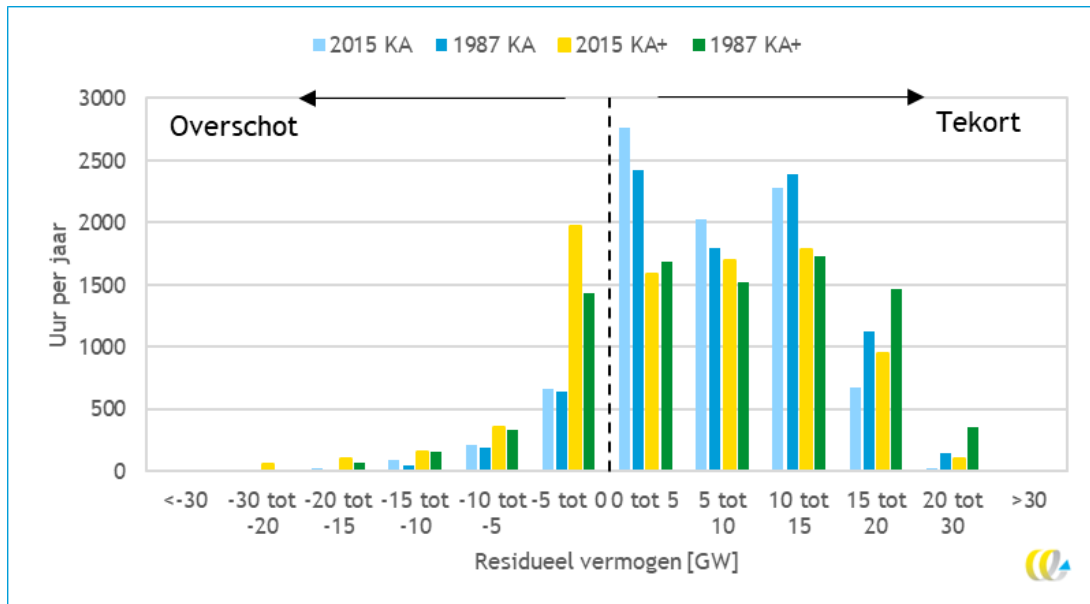
Het Klimaatakkoord Plus-scenario heeft zo'n 2.700 uur per jaar aan overschotten, qua volume 3-4 keer zoveel als in het Klimaatakkoord-scenario. De tekorten zijn met 58 TWh/j qua lager dan in het Klimaatakkoord-scenario en ook gedurende substantieel minder uren. Weerjaar 1987 heeft ook voor dit scenario een aanzienlijk hoger volume en een hogere piekvraag voor de tekorten. Het piekvermogen van de overschotten zijn voor beide weerjaren nagenoeg gelijk, maar het volume is kleiner bij weerjaar 1987 aangezien er minder uren in het jaar sprake is van overschotten.

Tabel 28 - Overzicht van tekorten en overschotten in de verschillende scenario's

		2015 KA	1987 KA	2015 KA+	1987 KA+
Totale vraag	TWh/j	147	149	173	174
Totale productie hernieuwbaar	TWh/j	89	79	127	113
Netto tekort	TWh/j	59	70	46	61
Hernieuwbare opwek	%	60%	53%	74%	65%
Overschotten	TWh/j	4,2	3,1	11,5	8,5
	h/j	985	883	2645	2.001
	GW max	20	19	30	29
Tekorten	TWh/j	63	73	57	70
	h/j	7.775	7.877	6.115	6.759
	GW max	22	24	24	27

De volumes van residueel vermogen vertellen niet het hele verhaal. In Figuur 59 is een histogram weergegeven van het residueel vermogen voor de drie scenario's. Voor alle scenario's treden tekorten groter dan 20 GW en overschotten groter dan 5 GW slechts enkele uren per jaar op. Uit de data blijkt verder dat periodes van overschot langer dan 24 uur nauwelijks voorkomen. Het beeld is duidelijk anders voor de Klimaatakkoord-scenario's en het Klimaatakkoord Plus-scenario. De Klimaatakkoord-scenario's hebben meer tekorten, met het grootste deel van 0 tot 15 GW. Het plusscenario heeft een bredere spreiding tussen een overschot van ≤ 5 GW tot een tekort van ≤ 15 GW. Het plusscenario heeft ook meerdere periodes van overschot langer dan 24 uur.

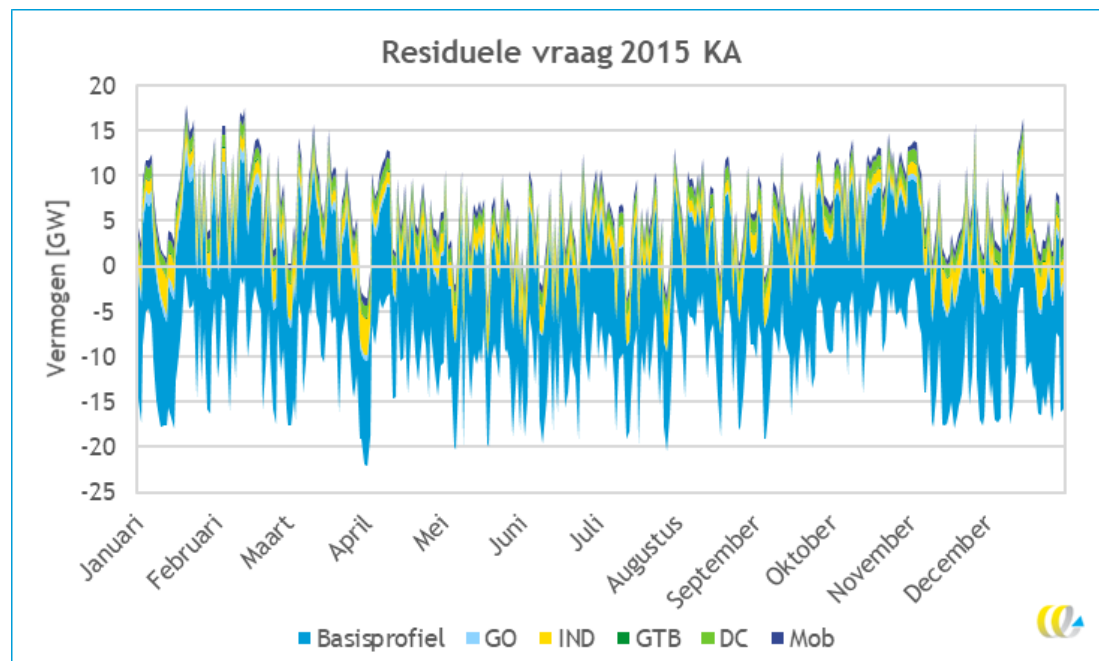
Figuur 59 - Histogram van het residueel vermogen voor 2030 voor verschillende scenario's/weerjaren



6.3.2 Verloop over het jaar

In Figuur 60 staat ter illustratie voor het Klimaatakkoord-scenario met weerjaar 2015 weergegeven hoe het residueel vermogen verloopt over het jaar. Het patroon is erg grillig. Deze variatie komt voornamelijk voort uit de hernieuwbare opwek en niet zozeer uit de vraag. De vraag heeft namelijk een vrij constant patroon met een duidelijke dag- en weekcyclus. Het vraagpatroon varieert vrij voorspelbaar tussen de 13 en 21 GW voor een gemiddelde week. Het patroon van de hernieuwbare opwek varieert veel sterker en heeft veel minder een vaste periodiciteit. Het verloop van overschotten en tekorten over het jaar wordt dus voornamelijk bepaald door de hernieuwbare opwek en slechts in beperkte mate door de vraag.

Figuur 60 - Daggemiddelde residueel vermogen voor het hele jaar in 2030, met weerjaar 2015, vraag en opwek volgens het Klimaatakkoord-scenario. De onderste lijn is de hernieuwbare opwek, daarbovenop wordt de vraag gestapeld. De bovenkant van de gekleurde band geeft het residueel vermogen weer. Positief is een tekort, negatief is een overschot



Het maximale tekort hangt met name af van de elektriciteitsvraag, aangezien ieder jaar wel één of meerdere momenten heeft dat er geen of nauwelijks productie is uit hernieuwbare bronnen. Voor het Klimaatakkoord-scenario met weerjaar 2015 zou dit neer komen op een maximaal tekort tussen de 18,5 en 24,3 GW, hetgeen goed overeenkomt met het daadwerkelijke maximale tekort van 21,9 GW in de modellering.

Het maximale overschot hangt daarentegen sterk af van het geïnstalleerde vermogen aan hernieuwbare opwek. Aangezien de zon alleen overdag schijnt, is het maximale overschot grofweg gelijk aan het geïnstalleerde vermogen aan zon en wind minus de gemiddelde vraag rond het middaguur. Voor het Klimaatakkoord-scenario met weerjaar 2015 bedraagt het totaal geïnstalleerde vermogen 37,6 GW, de gemiddelde vraag rond het middaguur is ca. 18 GW. Dit zou neer komen op een maximaal overschot van zo'n 19,6 GW, dat goed overeenkomt met het daadwerkelijke maximale overschot van 20,0 GW in de modellering.

6.4 Flexibiliteit

Door vraag en aanbod op elkaar af te stemmen, worden overschotten en tekorten geminimaliseerd. Het afstemmen van vraag en aanbod kan goedkoper zijn dan andere manieren om tekorten en overschotten op te vangen, zoals het inschakelen van regelbaar vermogen of curtailment van hernieuwbare opwek.

6.4.1 Vraag afstemmen op aanbod: flex scenario

Niet alle vraag naar elektriciteit is vast: in veel toepassingen kan de vraag enigszins in de tijd verschoven worden binnen een zekere bandbreedte. Het verschuiven van de vraag wordt ook wel vraagsturing of demand (side) response of demand side management

genoemd. Demand response leidt tot afvlakking van bestaande vraagpieken op ongewenste momenten, maar ook tot het creëren van nieuwe vraagpieken op (meer) gewenste momenten. Afhankelijk van de details van de uitvoering, kan de combinatie hiervan leiden tot zowel toename als afname van de netbelasting.

Vraagsturing heeft drie doelen:

1. De vraag naar regelbaar vermogen verlagen op momenten van productietekort door het elektriciteitsverbruik te verlagen.
2. De vraag naar opslag beperken door het elektriciteitsverbruik te verhogen op momenten van overschot.
3. Netverzwaring voorkomen door het afvlakken van vraagpieken op ongewenste momenten.

Het spreekt voor zich dat het alleen nuttig is om vraagsturing toe te passen waar dit resulteert in lagere systeemkosten.

Om vraagsturing van de grond te krijgen, moet aan een aantal randvoorwaarden worden voldaan:

- De gebruiker wordt niet te veel beperkt. Een huis moet bijvoorbeeld wel warm genoeg blijven en een auto moet wel een volle batterij hebben als de gebruiker op pad wil. De acceptatie kan verhoogd worden door een ‘override’ toe te voegen, die de gebruiker de mogelijkheid geeft om op ieder moment elektriciteit af te nemen.
- Vraagsturing moet een (financieel) voordeel voor de gebruiker met zich meebrengen.
- Vraagsturing moet goed geautomatiseerd zijn, zodat de gebruiker er zo min mogelijk van merkt.

We hebben een aantal belangrijke toepassingen geselecteerd en deze meegenomen in een ‘flex scenario’, dat een variant is op het Klimaatakkoord-scenario voor klimaatjaar 2015:

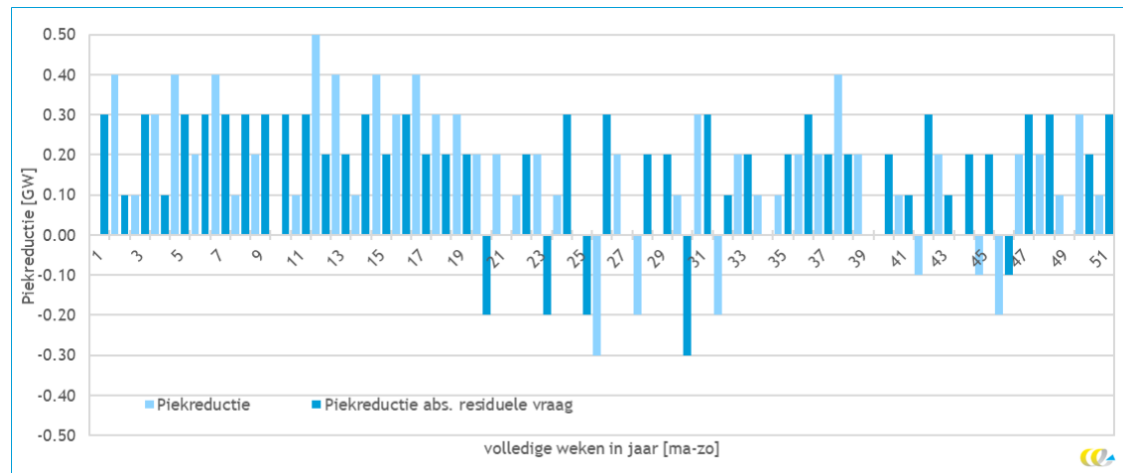
- Slim laden van elektrische personenauto’s die thuis laden en op het werk laden: deze voertuigen hebben een profiel dat verschoven is van de ochtendpiek richting de middag (in het geval van werkladen) en van de avondpiek naar de nacht (in het geval van thuisladen). De pieken zijn zo weggeschoven van de gebruikelijke ochtend- en avondpiek in de netbelasting, naar momenten waar de netbelasting gewoonlijk laag is.
- Slimme inzet van de full-electric-warmtepomp in woningen en utiliteiten: de pieken in de elektriciteitsvraag zijn afgevlakt door de invulling van de warmtevraag iets naar voren te schuiven.
- Elektrische boilers in de industrie: deze boilers zijn ook in de basisscenario’s al prijs-gestuurd en vertonen daarmee een grote correlatie met de residuele vraag (vraag minus hernieuwbare productie).

We hebben bekeken wat de effecten zijn van de flexprofielen voor deze toepassingen op het totale vraagprofiel en het residuele vraagprofiel voor Nederland in 2030 voor het klimaatjaar 2015 in het Klimaatakkoord-scenario. In het flexprofiel is voor de gebouwde omgeving en mobiliteit niet uitgegaan van sturing door real-time pricing. Dit is voor de gebouwde omgeving onderzocht in de werkgroep Flexibiliteit van warmte, eveneens in het kader van de TenneT E-TOP.

Zowel de piek in het vraagprofiel als de absolute piek in het residuele vraagprofiel (vraag minus aanbod van hernieuwbare energie) daalt gemiddeld over het jaar door slim laden van elektrische voertuigen en de slimme inzet van elektrische warmtepompen. Het gaat om een bescheiden reductie van 0,4 GW in de vraagpiek en 0,3 GW in de absolute piek van de

residuele vraag³⁰. Per week verschilt de reductie van piekvraag, er zijn bovendien ook weken waarop de piek juist toeneemt. Figuur 61 toont het beeld per week.

Figuur 61 - Piekreductie van het wekelijkse vraagprofiel en de absolute pieken van het residuele vraagprofiel



Opmerking: negatieve piekreductie betekent een verhoging van de piekvraag. Bij de absolute residuele vraag zijn zowel de verandering van de positieve als negatieve pieken meegenomen. De negatieve pieken ontstaan wanneer de vraag naar elektriciteit kleiner is dan hetgeen door niet-regelbare duurzame bronnen wordt geproduceerd.

In de weken met een negatieve piekreductie neemt de piekvraag toe. Dit is vaker het geval voor het vraagprofiel dan voor het residuele vraagprofiel.

De flexprofielen dragen over het jaar gezien bij aan een lichte reductie van de (residuele) piekvraag. Door een samenspel van flexopties en hernieuwbare productie resulteert het echter in sommige weken in een kleine stijging van de absolute waarde van de (residuele) piekvraag. Zo kan het bijvoorbeeld voorkomen dat door verschuiving van de laadpiek van elektrische voertuigen naar een moment waar gewoonlijk de netbelasting lager ligt, dit specifiek slecht uitpakt doordat de laadvraag daalt op een moment dat er veel productie is van hernieuwbare energie is. Dit komt omdat we voor elektrische voertuigen werken met een vaste verschuiving van de profielen naar uren die gemiddeld gezien een lagere netbelasting opleveren, voor warmtepompen werken we met een afgevlakt profiel. Wanneer deze flexopties echt slim en dynamisch gestuurd worden op de (forecasting van de) uurwaarden, zullen de pieken waarschijnlijk vaker en sterker gereduceerd kunnen worden.

6.4.2 Aanbod afstemmen op vraag: optimale mix zon en wind

Het aanbod kan in theorie beter passend gemaakt worden op de vraag (basisvraag plus elektrificatie, waarvan deels flexibel) door de verhouding tussen zon-pv, wind op land en wind op zee te variëren. De ‘optimale’ mix zou minder tekorten en minder overschotten kunnen hebben dan de mix in 2030 bij het uitvoeren van het Klimaatakkoord. We bekijken verschillende scenario’s om 38 TWh/j extra elektriciteit op te wekken, waarbij we ernaar streven om het totale volume aan overschotten en tekorten te minimaliseren. We beschouwen het ‘Klimaatakkoord Plus’-scenario (zoals omschreven in paragraaf 6.1) en

³⁰ Dit betreft de piekreductie van de piekwaarde in het jaarprofiel. Op weekbasis kan de piekreductie hoger of lager uitvallen, omdat er binnen een week een andere piekwaarde kan zijn.

scenario's die dezelfde hoeveelheid elektriciteit opwekken als het KA+-scenario, maar dan met respectievelijk 100% WoL, 100% WoZ, 100% Zon-pv, 50% WoL/50% WoZ³¹.

We beschouwen weerjaar 2015 en de vraag volgens het Klimaatakkoord Plus-scenario, aangezien de additionele hernieuwbare productie gepaard gaat met additionele elektrificatie aan de vraagzijde. De toename in hernieuwbare productie is groter dan de toename in de vraag; 38,3 TWh additionele productie ten opzichte van 26,4 TWh additionele vraag.

De overschotten en tekorten voor deze scenario's staan weergegeven in Tabel 29.

Ten opzichte van het Klimaatakkoord-scenario nemen de overschotten toe voor elke configuratie, dat betekent dat niet de volledige additionele productie gebruikt wordt om de additionele vraag door elektrificatie in te vullen. De overschotten nemen toe met 7-18TWh. De tekorten nemen bij enkele configuraties af en bij andere configuraties toe.

Het KA+-scenario en het scenario met 100% wind op zee scoren het best en zijn vrijwel identiek aan elkaar zowel qua volume overschotten als qua tekorten. De scenario's 50% WoL/50% WoZ, 100% WoL en 100% zon-pv leiden in de genoemde volgorde tot steeds hogere overschotten en een lagere reductie van tekorten. Deze uitkomst is eenvoudig te verklaren door het aantal vollasturen van de opwekkers, dat dezelfde rangschikking kent. Een hoger aantal vollasturen voor dezelfde elektriciteitsproductie betekent een vlakker profiel, waarbij een groter gedeelte van de opwek direct gebruikt wordt en een kleiner gedeelte tot een overschot leidt. Als de groei van de hernieuwbare productie niet gepaard gaat met additionele elektrificatie, en de vraag dus gelijk blijft, wordt slechts de helft van de additionele productie nuttig gebruikt.

Tabel 29 - Resultaten optimalisatie van extra aanbod aan de hand van de extra elektrificatie

	Zon-pv	Wind op Zee	Wind op Land	Productie HE	Vraag	Over-schotten	Tekorten	% directe benutting HE
	GW	GW	GW	TWh/j	TWh/j	TWh/j	TWh/j	
Klimaatakkoord	26,9	10,8	6	88,6	147,4	4,2	63,0	95%
Klimaatakkoord Plus	35,0 (+8,1)	16,2 (+5,4)	8,6 (+2,6)	126,9 (+38,3)	172,7 (+25,2)	11,5 (+7,3)	57,2 (-5,8)	91%
Extra 100% WoL	26,9	10,8	19,1 (+13,1)	126,9 (+38,3)	172,7 (+25,2)	17,1 (+12,9)	62,8 (-0,2)	87%
Extra 100% WoZ	26,9	19,7 (+8,9)	6	126,9 (+38,3)	172,7 (+25,2)	11,3 (+7,2)	57,0 (-6,0)	91%
Extra 100% Zon-pv	69,1 (+42,2)	10,8	6	126,9 (+38,3)	172,7 (+25,2)	22,6 (+18,5)	68,3 (+5,3)	82%
Extra 50% WoL, 50% WoZ	26,9	15,2 (+4,4)	12,5 (+6,5)	126,9 (+38,3)	172,7 (+25,2)	13,7 (+9,5)	59,4 (-3,6)	89%
Extra 83% WoZ, 17% zon-pv	34,0 (+7,2)	18,0 (+7,2)	6	126,9 (+38,3)	172,7 (+25,2)	10,5 (+6,3)	56,2 (-6,8)	92%
Extra 83% WoZ, 17% zon-pv (geen additionele vraag)	34,0 (+7,2)	18,0 (+7,2)	6	126,9 (+38,3)	147,4	23,2 (+19,1)	43,6 (-19,4)	82%

De tekorten en overschotten, zoals gegeven in Tabel 29, zijn niet gelijk verdeeld over het jaar. In de zomer is de hernieuwbare productie hoger en de vraag lager doordat de warmtevraag lager is ten opzichte van de winter. Hierdoor is er in de zomer vaker sprake van

³¹ Wind op land en wind op zee wekken allebei een gelijke hoeveelheid energie op, het opgesteld vermogen verschilt wel.

overschotten, zeker in combinatie met veel elektriciteit uit zon. In de winter zijn de tekorten groter. De totale overschotten en tekorten per maand zijn voor twee scenario's gegeven in Tabel 30.

Tabel 30 - Totaal overschot en tekort per maand voor Klimaatakkoord-scenario en Klimaatakkoord Plus-scenario (optimale mix hernieuwbaar)

	Klimaatakkoord		Klimaatakkoord Plus (optimale mix)	
	Totaal overschot	Totaal tekort	Totaal overschot	Totaal tekort
	TWh	TWh	TWh	TWh
Januari	0.0	6.1	0.4	5.1
Februari	0.0	6.7	0.3	6.2
Maart	0.4	5.4	1.0	5.0
April	0.5	5.2	1.0	5.0
Mei	1.0	4.1	1.9	3.8
Juni	1.0	4.3	1.8	4.0
Juli	0.6	4.3	1.4	3.9
Augustus	0.3	5.4	0.8	5.1
September	0.3	5.0	0.8	4.4
Oktober	0.0	8.0	0.1	7.9
November	0.1	4.2	0.7	3.0
December	0.0	4.2	0.5	2.8
Totaal	4.2	63.0	10.6	56.3

Een tweede factor die van invloed is op de optimale invulling van hernieuwbare productie, naast het aantal vollasturen, is het moment van opwek in relatie tot andere technieken. Een opwekker is in deze context van waarde als hij produceert op momenten dat de andere opwekkers dat niet doen. Zo kan een tekort op een bepaald moment gereduceerd worden zonder dat daar direct een overschot op een ander moment tegenover staat. Dit wordt beschreven door de correlatiecoëfficiënten³², zie Tabel 31. Uit de tabel blijkt dat wind op zee sterk positief gecorreleerd is met wind op land en licht negatief met zon. Wind op land is daarentegen licht positief gecorreleerd met zon. Dit komt erop neer dat wind op zee en wind op land vaak tegelijkertijd elektriciteit opwekken: als het waait op zee, dan ook vaak op land. Wind op land waait echter vaker op momenten dat zon-pv ook al elektriciteit opwekt: op warme dagen trekt bijvoorbeeld de wind 's middags vaak landinwaarts aan (zeewind).

Tabel 31 - Correlatiematrix voor de opwek uit zon-pv, Wind op Zee en Wind op Land voor klimaatjaar 2015

	Zon-pv	Wind op Zee	Wind op Land
Zon-pv	1		
Wind op Zee	-0,110	1	
Wind op Land	0,056	0,760	1

Daarnaast blijkt uit een uitgevoerde optimalisatie dat productie van wind op zee te allen tijde gunstiger is dan productie van wind op land, aangezien de correlatie tussen de twee technieken groot is maar wind op zee meer vollasturen heeft. Dit betekent dat een mix van

³² Er is gebruik gemaakt van correlatiecoëfficiënt van Pearson.

zon-pv en wind op zee optimaal is. Daarom hebben we een extra scenario doorgerekend met alleen extra capaciteit uit wind op zee en zon-pv. De optimale mix tussen de twee is bepaald waarbij het volume van de tekorten minimaal is, dat betekent dat zoveel mogelijk van de additionele productie gebruikt wordt voor de invulling van de additionele vraag. Er volgt uit de optimalisatie dat dit het geval is als 83% van de productie van wind op zee komt en 17% van zon-pv. Zoals in de onderste rij van Tabel 29 is weergegeven leidt dit scenario tot nog eens 0,9 TWh/j lagere overschotten en 0,9 TWh/j lagere tekorten dan het Klimaatakkoord Plus-scenario. Door de extra elektrificatie in combinatie met de extra HE-productie wordt van de extra HE-productie 77% direct toegepast en 23% worden extra overschotten. Van alle HE-productie is de directe benutting dan 92%. Deze analyse is een eerste schatting van wat optimaal is. Het statisch afstemmen van het nationale aanbod op de nationale vraag zoals we nu hebben gedaan is echter te beperkt, omdat de dimensies kosten, ruimte, de verbinding met andere landen en netcapaciteit missen in de discussie. Daarnaast levert het gelijktijdig minimaliseren van overschotten en tekorten niet per se een kostenoptimaal energiesysteem op. Een optimaal energiesysteem zorgt er immers voor dat op ieder moment de behoeften van de eindgebruiker vervuld worden tegen de laagste kosten. Hier kunnen nog randvoorwaarden aan zitten, zoals de eis dat elektriciteit zonder CO₂-uitstoot moet worden opgewekt, fysieke grenzen aan de hoeveelheid ruimte die beschikbaar is voor energieopwek en grenzen aan de snelheid waarmee investeringen zoals netverzwaring uitgevoerd kunnen worden. Overschotten en tekorten zijn niet erg zo lang ze tegen een acceptabele prijs opgevangen kunnen worden. Curtailment van opwekkers of afschakelen van gebruikers kan in sommige situaties ook de beste optie zijn.

Om een beter antwoord te geven op de vraag wat nu de optimale verhouding is tussen zon, wind op land en wind op zee is dan ook een (veel) uitgebreidere analyse noodzakelijk, die verder strekt dan wat binnen deze studie mogelijk is.

6.5 Conclusies

De additionele elektriciteitsvraag ten gevolge van elektrificatie is aanzienlijk: naar verwachting 43 TWh/j in 2030, met een bandbreedte van 18 TWh/j tot 69 TWh/j als waarschijnlijk minimum c.q. maximum. De totale elektriciteitsvraag komt naar verwachting uit tussen de 122 en 173 TWh. Om het maximale potentieel te ontsluiten, zullen meerdere barrières geslecht moeten worden:

- de prijs van fossiele energie ten opzichte van elektriciteit moet omhoog;
- de toepassingen moeten goedkoper worden;
- er moet voldoende netcapaciteit beschikbaar zijn; en
- de overheid moet regels aanpassen.

Het basisprofiel heeft een volume van 104 TWh/j. Het heeft een jaarpiek van zo'n 17,5 GW. Deze piekvraag wordt slechts sporadisch bereikt. Op een gemiddelde dag heeft het basisprofiel een vraag van zo'n 8,5 GW in het dal en 14,5 GW op de piek. Door elektrificatie wordt de jaarpiek verhoogd naar ruim 24 GW. De belangrijkste factor hierbij is de inzet van elektrische boilers en elektrolyzers. Op de momenten dat deze ingezet worden is de hernieuwbare productie ook hoog, waardoor de residuele vraag op dit moment laag is. De maximale piek van de residuele vraag, bijna 22 GW, wordt veroorzaakt door een combinatie van de winterpiek ten gevolge van elektrische warmtepompen en lage hernieuwbare productie.

De industrie en datacenters zijn met 15 en 12 TWh/j verantwoordelijk voor de grootste extra elektriciteitsvraag qua volume. Deze vraag is grotendeels continu en zorgt dus maar

voor beperkte extra pieken in de vraag. Mobiliteit heeft met 5,9 TWh/j ook een redelijke extra vraag. In tegenstelling tot wat vaak gedacht wordt, zorgt dit door de combinatie van verschillende voertuigtipes en vormen van laadgedrag op landelijk niveau niet voor grote pieken; lokaal kan dit wel zo zijn. De gemiddelde extra vraag is zo'n 670 MW. De gebouwde omgeving heeft met 5,2 TWh/j aan extra vraag ongeveer hetzelfde volume als mobiliteit, maar kan echter wél voor grote pieken zorgen, zoals geïllustreerd door de elektriciteitsvraag van warmtepompen bij extreme koude (+3,8 GW) en airconditioning bij hitte (+3,2 GW). De toepassing van hybride elektrische boilers en elektrolyzers in de industrie zorgt weliswaar voor pieken in het elektriciteitsverbruik (+3 GW), maar dit gebeurt op momenten van lage prijs, dus wanneer er voldoende aanbod is. Dit helpt juist om overschotten te benutten.

Doordat elektrificatie vooral de basisvraag verhoogt, helpt het bij de inpassing van meer elektriciteit uit zon en wind in het systeem. Enkel elektrificatie is echter niet genoeg. Uiteindelijk moet de jaarlijkse energievraag gedekt worden door hernieuwbare bronnen. Prioriteit bij elektrificatie die naadloos past op de productiepatronen van zon of wind (zoals gebouwkoeling), of flexibele vraag (zoals laden van EV, hybride warmtepompen en hybride boilers), kan zorgen voor verlaging van de CO₂-emissie met de laagste kosten. Omdat de meeste toepassingen voor elektrificatie echter meer vollasturen hebben dan zon en wind, is een hoger opgesteld vermogen aan zon en wind nodig dan de maximale elektriciteitsvraag. Dit creëert inherent overschotten, waarvan de hoogte samenhangt met het opgesteld vermogen uit hernieuwbare bronnen en de gemiddelde elektriciteitsvraag. Andersom is er altijd wel een moment in het jaar dat de opbrengst van zowel zon als wind nihil is en blijft regelbaar vermogen nodig. De hoeveelheid regelbaar vermogen hangt voornamelijk af van de elektriciteitsvraag. Het regelbaar vermogen kan ingevuld worden door regelbare centrales, maar ook door import, batterijen, opslagsystemen of vraagsturing.

Voor veel toepassingen gaat elektrificatie gepaard met een aanzienlijke winst in efficiency, met name elektrische voertuigen en warmtepompen zijn veel efficiënter dan de fossiele toepassing die ze vervangen. Elektrificatie is dan ook een nuttig middel om de nationale CO₂-uitstoot naar beneden te brengen. Dit zal echter niet vanzelf gaan. In de mobiliteitssector is weliswaar een trend zichtbaar richting meer elektrische voertuigen (door prijsbeleid en kostprijsverlagingen), voor de gebouwde omgeving en de industrie is dit een ander verhaal. Aardgas (inclusief heffingen en belastingen) is vooralsnog (veel) goedkoper dan elektriciteit om elektrificatie in deze sectoren rendabel te maken. In de gebouwde omgeving en de industrie is een kleine autonome trend zichtbaar, die naar voren komt in het scenario 'Minimaal'. Het grootste deel van het potentieel is echter pas te ontsluiten als er (prijs)beleid komt om het gat tussen fossiele brandstoffen en elektriciteit te dichten. Voor de industrie zal de CO₂-prijs daarvoor nog fors moeten stijgen en zal de invloed van de lage aardgasprijs nog enige tijd merkbaar blijven. Voor de gebouwde omgeving is er nog geen structureel instrument voor handen om het prijsverschil te dichten; met subsidies wordt dit nu ad hoc gedaan, maar de budgetten zijn onvoldoende voor de gehele energietransitie. Als de kosten van elektrificatie verder dalen en er structureel beleid komt (CO₂-prijs en regulering), kan de vraag naar elektrificatie snel toenemen en zal het een uitdaging zijn om de benodigde infrastructuur op tijd gerealiseerd te krijgen. Laadinfrastructuur voor elektrische voertuigen, laagspanningsnetten in woonwijken en de midden- en hoogspanningsnetten voor de industrie en datacenters zullen allemaal voorbereid moeten zijn op de snel toenemende vraag. Met het juiste beleid kan de businesscase en daarmee de elektriciteitsvraag veel sneller veranderen dan veranderingen in de infrastructuur doorgevoerd kunnen worden. Het is dan ook zaak om vooruit te denken. Dit houdt in dat er strategisch vooruit geïnvesteerd moet worden in laadinfrastructuur en netverzwaring.

Het is niet de vraag óf elektrificatie plaats gaat vinden, maar wanneer en in hoeverre de vraag maximaal aansluit op het productieprofiel van zon/wind.

Literatuur

Acton, M., Bertoldi, P. & Booth, J., 2020. *2020 Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency*, Ispra, Italy: European Commission.

AD, 2019. *Verplicht elektrisch rijden in 2030, is dat wel te betalen?*. [Online]
Available at: <https://www.ad.nl/auto/verplicht-elektrisch-rijden-in-2030-is-dat-wel-te-betalen-a10f54cf/>
[Geopend 20 5 2020].

Alshehri, F. et al., 2019. Modelling and evaluation of PEM hydrogen technologies for frequency ancillary services in future multi-energy sustainable power systems. *Heliyon*, 5(e01396).

ANWB, 2019. *Deze invloed heeft het weer op de actieradius*. [Online]
Available at: <https://www.anwb.nl/auto/elektrisch-rijden/waarom-het-weer-van-invloed-is-op-je-actieradius>
[Geopend 20 06 2020].

APPM, CE Delft, 2018. *Slim laden must have bij groei elektrisch vervoer*, 's Hertogenbosch: Enpuls.

AUAS, 2020. *Simulaad project: Nationaal laadprofiel elektrisch vervoer*, Amsterdam: Amsterdam University of Applied Sciences (AUAS).

Aziz & Oda, 2017. Simultaneous quick-charging system for electric vehicle. *Energy Procedia*, Issue 142, pp. 1811-1816.

Battery University, 2019. *BU-502: Discharging at High and Low Temperatures*. [Online]
Available at:
https://batteryuniversity.com/learn/article/discharging_at_high_and_low_temperatures
[Geopend 20 06 2020].

Berenschot en Kalavasta, 2020. *Klimaatneutrale energiescenario's 2050 : Scenariostudie ten behoeve van de integrale infrastructuurverkenning 2030-2050*, Utrecht: Berenschot Groep B.V.

Berenschot et. al., 2017. *Electrification in the Dutch process industry*, Utrecht: Berenschot.

Berg, R. v. d., 1987. Het jaar 1987 ging tamelijk koud, iets te nat en vrij somber voorbij. *Reformatorisch Dagblad*, 30 12, p. 35.

Bhaskar, A., Assadi, M. & Somehsaraei, H. N., 2020. *Decarbonization of the Iron and Steel Industry with Direct Reduction of Iron Ore with Green Hydrogen*, Basel, Switzerland: MDPI.

BNR, 2019. *"Compleet elektrische binnenvaartschip wordt de toekomst"*. [Online]
Available at: <https://www.bnr.nl/nieuws/duurzaamheid/10369505/compleet-elektrische-binnenvaartschip-wordt-de-toekomst>
[Geopend 12 5 2020].

Boerderij, 2019. *100% elektrische trekker van Rigitrac*. [Online]
Available at: <https://www.boerderij.nl/Mechanisatie/Nieuws/2019/1/100-elektrische-trekker-van-Rigitrac-378842E/>
[Geopend 11 5 2020].



Boerderij, 2020. 'John Deere is de Tesla van de landbouw'. [Online]
Available at: <https://www.boerderij.nl/Mechanisatie/Achtergrond/2020/1/John-Deere-is-de-Tesla-van-de-landbouw-527358E/>
[Geopend 11 5 2020].

BOVAG ; RAI, 2020. *Kerncijfers Tweewielers 2020*. [Online]
Available at:
<https://www.bovag.nl/BovagWebsite/media/BovagMediaFiles/Cijfers/2020/Kerncijfers-Tweewieler-2020-DEF.pdf?ext=.pdf>
[Geopend 2020].

CBS, 2019. *Statline: Verkeersprestaties personenauto's; kilometers, brandstofsoort, grondgebied*. [Online]
Available at: <https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/80428ned/table>
[Geopend 2020].

CBS, 2020a. *Aardolieproductenbalans; aanbod, verbruik en voorraad*. [Online]
Available at:
<https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/83403NED/table?ts=1588663889094>
[Geopend 5 5 2020].

CBS, 2020b. *Statline: Energiebalans; aanbod en verbruik, sector*. [Online]
Available at:
<https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/83989NED/table?ts=1586249681798>
[Geopend 06 04 2020].

CBS, 2020c. *Statline: Hernieuwbare elektriciteit; productie en vermogen*. [Online]
Available at: <https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/82610NED/table>
[Geopend 18 6 2020].

CBS, 2020d. *Bedrijfsvoertuigen; voertuigkenmerken, regio's, 1 januari*. [Online]
Available at:
<https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/71407ned/table?defaultview&dl=8068>
[Geopend 2020].

CBS, 2020e. *Statline: Warmtepompen; aantallen, thermisch vermogen en energiestromen*. [Online]
Available at: <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/82380NED/table>
[Geopend 2020].

CE Delft, Nuon, Gasunie, 2018. *Waterstofroutes Nederland - Blauw, groen en import*, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2015. *Potential for Power-to-Heat in the Netherlands*, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2016a. *Het PowerFlex-Model : Modelleren van flexibiliteit op spot- en onbalansmarkt*, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2016b. *Peakshaving van zon-pv met de elektrische boiler*, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2017. *Kosteneffectiviteit van maatregelen voor CO₂-reductie in Nederland*, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2018. *Warmtetechnieken.nl*, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2019a. *Hybride warmtenetten - Kansen voor Den Haag*, Delft, Nederland: CE Delft.

CE Delft, 2019b. *Laadinfrastructuur voor elektrische voertuigen in stadslogistiek*, Delft: CE Delft.

- CE Delft, 2019c. *Slim laden must have bij groei elektrisch vervoer*, Delft: CE Delft.
- CE Delft, 2019d. *Restwarmte, de stand van zaken*, Delft, Nederland: CE Delft.
- CE Delft, 2019e. *Functioneel ontwerp Vesta 4.0*, Delft: CE Delft.
- CE Delft, 2020. *Verkenning ontwikkeling CO2-vrije flexibele energietechnieken*, Delft, Nederland: CE Delft.
- Commissie MER, 2015. *Aanvraag revisievergunning ExxonMobil Botlek*. [Online]
Available at: <http://www.commissiemer.nl/docs/mer/p29/p2964/2964-029vergunningaanvraag-wabo-ww.pdf>
[Geopend 5 5 2020].
- CONCAWE, 2018. *Refinery Sites in Europe*. [Online]
Available at: [Aardolieproductenbalans; aanbod, verbruik en voorraad](#)
[Geopend 5 5 2020].
- CPB, 2019. *Effecten van een belasting op luchtvervuiling in drie sectoren*, Den Haag: Centraal Planbureau.
- De Ingenieur, 2019. *Binnenvaart op stroom*. [Online]
Available at: <https://www.deingenieur.nl/artikel/binnenvaart-op-stroom>
[Geopend 12 5 2020].
- de Zwart, F., Vanthoor, B. & Koreneef, S., 2019. *Tuinbouw zonder fossiele energie*, Wageningen, Nederland: Wageningen University & Research.
- DECHEMA, 2018. *Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry*, Frankfurt: DECHEMA.
- Develder et al, 2016. Quantifying flexibility in EV charging as DR potential: Analysis of two real-world data sets. *2016 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, 2016(Sydney, Australië), pp. 600-605.
- DNV-GL, 2018a. *CO2 reductie roadmap van de Nederlandse raffinaderijen*, Arnhem, The Netherlands: DNV-GL.
- DNV-GL, 2018b. *Electrification of industry - Facilitating the integration of offshore wind with Power-to-Heat in industry*, Arnhem: DNV-GL.
- DNV-GL, 2020. *Taskforce Infrastructuur Klimaatakkoord Industrie : Meerjarenprogramma Infrastructuur Energie en Klimaat 0.1*, Arnhem: DNV-GL.
- Dutch Datacenter Association, 2019. *2019 Report - Datacenter Restwarmte & Innovaties*, Amsterdam: Dutch Datacenter Association.
- Dutch Datacenter Association, 2020. *State of the Dutch Data Centers 2020*, Amsterdam: Dutch Datacenter Association.
- Duurzaambo, 2018. *Warmtepomp*. [Online]
Available at: <https://www.duurzaambo.nl/warmtepomp>
[Geopend 2020].
- EC, 2011. *Guidance Document n°9 on the harmonized free allocation methodology for the EU-ETS post 2012 - Sector-specific guidance*, Brussels: European Commission.
- EC, 2019. *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions : The European Green Deal , COM(2019) 640 final*, Brussels: European Commission (EC).



- ECN, 1999. *Warmte - en Koudevraagpatronen in de UtiliteitsBouw*, Petten: ECN.
- Ecofys ; ECN, 2015. *De systeemkosten van warmte voor woningen : Hoe beïnvloeden technologiekeuzes in woningen de toekomstige kosten van het energiesysteem?*, Utrecht: ECOFYS Netherlands B.V.
- Ecofys ; Greenvis, 2016. *Collectieve warmte naar lage temperatuur : Een verkenning van mogelijkheden en routes*, Utrecht: ECOFYS Netherlands B.V..
- Ecofys, 2014. *Waarde van slimme netten : Welke waarde creëren slimme oplossingen in het distributienetwerk?*, Utrecht: ECOFYS Netherlands B.V.
- EIB, Metabolic en SGS Search, 2020. *Materiaalstromen, milieu-impact en energieverbruik in de woning- en utiliteitsbouw - Uitgangssituatie en doorkijk naar 2030*, s.l.: s.n.
- ELaad, 2020b. *Volgeladen naar zero-emissie stadslogistiek : de ontwikkeling van elektrische trucks voor stadslogistiek in Nederland t/m 2035*. [Online]
Available at: https://www.elaad.nl/uploads/files/ElaadNL_Outlook_E-trucks_stadslogistiek.pdf
[Geopend 2020].
- ELaadnl, 2019a. *Naar 100% Z.E. in het OV, De ontwikkeling van elektrische bussen en hun laadlocaties in Nederland tot en met 2035 : Outlook Q3-2019*, Arnhem: ELaadnl.
- ELaadnl, 2019b. *Waar rijden én laden EV's in de toekomst? : De ontwikkeling van elektrische voertuigen en laadpunten in Nederland t/m 2035*, Arnhem: ELaadnl.
- ELaadnl, 2019c. *V2G: the Power Recycling Car*. [Online]
Available at: <https://www.elaad.nl/projects/v2g-the-power-recycling-car/>
[Geopend 20 06 2020].
- ELaadnl, 2020. *Elektrisch op bestelling - De ontwikkeling van elektrische bestelvoertuigen in Nederland t/m 2035*, Arnhem: ELaadnl.
- Eneco, n.d. *Elektrodeboiler warmtekrachtcentrale Ypenburg*. [Online]
Available at: <https://www.eneco.nl/over-ons/wat-we-doen/in-de-praktijk/elektrodeboiler-wkc-ypenburg/>
[Accessed 15 Juli 2020].
- EU, 2019. Commission Regulation (EU) 2019/424 of 15 March 2019 laying down ecodesign requirements for servers and data storage products pursuant to Directive 2009/125/EC of the European Parliament [...]Council and amending Commission Regulation (EU) No 617/2013. *Official Journal of the European Union*, L74(18.3.2019), pp. 46-66.
- EVConsult ; ZEnMo, 2019. *e-Trucks in Rotterdamse haven*, Rotterdam: Havenbedrijf Rotterdam.
- EV-database, 2020. *Renault Kanfoo Maxi ZE 33*. [Online]
Available at: <https://ev-database.nl/auto/1101/Renault-Kangoo-Maxi-ZE-33>
[Geopend 20 06 2020].
- FCH, 2017. *Study on Early Businesscases for H2 in Energy Storage*, Brussel: Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking.
- Geelen, C. & Braber, K., [2013]. *Prestaties WKO in de glastuinbouw*. [Online]
Available at:
https://www.kasalsenergiebron.nl/content/docs/WKO/WKO_in_de_glastuinbouw_presentatie_v8_internet.pdf
[Geopend 12 5 2020].

- Greenhome, sd *Koelen met warmtepomp*. [Online]
Available at: <https://kennis.greenhome.nl/warmtepomp/koelen-met-warmtepomp/>
[Geopend 2020].
- H-vision, 2019. *Blue hydrogen as accelerator and pioneer for energy transition in the industry*, Rotterdam, The Netherlands: H-vision.
- ICF, Fraunhofer, 2019. *Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonisation of Industry. Part 1: Technology Analysis*, London, United Kingdom: ICF Consulting Services Limited.
- IF Technology, 2019. *Kengetallen Aquathermie*, s.l.: s.n.
- ING, 2019. *Further efficiency gains vital to limit electricity use of data*, Amsterdam: ING Economisch Bureau.
- ISSO Kennisbank, 2020. *Energievademeccum: energiebewust ontwerpen van nieuwbouwwoningen*, Rotterdam: ISSO.
- KiM, 2018. *Fietsfeiten*. [Online]
Available at: <https://www.kimnet.nl/publicaties/brochures/2018/03/16/fietsfeiten>
[Geopend 2020].
- Klimaatakkoord, 2019. *MMIP7: Een CO2-vrij industrieel warmtesysteem*, Den Haag, Nederland: Klimaatakkoord.
- Klimaatmonitor, 2019. *Klimaatmonitor*. [Online]
Available at: https://klimaatmonitor.databank.nl/Jive?workspace_guid=9799bbf5-d3d3-4aaf-ba54-93307b789b94
[Geopend November 2019].
- KNMI, 2016. *Jaar 2015*. [Online]
Available at: <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/maand-en-seizoensoverzichten/2015/jaar>
[Geopend 6 18 2020].
- Kuijers et al., 2019. *Analysekaarten NP RES - versie 2.0*, s.l.: s.n.
- KWA, sd *Graaddagen en koeldagen*. [Online]
Available at: <https://www.kwa.nl/diensten/graaddagen-en-koeldagen>
[Geopend 2020].
- Logistiek, 2019. *Duurzaamheid: het nieuwste wapen voor de binnenvaart*. [Online]
Available at: <https://www.logistiek.nl/distributie/nieuws/2019/10/duurzaamheid-het-nieuwste-wapen-voor-de-binnenvaart-101169741>
[Geopend 12 5 2020].
- Methanol institute, 2020. *Methanol production*. [Online]
Available at: <https://www.methanol.org/methanol-production/>
[Geopend 4 5 2020].
- Milieucentraal, sd *Energie besparen inductie kookplaat*. [Online]
Available at: <https://www.milieucentraal.nl/energie-besparen/apparaten-en-verlichting/huishoudelijke-apparaten/inductie-kookplaat/>
[Geopend 2020].
- Milieucentraal, sd *Energiezuinig koelen: airco en ventilatoren*. [Online]
Available at: <https://www.milieucentraal.nl/energie-besparen/energiezuinig-huis/energiezuinig-koelen/airco-en-ventilatoren/>
[Geopend Juni 2020].



- Milieucentraal, n.d. *Hybride warmtepomp*. [Online]
Available at: <https://www.milieucentraal.nl/energie-besparen/energiezuinig-huis/energiezuinig-verwarmen-en-warm-water/hybride-warmtepomp/>
[Accessed 2020].
- Ministerie van EZK, 2014. *Meerjarenafspraak Energietransitie Glastuinbouw 2014-2020*, Den Haag: Ministerie van Economische Zaken en Klimaat.
- Movaris, 2013. *Laadstrategie Elektrisch Wegvervoer*, Utrecht: Movaris.
- Natuur & milieu, 2019a. *Gasmonitor 2019 : Marktcijfers warmtetechnieken*, Utrecht: Natuur & Milieu.
- Natuur & Milieu, 2019b. *Belemmeringen bij de inzet van elektrische mobiele werktuigen*, Utrecht: Natuur & Milieu.
- NEa, 2019. *Emissiecijfers 2013-2018*. [Online]
Available at:
<https://www.emissieautoriteit.nl/documenten/publicatie/2019/04/04/emissiecijfers-2013-2018>
[Geopend 5 5 2020].
- Nederland elektrisch, 2019. *V2G (vehicle-to-grid)*. [Online]
Available at: <https://nederlandelektrisch.nl/technologie/opladen/v2g-vehicle-to-grid>
[Geopend 20 06 2020].
- Nieuwe Oogst, 2018. *Boer stapt niet zomaar over op elektrische trekker*. [Online]
Available at: <https://www.nieuweoogst.nl/nieuws/2018/05/09/boer-stapt-niet-zomaar-over-op-elektrische-trekker>
[Geopend 11 5 2020].
- Nieuwsblad Transport, 2020. *TNO: 'Naast zero-emissie schepen is nog veel winst te behalen'*. [Online]
Available at: <https://www.nieuwsbladtransport.nl/binnenvaart/2020/02/12/tno-naast-zero-emissie-schepen-is-nog-veel-winst-te-behalen/?gdpr=accept>
[Geopend 12 5 2020].
- Nuon, Stedin, OCI-Nitrogen, CE Delft, Proton Ventures, TU Delft, TU Twente, AkzoNobel. ECN, ISPT, 2017. *Power to Ammonia : Energy and electricity prices scenarios 2020-2023-2030*, Amersfoort: ISPT.
- OCI Nitrogen, 2017. *Praktische uitdagingen bij transitie energie-intensief bedrijf*. [Online]
Available at: <http://www.industrieco2neutraal.nl/wp-content/uploads/2017/03/OCI-Nitrogen.pdf>
[Geopend 5 5 2020].
- PAW, 2018-. *Programma Aardgasvrije Wijken (PAW) : Huidige proeftuinen*. [Online]
Available at:
<https://www.aardgasvrijewijken.nl/proeftuinen/huidigeproeftuinen/default.aspx>
[Geopend 2020].
- PBL, 2019a. *Conceptadvies SDE++ 2020 - Geothermie*, Den Haag, Nederland: Planbureau voor de Leefomgeving.
- PBL, 2019b. *Klimaat- en Energieverkenning (KEV) 2019*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).
- PBL, 2019c. *Effecten Ontwerp Klimaatakkoord*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).



PBL, 2019d. *Achtergronddocument Effecten Ontwerp Klimaatakkoord: Gebouwde omgeving*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).

PBL, 2020a. *Conceptadvies SDE++ 2021 - Grootschalige warmtepompen*, Den Haag, Nederland: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).

PBL, 2020b. *Conceptadvies SDE++ 2021 - Waterstofproductie via elektrolyse*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

PBL, 2020c. *Effect kabinetsvoorstel CO2-heffing industrie*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

PBL, 2020. *Woonlastenneutraal koopwoningen verduurzamen*, Den Haag: PBL Planbureau voor de Leefomgeving .

Posterity Group, 2019. *Greenhouse Energy Profile Study*, Ottawa, Canada: Posterity Group.

Quintel, 2020. *Profielen Energietransitiemodel*. [Online]
Available at: <https://github.com/quintel/etsource/tree/master/datasets/nl/curves>
[Geopend 24 6 2020].

RAI ; BOVAG ; GfK, 2020. *Fietsen in de Statistiek 2007-2019 : Nederland*. [Online]
Available at:
<https://www.bovag.nl/BovagWebsite/media/BovagMediaFiles/Cijfers/2020/Rapportage-fietsverkoop-2007-2019.pdf>
[Geopend 2020].

Relion Battery, 2018. *Introducing RELION's Low-Temperature Lithium Iron Phosphate Batteries*. [Online]
Available at: <https://relionbattery.com/blog/lithium-battery-cold-weather#:~:text=In%20fact%2C%20lithium-ion%20batteries,loss%20at%20the%20same%20temperature>
[Geopend 20 06 2020].

Rijksoverheid, 2019. *Klimaatakkoord*, Den Haag: Rijksoverheid.

RVO, 2016. *Geothermie voor industrie : Kerngegevens over het toepassen van duurzame energie bij bedrijven door warmte uit geothermie*, Utrecht: Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO).

RvO, 2018. *Nederlandse lijst van energiedragers en standaard CO2 emissiefactoren, versie januari 2018*, Den Haag: RvO.

RVO, 2019. *National Agenda Laadinfrastructuur*. [Online]
Available at:
https://www.rvo.nl/sites/default/files/2019/11/Nationale_agenda_Laadinfrastructuur.pdf
[Geopend 2020].

Shehabi, A. et al., 2016. *United States Data Center Energy Usage Report*, Berkeley, California, USA: Lawrence Berkeley National Laboratory.

Siemens, 2017. *eHighway - Electrification of road freight transport*. [Online]
Available at: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/road/ehighway.html>
[Geopend 2020].

Stedin, 2020. *Waterstof in de gebouwde omgeving*, Rotterdam: Stedin.

Stichting Platform Geothermie, 2020. *Greenbrothers (Zevenbergen)*. [Online]
Available at: <https://geothermie.nl/index.php/nl/geothermie-aardwarmte/geothermie-in->



[nederland/projectoverzicht/231-greenbrothers-zevenbergen](#)
[Geopend 29 5 2020].

Tata Steel, 2018. *Factsheet Tata Steel algemeen*. [Online]
Available at:
https://www.tatasteel.nl/static_files/Downloads/Tata%20Steel%20NL/Factsheet%20Tata%20Steel%20algemeen%20DEF%20281118.pdf
[Geopend 4 5 2020].

TechnipFMC, 2017. *New Technologies in Ethylene Cracking Furnace Design*. Zoetermeer, Nederland, TechnipFMC.

TNO ; Spike; Connekt, 2020. *Haalbaarheidsonderzoek naar de elektrificatie zware mobiele werktuigen, samenvatting onderzoeksrapport*, sl: sn

TNO, 2020. *Risico's in parkeergarages ten gevolge van elektrisch en waterstof aangedreven personenauto's - internationale inventarisatie*, Delft: TNO.

van der Velden, N. & Smit, P., 2019. *Energiemonitor van de Nederlandse glastuinbouw 2018*, Wageningen: Wageningen University & Research.

van der Velden, N., Smit, P. & Burma, J., 2018. *Prognoses CO2-emissie glastuinbouw 2030*, Wageningen, Nederland: Wageningen University & Research.

Vattenfall, sd *Alles wat je wilt weten over de e-bike*. [Online]
Available at: <https://www.vattenfall.nl/duurzame-energie/energie-besparen/verbruik-e-bikes/>
[Geopend 2020].

Weerstatistieken, 2020. *Weerstatistieken De Bilt - 1987*. [Online]
Available at: <https://weerstatistieken.nl/de-bilt/1987>
[Geopend 6 18 2020].

Weerverleden, 2020. *Jaaroverzicht 2015*. [Online]
Available at: <https://weerverleden.nl/2015>
[Geopend 6 18 2020].

Wikipedia, 2020. *Dow Chemical (Terneuzen)*. [Online]
Available at: [https://nl.wikipedia.org/wiki/Dow_Chemical_\(Terneuzen\)](https://nl.wikipedia.org/wiki/Dow_Chemical_(Terneuzen))
[Geopend 5 5 2020].

Wikipedia, 2020. *Iron Ore*. [Online]
Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Iron_ore
[Geopend 5 5 2020].

Wikipedia, 2020. *SABIC*. [Online]
Available at: <https://nl.wikipedia.org/wiki/SABIC>
[Geopend 5 5 2020].

Wikipedia, 2020. *Shell Moerdijk*. [Online]
Available at: https://nl.wikipedia.org/wiki/Shell_Moerdijk
[Geopend 5 5 2020].

Yara, 2020. *Yara Sluiskil*. [Online]
Available at: <https://www.yara.nl/over-yara/yara-in-de-benelux/yara-sluiskil/over-yara-sluiskil/productie-eenheid-sluiskil/>
[Geopend 5 5 2020].



A Glastuinbouw

A.1 Scope en huidige vraag

In scope:

1. Glastuinbouw, inclusief levering uit wkk.
2. Elektriciteitsgebruik van warmtevoorziening, zoals pompenergie geothermie.

Buiten scope:

3. Akkerbouw en veeteelt, inclusief opgestelde wkk.
4. Energiegebruik van mobiele werktuigen en transport valt onder mobiliteit.

Het totale energiegebruik van de glastuinbouw bedroeg in 2018 zo'n 100 PJ, waarvan 24 PJ (6,6 TWh) elektriciteit (van der Velden & Smit, 2019). De verlichting is goed voor zo'n 90% van het elektriciteitsgebruik. Het opgestelde vermogen van wkk-installaties was 2,4 GWe, goed voor 9,4 TWh elektriciteitsproductie. Er werd netto dus 2,8 TWh aan het net geleverd door de tuinbouwsector. Er werd in 2018 7,3 PJ duurzame energie gebruikt, zowel warmte als elektriciteit. De overige energie is fossiel.

A.2 Potentieel elektrificatie

A.2.1 Opties om fossiel te vervangen voor elektriciteit

Geothermie

Diepe geothermie levert warmte van 60-90°C, die direct voor verwarming van de kas gebruikt kan worden. Aangezien hier enkel water opgepompt hoeft te worden, heeft diepe geothermie een COP van 15 (PBL, 2019a).

Ondiepe geothermie wordt uit minder diep gelegen aardlagen gewonnen en heeft een temperatuur van maximaal 50°C. Hierdoor moet ofwel een warmtepomp toegepast worden om het bestaande warmteafgiftesysteem van de kas te kunnen gebruiken, ofwel het warmteafgiftesysteem moet vervangen worden. Een alternatief voor ondiepe geothermie is warmtekoudeopslag (wko), dat verderop behandeld wordt. Er is voor zover bekend één project met ondiepe geothermie in Nederland (Stichting Platform Geothermie, 2020).

Zeer diepe geothermie heeft een temperatuur van boven de 100°C. Dit is meer dan nodig is voor de glastuinbouw en leidt dus tot onnodig hoge kosten. Het eventuele voordeel ligt dan ook vooral in hogere vermogens per bron (van der Velden, et al., 2018). Er zijn nog geen projecten met zeer diepe geothermie in Nederland.

Warmtepomp geothermie

Bij geothermie kan het bronvermogen verhoogd worden door de retourstroom verder af te koelen met een warmtepomp. De vrijkomende warmte wordt dan gebruikt voor de verwarming van de kas. We nemen een COP van 4 aan, gelijk aan de COP van wko, aangezien de temperatuurlift vergelijkbaar is.

Warmtekoudeopslag (wko)

Op warme dagen openen veel kassen luiken ('luchtramen') in het dak om de temperatuur binnen de grenzen te houden. Bij warmtekoudeopslag (wko) blijft de kas gesloten en wordt deze met koud water gekoeld. Deze warmte wordt opgeslagen om op een later moment weer gebruikt te worden, na opwaardering door een warmtepomp. Wko is in de literatuur ook te vinden als terugwinning zonnewarmte of kaswarmteterugwinning.

Power-to-Heat

Elektriciteit kan direct ingezet worden als verwarming indien de spotprijzen voor elektriciteit op een gegeven moment laag zijn. De kas kan direct verwarmd worden of de warmtebuffer kan gevuld worden. Power-to-Heat maakt gebruik van weerstandsverwarming, waarbij één eenheid elektriciteit ook één eenheid warmte oplevert.

Restwarmte

Glastuinbouw die gelegen is nabij industrie of andere partijen die restwarmte over hebben, kunnen hun kassen verwarmen met een warmtenet op restwarmte. Om het water door het warmtenet te pompen is elektriciteit nodig. Hiervoor nemen we een COP aan van 15, gelijk aan de COP voor diepe geothermie.

A.2.2 Elektriciteitsverbruik van bestaande toepassing

Belichting

Het grootste gedeelte van het elektriciteitsgebruik van de glastuinbouw is voor gewasbelichting. Tot 2030 neemt zowel het belichte areaal als de hoeveelheid belichting per eenheid kasoppervlak toe. Een dempende factor op het extra elektriciteitsgebruik is een toenemende toepassing van ledlampen.

Wkk-inzet

Door stijgende gasprijzen en een beperktere toename van de elektriciteitsprijs wordt een terugloop van zowel het opgestelde wkk-vermogen als de inzet verwacht (van der Velden, et al., 2018). Dit zal leiden tot additionele elektriciteitsvraag van het net. De wkk-inzet wordt gemodelleerd in PowerFlex en nemen we hier niet apart mee.

A.3 Factoren en barrières voor elektrificatie

De grootste factor voor de elektriciteitsvraag van de tuinbouwsector is de belichting. De voorziene groei in elektriciteitsvraag voor belichting is grotendeels een autonome ontwikkeling, gedreven door een continue vraag naar met name groente over de seizoenen heen (van der Velden, et al., 2018).

Voorwaarde voor de totstandkoming van alternatieve warmtesystemen is dat deze integraal lagere kosten hebben dan wkk en dat externe CO₂-levering ter bevordering van de plantengroei mogelijk is. Hoewel er voldoende CO₂-afvang in de industrie plaats zal vinden, kan een hoge CO₂-heffing ervoor zorgen dat de CO₂ zo duur is dat tuinders liever hun wkk behouden. Verder is het nodig om meer kennis te ontwikkelen en praktijkervaring op te doen voor

sommige technieken, bijvoorbeeld de terugwinning van latente kaswarmte, ondiepe en zeer diepe geothermie en aquathermie.

Een hogere gasprijs en een lagere elektriciteitsprijs drukken de wkk-inzet. De CO₂-prijs is niet van invloed, aangezien de glastuinbouw niet onder het EU ETS valt, maar een CO₂-sectorsysteem heeft³³. De marktomstandigheden en fiscale regelingen geven wkk momenteel een gunstige positie, zeker indien de opgewekte elektriciteit zelf verbruikt wordt. Wkk kan een goede aanvulling zijn op een alternatief warmtesysteem door te voorzien in de piekvraag naar warmte en elektriciteit efficiënt en lokaal op te wekken op momenten van piekvraag.

Verslechtering van de positie van wkk verhoogt op twee manieren het elektriciteitsverbruik van de sector. Allereerst moet de weggevalen elektriciteitsproductie geleverd worden door het elektriciteitsnet. Daarnaast wordt de inzet van alternatieve warmtesystemen gestimuleerd, die zelf ook weer een (beperkt) elektriciteitsverbruik hebben.

A.4 Potentieel 2030

De tuinbouwsector wordt in de KEV samen met de akkerbouw en veeteelt onder de landbouw geschaard. Dit leidt ertoe dat de cijfers van de KEV niet direct bruikbaar zijn om schattingen voor 2030 te maken. Daarom nemen we het gematigde scenario uit de studie 'Prognoses CO₂-emissies glastuinbouw 2030' van Wageningen University & Research als uitgangspunt, waarbij we het pessimistische en het optimistische scenario uit deze studie als onder- respectievelijk bovengrens hanteren (van der Velden, et al., 2018). De waardes van het gematigde scenario worden geschaald met het kasoppervlak zoals vermeld in de KEV (8900 ha in 2030). Het huidig verbruik is afgeleid uit de Energiemonitor van de Nederlandse glastuinbouw 2018 (van der Velden & Smit, 2019).

De potentiële additionele elektriciteitsvraag is weergegeven in Tabel 32. Vervolgens wordt het potentieel in meer detail besproken. Het is echter direct duidelijk dat de grootste verschuiving komt uit extra belichting en teruglopende productie uit wkk. CO₂-vrije warmteopties leiden in vergelijking tot een zeer beperkte extra elektriciteitsvraag.

Tabel 32 - Areaal en potentiële extra elektriciteitsvraag in 2030 per onderwerp ten opzichte van 2018

Optie	Eenheid	Minimaal	Klimaatakkoord	Maximaal
Areaal totaal (ha)	ha	6.945	8.900	9.055
Waarvan belicht (ha)	ha	3.267	4.237	4.586
Geothermie	TWh/j	+0,04	+0,10	+0,23
Warmtepomp geothermie	TWh/j	0,00	+0,03	+0,11
Wko	TWh/j	+0,00	+0,03	+0,05
Power-to-Heat	TWh/j	+0,04	+0,04	+0,04
Restwarmte	TWh/j	+0,00	+0,02	+0,04
Extra belichting	TWh/j	-1,1	+1,0	+2,1
Totale vraag	TWh/j	-1,1	+1,3	+2,7

³³ Er zijn nu nog enkele bedrijven die onder het EU ETS vallen, volgens het Klimaatakkoord zouden echter alle glastuinbouwbedrijven onder het CO₂-sectorsysteem moeten komen te vallen.

Geothermie

Diepe geothermie werd in 2018 in 17 projecten toegepast in de Nederlandse glastuinbouw. Het doel is om het aantal geothermieprojecten tot 2030 uit te breiden met nog eens 35 projecten (Rijksoverheid, 2019). We nemen aan dat dit allemaal diepe geothermie betreft, met 8 MW per bron en 6.000 vollasturen per jaar (van der Velden, et al., 2018). Dit levert 9 PJ warmte op en 0,17 TWh aan extra elektriciteitsvraag. In het lage scenario komen er slechts 17 bronnen bij. In het hoge scenario komen er ook 35 bronnen bij, maar zijn deze met 9 MW gemiddeld groter en hebben ze met 7.000 uur per jaar ook een hoger aantal vollasturen.

Ondiepe geothermie is nog nauwelijks ontwikkeld, we nemen aan dat er tot 2030 slechts enkele projecten komen. Het technisch potentieel van ondiepe geothermie wordt geschat op zo'n 3 PJ (van der Velden, et al., 2018). In het hoge scenario gaan we uit van 12 bronnen van 5 MW, die 5.000 vollasturen per jaar hebben, dat 0,02 TWh elektriciteitsverbruik geeft bij een COP van 15.

Zeer diepe geothermie is ook nog onvoldoende ontwikkeld om met zekerheid te kunnen stellen dat het voor 2030 toegepast wordt buiten een proefproject. Het technisch potentieel van zeer diepe geothermie wordt geschat op zo'n 9 PJ (van der Velden, et al., 2018). In het hoge scenario gaan we uit van 4 bronnen van 30 MW, die 7.000 vollasturen per jaar hebben, goed voor 0,06 TWh elektriciteitsverbruik bij een COP van 15.

Warmtepomp geothermie

Bij geothermie kan het bronvermogen verhoogd worden door de retourstroom verder af te koelen met een warmtepomp. De vrijkomende warmte wordt dan gebruikt voor de verwarming van de kas. We gaan ervan uit dat de warmtepomp nog eens 20% extra warmte kan leveren (de Zwart, et al., 2019). Aangezien de benodigde temperatuurlift vergelijkbaar is aan die van wko, gaan we ook hier uit van een COP van 4. We nemen aan dat in het basisscenario 25% van het technisch potentieel vervuld wordt, dus 25% van 20% van de warmte van geothermie wordt geleverd door de warmtepomp. Dit is goed voor 0,03 TWh elektriciteitsverbruik. In het hoge scenario nemen we een realisatie van 50% van het technisch potentieel aan, dat goed is voor 0,11 TWh elektriciteitsverbruik.

Warmtekoedeopslag (wko)

Wko wordt met name toegepast bij gewassen waarbij teeltkoeling leidt tot verhoging van de productkwaliteit. De hoeveelheid herwonnen warmte zal toenemen door voort-schrijdende techniek van de wko zelf en afnemen door systemen die de hoeveelheid instraling beheersen. Deze twee ontwikkelingen heffen elkaar min of meer op, waardoor de hoeveelheid herwonnen zonnearmte tot 2030 min of meer gelijk blijft. Het technisch potentieel voor warmtekoedeopslag wordt aldus geschat op maximaal zo'n 1,5 PJ in 2030 (van der Velden, et al., 2018). Uitgaande van de scenario's in de studie van der Velden et al., is de warmteproductie uit warmtekoedeopslag 0,9/1,3/1,5 PJ voor de het lage/basis/hoge-scenario. Dit is goed voor 0,06/0,09/0,1 TWh additioneel elektriciteitsverbruik bij een COP van 4 (Geelen & Braber, [2013]).

Power-to-Heat

Om profijt te hebben van de inzet van Power-to-Heat, moet *gelijktijdig* aan drie voorwaarden voldaan worden:

- elektriciteit is goedkoper dan aardgas;
- er moet warmtevraag te zijn, vanuit de kas zelf of vanuit een warmtebuffer die nog niet vol is;
- de netaansluiting moet nog capaciteit over hebben.

Het aantal uren dat aan de eerste voorwaarde voldaan wordt, is beperkt. Daarnaast is er tijdens deze uren niet altijd een warmtevraag. Er is bijvoorbeeld in de zomer voor vele teelsoorten slechts weinig of geen warmtevraag, terwijl er dan juist geregeld elektriciteitsoverschotten zijn uit zonne-energie. Bedrijven met een ruime netaansluiting zullen over het algemeen belichting en/of wkk toepassen. Indien zij geen wkk hebben, is er enkel netcapaciteit als de verlichting uit staat. Bij de bedrijven met belichting én wkk zal de wkk een groot deel van de tijd de elektriciteitsvraag uit verlichting dekken.

Uit deze redenering blijkt dat er slechts een zeer gering aantal uren is waarop Power-to-Heat in de tuinbouwsector winstgevend ingezet kan worden. Het is niet te verwachten dat dit voldoende is om significante investeringen in Power-to-Heat op gang te brengen. Op basis van van der Velden et al. nemen we dan ook een inzet van slechts 5 miljoen m³ aardgasequivalent aan warmte aan, oftewel 0,16 PJ. Het additionele elektriciteitsverbruik is met 0,05 TWh zeer gering.

Restwarmte

Het Klimaatakkoord vermeldt de ambitie om in 2030 tenminste 10 PJ aan externe warmte te gebruiken in de glastuinbouw. Dit vormt het basisscenario. Met een pompenergie van 2,5 kWh_e/GJ_{th} (CE Delft, 2019a) levert dit een extra elektriciteitsvraag van 0,03 TWh op. In het lage scenario gaan we uit van 3,8 PJ restwarmte, in het hoge scenario van 20 PJ. Dit levert respectievelijk 0,01 en 0,05 TWh elektriciteitsvraag op.

Belichting

De hoeveelheid belicht areaal stijgt tot 2030 naar verwachting van 3.700 ha in 2015 tot ruim 4.200 ha in 2030, waarbij de elektriciteitsvraag uit verlichting stijgt van 155 naar 160 kWh/m² verlicht areaal in het basisscenario, dat 0,95 TWh additionele elektriciteitsvraag oplevert. In het lage scenario is dit 144 kWh/m² en 1,1 TWh minder elektriciteitsvraag. In het hoge scenario hanteren we 173 kWh/m², dit geeft 2,11 TWh extra elektriciteitsvraag.

A.5 Tijdslijn tot 2030 en doorkijk naar 2050

De inzet van wkk en alternatieve verwarmingstechnieken is niet gedreven door technologieontwikkeling, maar wordt gedreven door de marktprijzen van elektriciteit en gas en de belastingen daarop. Deze zijn maar beperkt te voorspellen en er zitten geen duidelijke kantelpunten in, er kan dan ook geen duidelijke tijdslijn gemaakt worden van deze verschuivingen.

De sector heeft reeds in 2014 de ambitie uitgesproken om in 2050 een volledig duurzame energievoorziening gerealiseerd te hebben (Ministerie van EZK, 2014), in het Klimaat-akkoord is dit aangescherpt tot 2040. Tegen die tijd zal het volledige aardgasgestookte wkk-vermogen zijn vervangen door wkk op CO₂-neutrale brandstoffen of door duurzame verwarming uit geothermie, restwarmte of warmtepompen. De elektriciteitsvraag vanuit verlichting neemt wellicht af door verdere ontwikkeling van ledtechnologie.



B Datacenters

B.1 Scope en huidige vraag

In scope:

- Datacenters: single tenant, multi-tenant, hyperscale.
- Direct energiegebruik van servers, indirect energiegebruik van UPS, koeling en verlichting.

Buiten scope:

- Mobiele netwerken.
- Devices: bijvoorbeeld smartphones, tablets, laptops, smartwatches, etc. Voor netwerken en devices wordt geen significante groei of krimp van het verbruik verwacht (Berenschot en Kalavasta, 2020).

Het elektrisch vermogen van alle Nederlandse datacenters wordt eind 2018 gesteld op 1.503 MW (Dutch Datacenter Association, 2019), bij een continue belasting (365/24/7) op 100% load zou dit neerkomen op 13,2 TWh/j. De gemiddelde belasting is echter slechts 35% van de aansluitwaarde (Dutch Datacenter Association, 2020), waardoor het elektriciteitsverbruik in 2018 naar schatting zo'n 4,6 TWh was.

B.2 Potentiële additionele elektriciteitsvraag

Datacenters zijn op de noodstroomvoorziening na al volledig geëlektrificeerd, er is dus geen significante elektriciteitsvraag te ontsluiten door over te stappen van fossiele brandstoffen op elektriciteit.

Het elektriciteitsgebruik van datacenters hangt af van de hoeveelheid verwerkte clouddata en de energievraag per verwerkte eenheid data. In beide factoren zijn significante veranderingen mogelijk.

B.3 Factoren/barrières

Het groeiende dataverbruik is een autonome ontwikkeling, er is nog geen regelgeving om dit te beperken.

Er is een vrijwillige Code of Conduct voor datacenters waar een aantal energie-efficiëntie maatregelen in staan (Acton, et al., 2020). Daarnaast vallen servers en gegevensopslag-producten per 2019 onder de Ecodesign Directive (2009/125/EC) van de Europese Unie, waarin een aantal eisen staan op het gebied van energie-efficiëntie (EU, 2019).

Er is eigenlijk geen bindende regelgeving die de groei van data, datacenters of hun energiegebruik beperkt. Bij problemen rondom de inpassing van datacenters zou de vergunningverlening wel opgeschort kunnen worden.

B.4 Potentieel 2030

Datacenters zijn niet expliciet in het Klimaatakkoord opgenomen, ook in de KEV worden zij niet expliciet vermeld. Voor de additionele elektriciteitsvraag gaan we daarom uit van een studie door het economisch bureau van ING.

Naar verwachting is het datagebruik van cloudtoepassingen in 2030 tot 21 keer zo hoog als in 2018 (ING, 2019), oftewel een exponentiële groei van 28,9% per jaar. Daarentegen neemt de energie-efficiëntie ook ieder jaar exponentieel met 16% toe. Het totale elektriciteitsverbruik stijgt naar verwachting dus met $1,289/1,16 = 11,1\%$ per jaar.

Voor het min- en plus-scenario nemen we voor de groei in het dataverbruik een afwijking van 20% relatief. We nemen aan dat een groei die nog sterker is dan het Klimaatakkoord-scenario enkel plaats kan vinden als er een even grote toename in energie-efficiëntie tegenover staat.

Tabel 33 - Groei in het dataverbruik en de energie-efficiëntie tot en met 2030 voor drie scenario's en de resulterende elektriciteitsvraag

Factor	Eenheid	Minimaal	Klimaatakkoord	Maximaal
Groei dataverbruik	% jaar-op-jaar	+23,1% (-20%)	+28,9%	+34,7% (+20%)
– totaal t.o.v. 2018	factor	12,1	21	35,5
Groei energie-efficiency	% jaar-op-jaar	+16%	+16%	+19,2% (+20%)
– totaal t.o.v. 2018	factor	5,9	5,9	8,2
Totaal elektriciteitsgebruik	% jaar-op-jaar	+6,1%	+11,1%	+13,0%
– totaal t.o.v. 2018	factor	2,0	3,5	4,3
Elektriciteitsverbruik totaal 2030	TWh/j	9,4	16,3	19,9
Gemiddeld vermogen	GW	1,1	1,9	2,3
Aansluitvermogen	GW	3,1	5,3	6,5
Toename verbruik t.o.v. 2018	TWh/j	4,8	11,7	15,3
Toename aansluitvermogen t.o.v. 2018	GW	1,6	3,8	5,0

Het gemiddelde vermogen betreft de elektriciteitsvraag gedeeld door 8.760 uur. Het aansluitvermogen is berekend aan de hand van een gemiddelde benuttingsgraad van 35% van de aansluitcapaciteit.

Zowel de toename in dataverbruik als in energie-efficiëntie zal zich doorzetten na 2030. Hoe deze factoren zit tot elkaar verhoudt is echter niet zeker. De ontwikkelingen van datacenters gaan dusdanig snel dat een kwantitatieve doorkijk naar 2050 grenst aan speculatie, om die reden weerhouden wij ons hier dan ook van.

B.5 Grote onzekerheid

De schattingen voor het energieverbruik van datacenters kent een grote bandbreedte door verschillende factoren:

- onzekerheid in het huidige elektriciteitsverbruik;
- onzekerheid in de toename van dataverbruik;
- onzekerheid in de toename van energie-efficiëntie.

Daarnaast vormen de netcapaciteit en de beschikbare ruimte reële belemmeringen. De vraag is dan ook in hoeverre de overheid de autonome ontwikkelingen zoals in de scenario's geschetst kan en wil faciliteren.

C Feedstock industrie

C.1 Omschrijving feedstock industrie

De industrie maakt producten uit fossiele stoffen, dit betreft met name aardolie en aardgas in de raffinage en chemie. Daarnaast is biomassa input voor de voedingsmiddelenindustrie, de papierindustrie en de glastuinbouw.

Naast het energiegebruik van de industrie, zal ook het grondstofverbruik tegen 2050 CO₂-neutraal moeten zijn. Dit kan op meerdere manieren: volledig circulaire ketens zodat er geen uitstoot meer is, biobased producten zodat het enkel kortcyclische CO₂ betreft of productie uit groene waterstof en CO₂. We gaan uit van productie van grondstoffen uit groene waterstof en CO₂ omdat we geïnteresseerd zijn in een toename van de elektriciteitsvraag en dit de meest energie-intensieve route is.

In sommige gevallen kan een fossiele grondstof vervangen worden door een duurzame grondstof die met elektriciteit geproduceerd wordt. De meest voorkomende bouwstenen die op deze manier geproduceerd kunnen worden zijn:

- waterstof die geproduceerd wordt middels elektrolyse van water;
- CO₂ die gewonnen wordt uit de atmosfeer of uit een meer geconcentreerde stroom zoals rookgas.

De staalindustrie, de chemie en de raffinaderijen zijn verantwoordelijk voor zo'n 70% van de energievraag van Nederland (CBS, 2020b). Met name in de chemie wordt een breed scala aan zeer diverse producten gemaakt. De huidige studie laat niet toe om alle petrochemische producten uitgebreider te bestuderen, daarom is op basis van eerdere studies een selectie van producten gemaakt (DECHEMA, 2018) (ICF, Fraunhofer, 2019), die het grootste gedeelte van het huidige energiegebruik vertegenwoordigen:

- waterstof uit elektrolyse voor raffinaderijen;
- ammoniak uit groene waterstof en stikstof;
- methanol uit groene waterstof en CO₂;
- etheen en propeen uit methanol;
- benzeen uit methanol;
- benzine, diesel, kerosine, gasolie en stookolie vervangen door methanol;
- staalproductie met waterstof.

Verder gelden de volgende beperkingen voor onze analyse:

- We gaan ervan uit dat de complete huidige productie vervangen wordt door productie uit waterstof en CO₂. Economische groei of krimp, import en export, verhoging van het aandeel gerecyclede grondstoffen, verschuiving van vraag en andere alternatieve productiemethoden zijn allemaal niet meegenomen.
- De benutting restproducten is niet meegenomen, ook een eventueel warmteoverschot van het proces dat vervangen wordt is verwaarloosd.
- Er is geen energiegebruik meegenomen voor de afvang en transport en de benodigde CO₂.

Uit waterstof en CO₂ kunnen vrijwel alle organische chemicaliën gemaakt worden. Het is echter niet altijd de meest efficiënte route:

- Producten waarvan productie uit waterstof en CO₂ erg duur is, zullen sneller vervangen worden door een alternatief. Een voorbeeld is de polystyreen, gemaakt uit styreen, een

aromaat waarvan de productie uit waterstof en CO₂ veel energie kost. Polystyreen kan in een aantal toepassingen goed vervangen worden door de bioplastic polylactic acid (PLA), die goedkoop uit suikers te produceren is, met een lage energievraag.

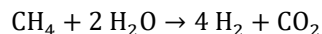
- Een hoger aandeel recycling zorgt ervoor dat er veel minder virgin materiaal nodig is, dat zeer sterk doorwerkt in de hoeveelheid energie die nodig is om de grondstoffen te produceren uit waterstof en CO₂.
- De meeste organische chemicaliën kunnen uit biomassa gemaakt worden met een veel lagere energievraag dan wanneer ze worden opgebouwd uit waterstof en CO₂.
- Waar CO₂-afvang en opslag economisch is, kan dit op de korte en middellange termijn uitkomst bieden om de elektriciteitsvraag binnen de perken te houden.

Met inachtneming van al het bovenstaande kunnen we concluderen dat de gepresenteerde getallen aan de bovenkant zitten van het bereik aan mogelijke additionele elektriciteitsvraag. Om meer betekenis te geven aan deze getallen zal nog een inschatting gemaakt moeten worden welk deel daadwerkelijk met de genoemde productiemethodes geproduceerd zal worden.

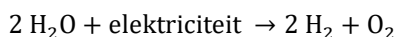
C.2 Inschatting feedstock industrie voor selecte toepassingen

C.2.1 Waterstof uit elektrolyse voor raffinaderijen

Om olie te raffineren is waterstof nodig. De waterstof wordt gebruikt om zwavel en onverzadigde verbindingen te verwijderen. Waterstof komt op raffinaderijen zelf vrij bij kraakprocessen, maar dit is niet genoeg om in de vraag te voorzien. Daarom zijn er extra waterstoffabrieken, die waterstof maken middels stoomreforming (SMR):



Een alternatief is om waterstof te produceren middels elektrolyse:



Waterstof produceren middels elektrolyse kost naar schatting in 2030 52 kWh per kg (FCH, 2017).

De waterstofproductie van Nederlandse raffinaderijen is afgeschat aan de hand van de CO₂-emissies. Zo'n 19% van de CO₂-emissies van een raffinaderij zijn gerelateerd aan waterstofproductie (DNV-GL, 2018a), waterstofproductie stoot ongeveer 8,85 t CO₂/t waterstof uit (EC, 2011). Voor de totale CO₂-emissies van Nederlandse raffinaderijen gebruiken we de cijfers van NEa uit 2018 (NEa, 2019).



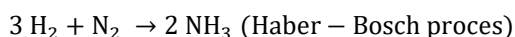
Tabel 34 - Additioneel elektriciteitsgebruik ten gevolge van groene waterstofproductie voor raffinaderijen

Locatie	CO ₂ -uitstoot 2018	Waterstofproductie geschat	Elektriciteits- vraag	Vermogen ³⁴
	t CO ₂	kton/j	TWh/j	GW
Shell Pernis	4.357.580	94	4,9	0,6
Esso Raffinaderij Rotterdam	2.376.261	51	2,7	0,3
BP Rotterdam	2.151.299	46	2,4	0,3
Zeeland Refinery	1.588.718	34	1,8	0,2
Gunvor Rotterdam	421.176	9	0,5	0,1
Totaal	10.895.034	234	12,2	1,5

Het H-Vision project in Rotterdam zet raffinaderijgassen middels een Autothermal Reformer (ATR) met CO₂-afvang om in waterstof. Deze waterstof wordt echter gebruikt om de procesfornuizen te stoken en niet om de brandstoffen op te waarderen. Dit project moet dus los gezien worden van de bovenstaande vraag naar waterstof.

C.2.2 Ammoniak

Ammoniak (NH₃) wordt met name als grondstof gebruikt in de kunststofindustrie. Ammoniak wordt gemaakt door eerst syngas te maken middels reforming van aardgas. Vervolgens wordt er een gedeelte lucht toegevoegd om de waterstof in een reactor te laten reageren met stikstof tot ammoniak:



Ammoniak kan ook geproduceerd worden door de waterstof te produceren middels elektrolyse, de stikstof moet dan in pure vorm aangeleverd worden vanuit een luchtscheider (ASU).

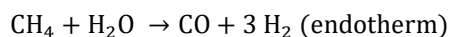
In Nederland wordt ammoniak op twee locaties geproduceerd: Yara in Sluiskil (Yara, 2020) en OCI Nitrogen in Geleen (OCI Nitrogen, 2017). De waterstofbehoefte voor ammoniakproductie bedraagt 178 kg per ton (DECHEMA, 2018). Het elektriciteitsverbruik van de stikstofproductie bedraagt 0,4 kWh/kg stikstof (DECHEMA, 2018). Gezamenlijk komt dit neer op 9,6 kWh/kg ammoniak.

Tabel 35 - Additioneel elektriciteitsgebruik ten gevolge van ammoniakproductie met groene waterstof en stikstof

Locatie	Ammoniakproductie	Waterstofproductie	Elektriciteitsvraag	Vermogen
	kton/j	kton/j	TWh/j	GW
Yara Sluiskil	1.800	320	17,3	2,2
OCI Nitrogen Geleen	1.100	195	10,5	1,3
Totaal	2.900	515	27,8	3,5

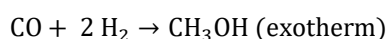
C.2.3 Methanol

Methanol is een platformchemicalie die nu wordt gemaakt uit (bio)gas, met syngas als tussenproduct (Methanol institute, 2020):

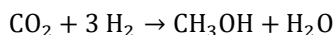


³⁴ Gebaseerd op 8.000 uur productie per jaar.





Een alternatieve productiemethode is om gebruik te maken van waterstof uit elektrolyse en afgevangen CO₂:



De waterstofbehoefte bedraagt 189 kg per ton methanol (DECHEMA, 2018), verder is er nog 1,5 kWh/kg elektriciteit nodig voor pompen, compressoren, scheiden, etc. Per kg methanol is er totaal 11,3 kWh nodig.

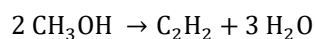
De enige methanolfabriek in Nederland staat in Farmsum (Groningen), waar BioMCN 900 kton methanol per jaar produceert.

Tabel 36 - Additioneel elektriciteitsgebruik ten gevolge van methanolproductie voor gebruik als methanol

Locatie	Methanolproductie	Waterstofproductie	Elektriciteitsvraag	Vermogen
	kton/j	kton/j	TWh/j	GW
BioMCN Farmsum	900	170	10,2	1,3
Totaal	900	170	10,2	1,3

C.2.4 Etheen uit methanol

Etheen, ook wel ethyleen genoemd, is de grondstof voor polyethyleen, een veelgebruikte kunststof. De traditionele manier om etheen te produceren is het kraken van nafta, een aardoliefractie. Een alternatieve manier is om gebruik te maken van het Methanol-to-olefins proces (DECHEMA, 2018):



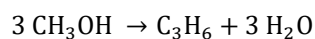
Op basis van molgewicht is er 2,3 kg methanol nodig voor iedere kg etheen. Verder is er nog zo'n 5 GJ/t etheen nodig om het proces aan te drijven, totaal komt de elektriciteitsvraag hiermee op 27,3 kWh/kg etheen. Er staan naftakrakers voor de productie van etheen in Moerdijk, Geleen en Terneuzen (CPB, 2019).

Tabel 37 - Additioneel elektriciteitsgebruik ten gevolge van methanolproductie voor etheen

Locatie	Etheenproductie	Methanol benodigd	Elektriciteitsvraag	Vermogen
	kton/j	kton/j	TWh/j	GW
Shell Moerdijk	900	2.056	56	7,0
SABIC Geleen	1.250	2.856	78	9,7
DOW Terneuzen	1.810	4.135	113	14,1
Totaal	3.960	9.047	247	30,8

C.2.5 Propeen uit methanol

Propeen, ook wel propyleen genoemd, is de grondstof voor polypropyleen, net als polyethyleen een veelgebruikte kunststof. Propeen wordt in dezelfde naftakrakers geproduceerd als etheen, maar kan ook uit methanol gemaakt (DECHEMA, 2018):



De productie van propaan heeft dezelfde energiebehoefte als de productie van etheen: 27,3 kWh/kg propaan. In Nederland wordt etheen geproduceerd middels naftakraken door Shell Moerdijk (Wikipedia, 2020), Dow Chemical Terneuzen (Wikipedia, 2020) en Sabic Geleen (Wikipedia, 2020).

Tabel 38 - Additioneel elektriciteitsgebruik ten gevolge van methanolproductie voor propaan

Locatie	Propaanproductie	Methanol benodigd	Elektriciteitsvraag	Vermogen
	kton/j	kton/j	TWh/j	GW
Shell Moerdijk	500	1.142	31,1	3,9
SABIC Geleen	675	1.542	42,0	5,3
DOW Terneuzen	850	1.942	52,9	6,6
Totaal	2.025	4.626	126	15,8

C.2.6 Benzeen uit methanol

Benzeen (C_6H_6) is een platformchemicalie voor kunststoffen. Polystyreen, polycarbonaat en nylon kunnen via diverse bewerkingen uit benzeen gemaakt worden. Benzeen wordt gewonnen uit aardolie in raffinaderijen, waar ook toluen omgezet wordt in benzeen.

Benzeen kan ook gemaakt worden middels het Methanol-to-aromatics-proces (DECHEMA, 2018). Hiervoor is 4,3 kg methanol per kg benzeen nodig in 5 GJ/t om het proces aan te drijven. Totaal komt dit neer op 50,1 kWh/kg benzeen. Benzeen wordt geproduceerd in Moerdijk, Terneuzen en Geleen en in de aromatenfabriek van ExxonMobil in Rotterdam (Commissie MER, 2015).

Tabel 39 - Additioneel elektriciteitsgebruik ten gevolge van methanolproductie voor benzeen

Locatie	Benzeenproductie	Methanol benodigd	Elektriciteitsvraag	Vermogen
	kton/j	kton/j	TWh/j	GW
ExxonMobil Chemical Rotterdam ³⁵	832	3.578	41,7	5,2
Shell Moerdijk ³⁶	1.300	5.590	65,1	8,1
DOW Terneuzen	915	3.935	45,8	5,7
SABIC Geleen	335	1.441	16,8	2,1
Totaal	3.382	14.543	169	21,2

C.2.7 Methanol als vervanger van vloeibare brandstoffen

Methanol kan met beperkte aanpassingen als vloeibare brandstof gebruikt worden ter vervanging van benzine, diesel, kerosine, gasolie en stookolie. We hebben berekend wat de resulterende elektriciteitsvraag zou zijn als alle vloeibare brandstoffen die door Nederlandse raffinaderijen geproduceerd worden vervangen zouden worden door methanol met dezelfde hoeveelheid energie. De hoeveelheden geproduceerde brandstof zijn afkomstig van CBS (CBS, 2020a), de stookwaardes van RvO (RvO, 2018).

³⁵ Waarvan maximaal 263 kton/j wordt omgezet in cyclohexaan.

³⁶ Waarvan 750 kton/j wordt omgezet in styreen.

Tabel 40 - Productie van vloeibare brandstoffen door Nederlandse raffinaderijen, vervanging door methanol

Brandstof	Stookwaarde	Productie 2018	Methanol benodigd	Elektriciteitsvraag	Elektriciteitsvraag
	MJ/kg	kton/j	kg/kg	kWh/kg	TWh/j
Benzine	43	3.988	2,16	24,5	98
Diesel	43,2	13.441	2,17	24,6	331
Kerosine	43,5	9.099	2,19	24,8	225
Gasolie en lichte stookolie	43,2	5.158	2,17	24,6	127
Stookolie	41	11.077	2,06	23,3	259
Totaal		42.763			1.039

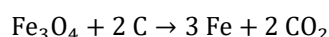
De totale energievraag is op basis van raffinaderijcapaciteit (CONCAWE, 2018) verdeeld over de Nederlandse raffinaderijen:

Tabel 41 - Additioneel elektriciteitsgebruik ten gevolge van methanolproductie voor benzeen

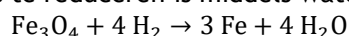
Locatie	Productiecapaciteit	Elektriciteitsvraag	Vermogen
	kton/j	TWh/j	GW
Shell Pernis	20,200	349	43,6
BP Rotterdam	17,900	309	38,6
Esso Raffinaderij Rotterdam	9,600	166	20,7
Zeeland Refinery	8,300	143	17,9
Gunvor Rotterdam	4,200	72	9,1
Totaal	60,200	1,039	129,9

C.2.8 Staalproductie met waterstof

Om staal te produceren moet de zuurstof uit ijzererts verwijderd worden, dit wordt in het hoogovenproces met koolstof uit steenkool gedaan³⁷:



Een andere manier om ijzererts te reduceren is middels waterstof:



Waterstof kan in het Direct Reduced Iron (DRI) proces gebruikt worden om ijzererts in vaste vorm te reduceren op hoge temperatuur. Het gereduceerde ruwijzer kan vervolgens gesmolten worden in een vlamboogoven (Electric Arc Furnace - EAF).

Ijzererts bestaat uit verschillende mineralen, maar bevat gemiddeld zo'n 70% ijzer op gewichtsbasis (Wikipedia, 2020). Om de 0,3 kg zuurstof per kg erts te verwijderen is 0,04 kg waterstof per kg erts nodig. Dit komt neer op 2,8 kWh/kg staal. Om de erts te verwarmen, de vlamboogoven te bedienen en de rest van het DRI-EAF-proces aan te drijven is nog eens 3,72 kWh/kg staal nodig (Bhaskar, et al., 2020), voor een totaal van 6,53 kWh/kg staal.

³⁷ Ijzererts bestaat uit een mengsel van verschillende oxides, ter illustratie is hier magnetiet (Fe₃O₄) gebruikt.

Het hoogovenproces gebruikt 3,48 kWh/kg staal (Bhaskar, et al., 2020), we hebben dan ook enkel het verschil in elektriciteitsverbruik van 3,05 kWh/kg staal meegerekend. Hierbij is het wel belangrijk om op te merken dat de 3,48 kWh/kg van het hoogovenproces opgewekt wordt uit hoogovengas. Bij vervanging van hoogovens door DRI-EAF is er weliswaar slechts 3,05 kWh/kg extra elektriciteitsvraag, maar het aanbod is ook navenant lager. In Nederland is Tata Steel de enige producent van staal. Tata Steel produceert zo'n 7 miljoen ton per jaar staal, waarvan 1,4 miljoen ton uit gerecycled schroot (Tata Steel, 2018).

Tabel 42 - Additioneel elektriciteitsgebruik ten gevolge van staalproductie met waterstof

Locatie	Productie virgin staal	Waterstof benodigd	Elektriciteitsvraag	Vermogen
	kton/j	kton/j	TWh/j	GW
Tata Steel IJmuiden	5.600	302	17,1	2,1
Totaal	5.600	302	17,1	2,1

C.3 Totale elektriciteitsvraag per cluster

De totale additionele energievraag per cluster is weergegeven in Tabel 43 en Tabel 44. Dit geeft een indicatie van de belasting van het energiesysteem. Hierbij is het belangrijk om op te merken dat het hier gaat om het 1-op-1 vervangen van de bestaande productie door een mogelijk alternatief. Economische groei of krimp, import en export, verhoging van het aandeel gerecyclede grondstoffen, verschuiving van vraag en andere alternatieve productiemethoden zijn allemaal niet meegenomen. Het is vanuit de enorme hoeveelheden energie evenwel duidelijk dat 1-op-1 vervanging met lokale waterstofproductie uit hernieuwbare elektriciteit geen realistische optie is.

Tabel 43 - Totale energievraag per industriecluster voor grondstof in TWh/j

Cluster	H2 raff.	Ammoniak	Methanol	Etheen	Propeen	Benzeen	Brandstoffen	Staal	Totaal
Delfzijl	0,0	0,0	10,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10
Geleen	0,0	10,5	0,0	77,9	42,0	16,8	0,0	0,0	147
IJmuiden	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17,1	17
Moerdijk	0,0	0,0	0,0	56,1	31,1	65,1	0,0	0,0	152
Rotterdam	10,4	0,0	0,0	0,0	0,0	41,7	895,6	0,0	948
Terneuzen	0,0	17,3	0,0	112,7	52,9	45,8	0,0	0,0	229
Vlissingen	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	143,2	0,0	145
Totaal	12	28	10	247	126	169	1.039	17	1.648

Tabel 44 - Totaal benodigd vermogen per industriecluster voor grondstof in GW op basis van 8.000 uur per jaar

Cluster	H2 raff.	Ammoniak	Methanol	Etheen	Propeen	Benzeen	Brandstoffen	Staal	Totaal
Delfzijl	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3
Geleen	0,0	1,3	0,0	9,7	5,3	2,1	0,0	0,0	18,4
IJmuiden	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,6	4,6
Moerdijk	0,0	0,0	0,0	7,0	3,9	8,1	0,0	0,0	19,0
Rotterdam	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	5,2	112,0	0,0	118,5
Terneuzen	0,0	2,2	0,0	14,1	6,6	5,7	0,0	0,0	28,6
Vlissingen	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17,9	0,0	18,1
Totaal	1,5	3,5	1,3	30,8	15,8	21,2	129,9	4,6	208,5

