



# SLIM LADEN MUST HAVE BIJ GROEI ELEKTRISCH VERVOER

Onderzoek naar kosten en baten van slim laden

Opdrachtgever Enpuls

Uitgevoerd door APPM en CE Delft

Met bijdragen van Hogeschool van Amsterdam en ElaadNL

Versie 1 | 12-03-2019

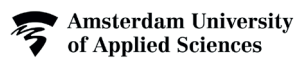
OPDRACHTGEVER



UITGEVOERD DOOR



MET BIJDAGEN VAN



# INHOUDSOPGAVE

<b>1. MANAGEMENTSAMENVATTING</b>	<b>4</b>
SLIM LADEN EEN MUST HAVE BIJ GROEI VAN ELEKTRISCH VERVOER	4
<b>2. AANLEIDING EN ONDERZOEKSOPZET</b>	<b>5</b>
ONDERZOEK NAAR POTENTIEEL VAN SLIM LADEN	5
SLIM LADEN UITGELEGD	6
ONDERZOEK NAAR DUURZAAM EN GESPREID LADEN	7
AFBAKENING KOSTEN EN BATEN IN DEZE STUDIE	8
<b>3. ANALYSEMODELLEN</b>	<b>9</b>
OPBOUW STUDIE NAAR POTENTIEEL VAN SLIM LADEN	9
AD 1. LAADGEDRAG IN 2030	10
AD 2A. SIMULATIE ELEKTRICITEITSSYSTEEM IN 2030	12
AD 2A. DUURZAME ENERGIE, CO <sub>2</sub> EN PRIJZEN VIA POWERFLEX MODEL	13
AD 2B. SIMULATIE LS-NETBELASTING IN 2030	14
AD 3. OPTIMALISEREN VAN HET LAADGEDRAG	15
AD 4. KWANTIFICERING VAN KOSTEN EN BATEN	17
<b>4. RESULTATEN</b>	<b>18</b>
EFFECTEN VAN DUURZAAM EN GESPREID LADEN	18
EFFECTEN IN TERMEN VAN KOSTEN EN BATEN	19
VERDIEPING EFFECTEN	20
RESULTATEN EFFECTEN, GEKWANTIFICEERDE BATEN/KOSTEN	21
<b>5. CONCLUSIES</b>	<b>22</b>
<b>6. AANBEVELINGEN</b>	<b>23</b>
<b>COLOFON</b>	<b>24</b>
<b>7. BIJLAGES</b>	<b>25</b>
BIJLAGE 1: SPREIDING IN DE EFFECTEN	25
BIJLAGE 2: TOELICHTING WELVAARTSEFFECTEN	26

# 1. MANAGEMENTSAMENVATTING

---

## SLIM LADEN EEN MUST HAVE BIJ GROEI VAN ELEKTRISCH VERVOER

### Managementsamenvatting onderzoek naar kosten en baten van slim laden

#### ONDERZOEK NAAR SLIM LADEN VAN ELEKTRISCHE AUTO'S

Slim laden biedt – naar verwachting – de mogelijkheid om grote aantallen elektrische auto's te laden op zoveel mogelijk duurzame energie uit zon en wind. Daarnaast biedt het de mogelijkheid om de energievraag te accommoderen binnen de kaders van het elektriciteitssysteem.

In deze studie doen CE Delft en APPM in opdracht van Enpuls, en in samenwerking met Hogeschool van Amsterdam en ElaadNL, onderzoek naar de maatschappelijke kosten en baten van slim laden. Als uitgangspunten zijn de doelstellingen uit het “Klimaatakkoord op hoofdlijnen” uit juli 2018 genomen. De analyses stelen op het Energiemarkt- en CEGRID-model van CE Delft en het TKI-laadmodel ontwikkeld door ElaadNL en de HVA.

In deze studie definiëren we slim laden als het laden van elektrische auto's op een 'gewenst moment'. De onderzochte stuursignalen zijn 1) sturen op zo min mogelijk CO<sub>2</sub>-uitstoot en 2) sturen op netcapaciteit. Slim laden is toegepast op het verschuiven van een volledige laadsessie. Verdere optimalisaties, zoals tijdelijk sneller laden en 'cut and divide', zijn buiten beschouwing gelaten.

#### EFFECTEN VOOR DUURZAAM EN GESPREID OPLADEN IN BEELD

De in het Klimaatakkoord genoemde 2,8 miljoen elektrische auto's in 2030 zorgen voor een significante CO<sub>2</sub>-reductie t.o.v. auto's op fossiele brandstoffen. Door op het 'gewenste moment' op te laden, kan die besparing verder oplopen. Uit dit onderzoek volgt dat bij normaal laden (zonder optimalisaties), de piekvraag op het laagspanningsnet met bijna 50% groeit, van 6,5 naar 9 GW. Op jaarbasis vertegenwoordigt het opladen van deze auto's dan een CO<sub>2</sub>-uitstoot van 1,6 Mton, vanwege elektriciteitsproductie met een deels fossiele energiemix.

Optimaliseren van het laadgedrag op alleen CO<sub>2</sub>-uitstoot (o.b.v. beschikbaarheid zonne- en windenergie), reduceert de uitstoot met 19 procent (0,31 Mton per jaar bij 2,8 mln. auto's). Het stuursignaal van dit scenario levert echter extra pieken op het elektriciteitsnet op, van 2,8 GW t.o.v. ongestuurd laden. Daardoor zijn de maatschappelijke kosten hoger dan de baten. Wanneer rekening wordt gehouden met netwerkcapaciteit, wordt de CO<sub>2</sub>-uitstoot met 11 procent (0,18 Mton) verlaagd en de piek op het laagspanningsnet juist met 2 GW gereduceerd t.o.v. ongestuurd laden. Het directe kostenvoordeel van deze scenario's is respectievelijk €42 tot €50 per elektrische auto per jaar op de bruto energieprijis.

#### GEOPTIMALISEERD SLIM LADEN: EEN GOED IDEE

Slim laden zorgt voor significante voordelen bij het laden van elektrische auto's: minder pieken op het laagspanningsnet, minder CO<sub>2</sub>-uitstoot en lagere laadkosten. De benodigde investeringen zijn tegelijkertijd beperkt. Slim laden is daarmee een must have om de grote groei van elektrische voertuigen te accommoderen in het elektriciteitssysteem. Een prominente randvoorwaarde daarbij is een dynamische toepassing van slim laden die niet stuur op één optimalisatie zoals het beperken van de CO<sub>2</sub>-uitstoot: daaruit kunnen ongewenste effecten ontstaan zoals groei van vraagpieken met consequenties voor netbelasting en investeringen. Verder onderzoek naar optimalisaties van slim laden levert naar verwachting verdere CO<sub>2</sub>-besparing en kostenvoordelen op.

Slim laden kan zorgen voor aanzienlijke extra CO<sub>2</sub>-reductie en kostenbesparingen bij elektrisch rijden. In de praktijk worden de onderzochte stuursignalen nog niet toegepast en de wijze van implementatie in bijvoorbeeld wetgeving en marktordening valt buiten de scope van dit onderzoek. Wel kan gesteld worden dat hoe eerder toepassing plaatsvindt, hoe groter de winst voor maatschappij, klimaat en de elektrische rijder.

## 2. AANLEIDING EN ONDERZOEKSOPZET

---

### ONDERZOEK NAAR POTENTIEEL VAN SLIM LADEN

#### Aanleiding

##### ELEKTRISCH RIJDEN ZORGT VOOR MINDER CO<sub>2</sub>-UITSTOOT

In de hoofdlijnen van het Klimaatakkoord (juli 2018) heeft elektrisch rijden een prominente plek om de CO<sub>2</sub>-reductiedoelstellingen van de mobiliteitssector te realiseren. Deze doelen sluiten aan op de afspraken uit het regeerakkoord waarin is vastgelegd dat in 2030 alle nieuwe verkochte voertuigen zero emissie zijn.

Meer elektrische auto's betekent een groeiende vraag naar (duurzaam opgewekte) elektriciteit. De productie van elektriciteit is (nog) niet zero emissie: de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de elektriciteitsproductie verschilt van uur tot uur en van dag tot dag. Op momenten dat veel duurzame energie uit zon en wind beschikbaar is, ligt de CO<sub>2</sub>-uitstoot per kWh doorgaans lager dan op andere momenten.

##### POTENTIEEL SLIM LADEN VOOR EXTRA REDUCTIE CO<sub>2</sub>-UITSTOOT

Slim laden maakt het mogelijk om elektrische auto's op te laden op een gewenst moment, bijvoorbeeld als duurzame energie beschikbaar is en de CO<sub>2</sub>-uitstoot laag. Algemeen wordt verondersteld dat slim laden een extra positief effect heeft op de CO<sub>2</sub>-uitstoot van elektrisch rijden (door een lagere bronemissie) en dat het kan zorgen voor het optimaal benutten van de beschikbare capaciteit in het elektriciteitsnetwerk.

Het doel van deze studie naar slim laden is om het potentieel van slim laden in termen van kosten en baten verder te onderzoeken en zo onderbouwde uitspraken te kunnen doen over het potentieel van slim laden met zo min mogelijk CO<sub>2</sub>-uitstoot en optimale benutting van het elektriciteitsnetwerk.

Deze studie richt zich alleen op de energie die nodig is om elektrisch te rijden. Het gaat over de bron en het systeem om de energie van bron naar de auto te brengen. De reductie van CO<sub>2</sub>-uitstoot van de elektrische auto door ermee te rijden (lokale emissies) is geen onderdeel van dit onderzoek.

##### OPDRACHTGEVERS

Deze studie is opgesteld in opdracht van Enpuls en uitgevoerd door APPM Management Consultants en CE Delft, in nauwe samenwerking met kennis- en innovatiecentrum ElaadNL en de Hogeschool van Amsterdam. Data voor analyses op het laadgedrag is beschikbaar gesteld door de G4 en MRA-E (via HvA) en EVnetNL (via ElaadNL).

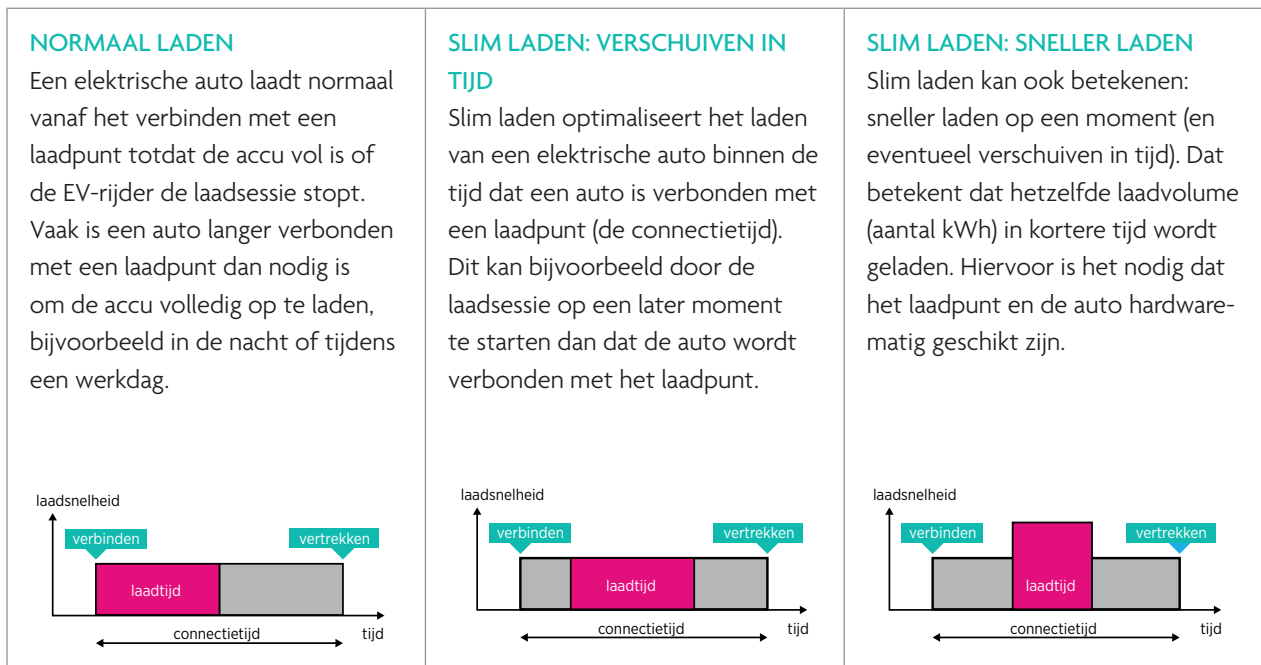
# SLIM LADEN UITGELEGD

## Variëren van laadsessies in tijd en snelheid

Een elektrische auto start met laden zodra deze verbindt met de laadpaal. Het laden stopt als de batterij vol is of als de EV-rijder het laden stopt. Vaak laadt een auto niet de volledige connectietijd (de periode dat de laadpaal en auto met elkaar zijn verbonden).

Slim laden maakt het mogelijk om de connectietijd optimaal te benutten voor het laden, bijvoorbeeld door het laden op een ander moment te starten, in delen op te knippen ('cut and divide') of te variëren in snelheid.

In dit onderzoek is alleen het verplaatsen van de laadsessie in de tijd bekeken; de model methodiek voor opdelen en sneller laden is nog niet ontwikkeld. Elektrische auto's bieden vaak de mogelijkheid om de laadsessie in te stellen (bijvoorbeeld niet starten voor 21:00 als het nachttarief start). Daarnaast bieden steeds meer dienstverleners slimme laaddiensten aan die de laadsessie via het laadpunt of de auto aansturen.

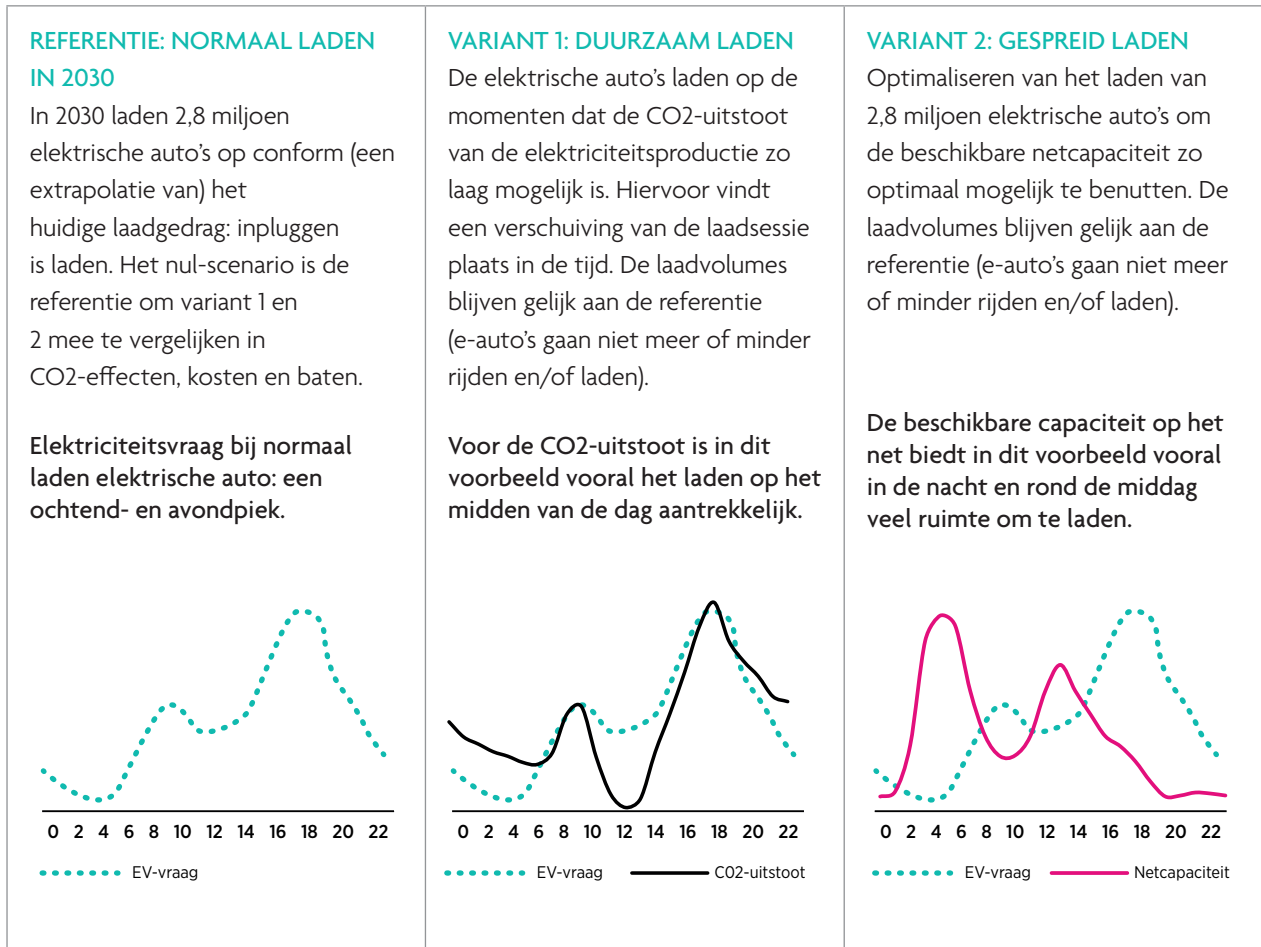


Uitgangspunt bij slim laden in deze studie is dat de connectietijd en laadvolume bij normaal laden en slim laden gelijk zijn: met andere woorden slim laden heeft geen nadelen voor de berijder van de elektrische auto.

# ONDERZOEK NAAR DUURZAAM EN GESPREID LADEN

## Toelichting onderzoeksvarianten voor slim laden in deze studie

Dit onderzoek naar slim laden maakt inzichtelijk wat het potentieel is van slim laden in termen van kosten en baten. We vergelijken daarvoor het normaal laden in 2030 (referentie situatie) met varianten (projectalternatieven) voor het toepassen van slim laden. Er zijn twee varianten uitgewerkt: (1) zo duurzaam mogelijk laden (sturen op zo min mogelijk CO2-uitstoot) en (2) zo gespreid mogelijk laden (sturen op beschikbare netcapaciteit).





## AFBAKENING KOSTEN EN BATEN IN DEZE STUDIE

### Scope van de analyses

In deze studie vergelijken we slim laden varianten steeds ten opzichte van de referentie normaal laden. Hieronder beschrijven we een verdieping op de te onderzoeken effecten.

BATEN	DUURZAAM LADEN	GESPREID LADEN
Effect op CO2-uitstoot	Duurzaam laden stimuleert het laden op momenten dat de CO2-uitstoot zo laag mogelijk is, waardoor bij slim laden door te sturen op duurzaam laden naar verwachting de CO2-uitstoot lager is dan bij normaal laden.	De gerealiseerde CO2-uitstoot op het moment dat gespreid wordt geladen door te sturen op beschikbare netcapaciteit. Afhankelijk van de impact van de sturing op netcapaciteit kan de CO2-uitstoot zowel afnemen als toenemen ten opzichte van normaal laden.
Effect op prijs laadstroom voor EV-rijders	Naar verwachting daalt de gemiddelde kostprijs voor EV-rijders doordat, bij sturen op CO2-uitstoot, zij op duurzamere momenten gaan laden wanneer de stroom goedkoper is ten opzichte van normaal laden.	Het gespreid laden betekent naar verwachting meer buiten de piekmomenten laden, waar de stroomprijs doorgaans hoger is. Hierdoor ligt het voor de hand dat gespreid laden tot lagere kosten voor EV-rijders leidt.
Effect op groothandelsmarkt	Naar verwachting zijn de effecten op de groothandelsmarkt in lijn met de effecten voor de prijs van EV-rijders. Duurzaam laden leidt naar verwachting tot positieve effecten op de groothandelsmarkt ten opzichte van normaal laden.	Naar verwachting zijn de effecten op de groothandelsmarkt in lijn met de effecten voor de prijs van EV-rijders. Gespreid laden leidt naar verwachting tot positieve effecten op de groothandelsmarkt ten opzichte van normaal laden.
Effect op netinvesteringen	De laadsessies verschuiven in de tijd, wat effect heeft op de belasting van het netwerk. Het gaat hier om het laagspanningsnetwerk (LS-netwerk), dat het overgrote deel van de elektrische auto's gebruikt om te laden. Indien er nieuwe pieken ontstaan die het netwerk niet aankan, zijn verzwappingsmaatregelen noodzakelijk. Het is mogelijk dat deze variant tot extra kosten voor netverzwaring leidt.	Slim laden op momenten dat de belasting in het netwerk laag is, leidt naar verwachting tot minder investeringen in netverzwaringen ten opzichte van normaal laden doordat hierop wordt gestuurd.

KOSTEN	
<p>Investerings in infrastructuur</p> <p>Investerings in systemen</p> <p>Beheer en onderhoud</p>	Voor de investeringen hanteren we de volgende aannames in deze studie: het doel van de studie is namelijk onderzoek te doen naar de effecten van duurzaam en gespreid laden en niet naar de kosten van het realiseren van slim laden. De nieuwe generatie laadpalen is 'Smart Charging ready', waardoor aan de laadinfrastructuur geen extra investeringen nodig zijn om slim laden mogelijk te maken. Voor de systemen geldt dat deze op orde moeten zijn om slim laden op grote schaal mogelijk te maken. Het gaat dan om het mogelijk maken dat stuursignalen (real time) doorgegeven kunnen worden. De aanname is dat voor de systemen eenmalig € 100 miljoen nodig is (platform, hardware, IT kosten etc.). Het beheer en onderhoud is geschat op € 5 miljoen per jaar. De investeringen en de beheer- en onderhoudskosten zijn voor duurzaam en gespreid laden gelijk.



### 3. ANALYSEMODELLEN

---

#### OPBOUW STUDIE NAAR POTENTIEEL VAN SLIM LADEN

##### Van CO<sub>2</sub>-uitstoot, netbelasting en laadgedrag naar effecten

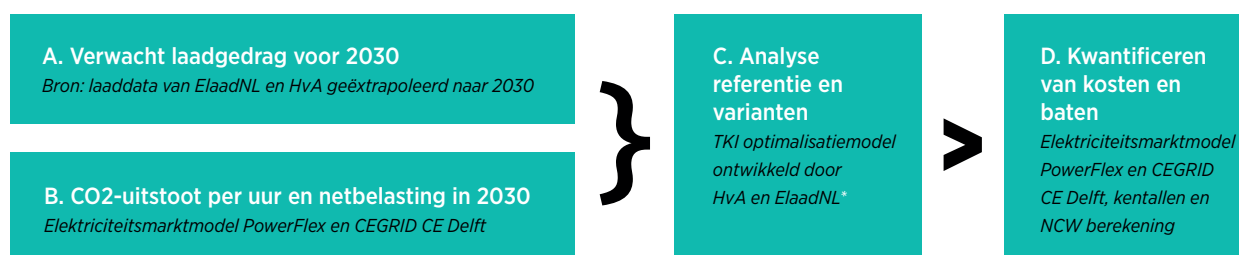
Om een uitspraak te doen over de effecten van slim laden is uitgegaan van het laadgedrag, CO<sub>2</sub>-uitstoot en netbelasting in 2030. Op basis hiervan is een doorrekening gemaakt van het laadgedrag met mogelijke effecten voor de referentie en de twee analysevarianten. De analyse om hier te komen bestaat uit de volgende stappen (elk van de stappen lichten we hierna afzonderlijk toe):

**A. Laadgedrag in 2030:** het laadgedrag (in termen van behoeften en tijdstippen) is uitgewerkt op basis van huidig laadgedrag en geëxtrapoleerd voor grotere batterijen. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van data die bij ElaadNL (data EVnetNL) en de HvA (data G4 en MRA-E) beschikbaar is.

**B. CO<sub>2</sub>-uitstoot en netbelasting:** het PowerFlex model van CE Delft simuleert de elektriciteitsmarkt in Nederland en levert de uurlijkse CO<sub>2</sub>-uitstoot in 2030 en het CEGRID-model levert de netbelasting voor LS-netten in 2030. Beiden zijn vertaald naar stuursignalen op uurbasis. Als de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de opgewekte energie laag is, is het een goed moment om te laden. Hetzelfde principe geldt voor de netbelasting; bij lage belasting is het aantrekkelijk om te laden.

**C. Analyse referentie en varianten:** op basis van het door HvA en ElaadNL ontwikkelde simulatiemodel in een TKI-project\* vindt een analyse plaats op de CO<sub>2</sub>-uitstoot en netbelasting voor de referentie en de twee varianten. Het simulatiemodel bevat de algoritmes om van een heel jaar het laadgedrag en –optimalisaties te analyseren en zo rekening te houden met de weersinvloeden, energieproductie en netbelasting.

**D. Verdiepen kosten en baten:** op basis van de analyse van alle resultaten vindt vervolgens verdieping naar de overige kosten en baten van slim laden plaats.



\* TKI-project Nationaal Dataonderzoek Slimme Laadstrategieën

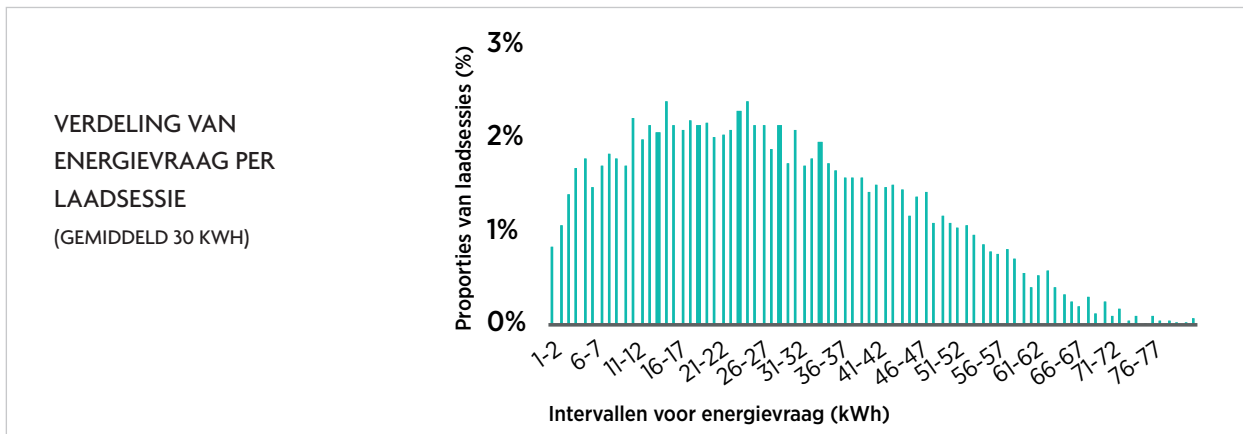
## AD 1. LAADGEDRAG IN 2030

### In 2030 laden 2,8 miljoen EV's gemiddeld 30 kWh en met 11 kW

Eén van de uitgangspunten voor het analyseren van het potentieel van slim laden is het laadgedrag. Hiervoor is door EaadNL een laadprofiel opgesteld dat weergeeft wat de uurlijkse elektriciteitsvraag is voor het laden van elektrische auto's in 2030. Het profiel is opgebouwd met de volgende uitgangspunten.

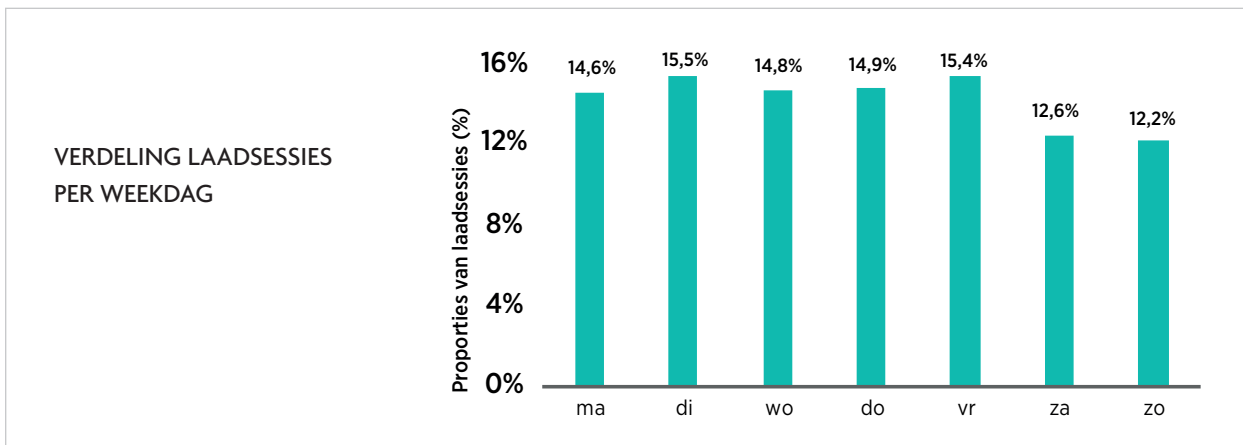
#### IN 2030 LADEN 2,8 MILJOEN ELEKTRISCHE VOERTUIGEN

Conform de uitgangspunten van het Klimaatakkoord rijden in 2030 in Nederland 2,8 miljoen elektrische voertuigen. Analyses van verschillende voorspelmodellen komen ook op een aantal van ca. 3 miljoen elektrische voertuigen uit in 2030. De verhouding tussen parkeerladen en snelladen is daarbij ca. 95-5% in lijn met de ambities in het Klimaatakkoord en de huidige situatie. Binnen parkeerladen is geen onderscheid gemaakt in type locaties (thuis-, publiek- of werkladen). Deze studie richt zich alleen op slim laden bij parkeerladen met een laadvermogen van 11 kW (ca. 50 km per uur bijladen).



#### GEMIDDELDE LAADSESSIE CA. 30 KWH

Verwacht wordt dat het laadvolume groeit naar gemiddeld 30 kWh per laadsessie, met daarin een spreiding tussen 1 en 80 kWh. Dit laadvolume is afgeleid uit het huidige laadgedrag van volledig elektrische auto's met een grote accu (>50 kWh). Deze analyse houdt tevens rekening met het aantal gemiddeld gereden km per week per auto van 254 km per week<sup>1</sup> oftewel 50,8 kWh per week die wordt afgenomen in meerdere laadsessies. Gemiddeld laadt een EV-rijder in deze situatie in 2030 minder dan 2 keer per week. Het volume per laadsessie is gebaseerd op het laden van huidige elektrische voertuigen met een accu van 40 kWh of meer (o.a. Renault, Nissan, Tesla).



<sup>1</sup> CBS (2017). Verkeersprestaties personenauto's.

## AD 1. LAADGEDRAG IN 2030 (VERVOLG)

### Op een doordeweekse dag laden 300.000 auto's gelijktijdig

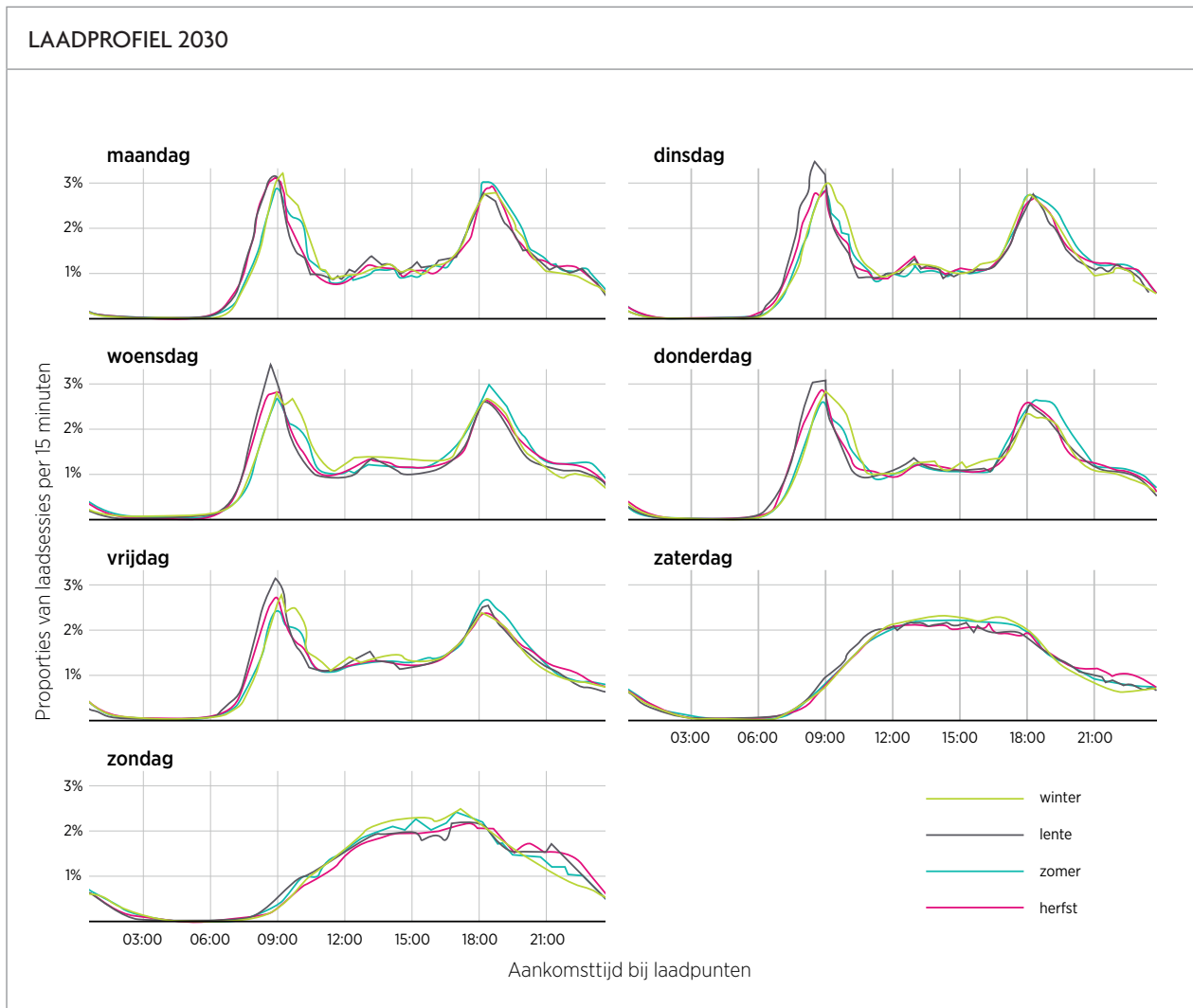
#### LAADTIJDEN CONFORM HET HUIDIGE LAADGEDRAG

Uitgangspunt is dat het huidige laadgedrag (het moment van in- en uitpluggen bij een laadpunt) van elektrische rijders gelijk blijft. Voor analyse van het huidige laadgedrag is gebruik gemaakt van data van de G4, MRA-E (via HvA) en EVnetNL (via ElaadNL).

#### UITGANGSPUNTEN LEIDEN TOT EEN LAADPROFIEL

De uitgangspunten leiden tot een samengesteld uurlijks profiel voor het laden in 2030. Een illustratie voor de gemiddelde weekdagen in 2030 is hieronder weergegeven, inclusief de variatie per seizoen.

Dit betekent dat er van nature al een grote spreiding aanwezig is in het laadgedrag. Die spreiding ontstaat ten eerste doordat in 2030 niet elke elektrische auto elke dag hoeft te laden. Ten tweede is er sprake van een natuurlijke spreiding doordat niet elke EV-rijder op hetzelfde moment op de plaats van bestemming aankomt en daar gaat laden. Desondanks is sprake van duidelijke laadpieken in de ochtend en avond.



## AD 2A. SIMULATIE ELEKTRICITEITSSYSTEEM IN 2030

### Uitgangspunten: 20 GW zon-PV, 12 GW wind op zee, 8 GW wind op land

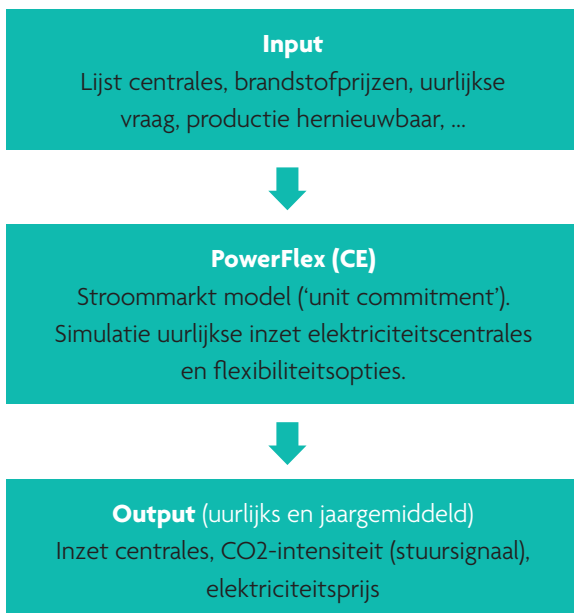
Het PowerFlex model simuleert de inzet van individuele elektriciteitscentrales en flexibiliteitsopties op basis van de toekomstige uurlijkse elektriciteitsvraag en de productie van hernieuwbare elektriciteit. Het doel van het model is de effecten van energiesysteem-scenario's op de fossiele opwek, opwekkingsmix en de stroomprijs simuleren.

SAMENVATTING LIJST CENTRALES			
	Totaal (MWe)	Efficiency (gem.%)	Flexibel (gem.%)
Gas	16.654	55%	110%
Gas-WKK	5.287	38%	70%
Kern	-		
HO-gas, afval	1.554	39%	30%
Biomassa	74	38%	34%
Kolen	-		
Conventioneel	23.569 (w.v. 2.730 must-run)		
Hernieuwbaar	12 GW wind-zee, 8 GW wind-land, 20 GW zon-PV		

We gebruiken het model in deze studie om de uurlijkse CO<sub>2</sub> (in gram/kWh) van de elektriciteitsproductie in 2030 te simuleren, onder een toekomstscenario in lijn met het 'Voorstel voor het Klimaatakkoord op Hoofdlijnen' van 10 juli 2018. Dit vormt het stuursignaal voor het duurzaam laden (sturen op CO<sub>2</sub>-uitstoot). Tevens vormt deze tijdreeks de basis voor de kwantificering van de CO<sub>2</sub>-besparing van slim laden ten opzichte van het normaal laden als referentie. De uurlijkse elektriciteitsprijzen die met het model zijn berekend vormen de basis voor het kwantificeren van de financiële markteffecten.

#### GEBRUIKTE INPUTDATA

Voor het 2030-klimaatakkoord scenario is een eerder scenario – het 2030-high-RES-high-prices scenario uit CE Delft (2017) – aangepast, waarbij er een aantal aanpassingen verricht zijn t.b.v. deze studie. Zo bevat de modelsimulatie geen Nederlandse kolencentrales (in het regeerakkoord Rutte III is afgesproken dat deze uiterlijk in 2030 dicht zijn). Alle koleneenheden zijn vervangen door aardgasgestookte centrales die flexibel kunnen opereren. De elektriciteitsvraag is gebaseerd op 2,8 miljoen EV's, bovenop de elektriciteitsvraag die geschaald is op de elektriciteitsvraag van vandaag (ENTSO-E-load data) conform de NEV-2016. De gebruikte meteorologische klimaatreeksen zijn 2015 als 'default' (een redelijk gemiddeld windjaar) geschaald naar 20 GW zon-PV, 12 GW wind op zee en 8 GW wind op land. Als gevoeligheidsanalyse zijn ook de weerjaren 2013 en 2014 doorgerekend.

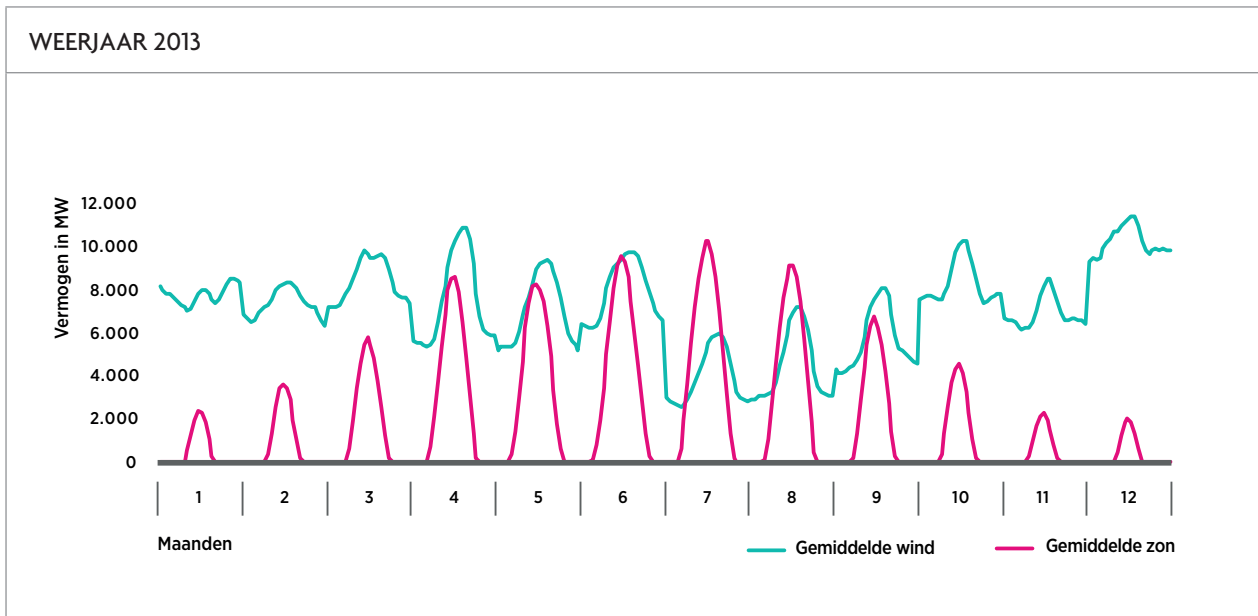


## AD 2A. DUURZAME ENERGIE, CO<sub>2</sub> EN PRIJZEN VIA POWERFLEX MODEL

### Productie van duurzame energie gedurende het jaar

Uit het PowerFlex model volgt een voorspelling van de productie van zonne- en windenergie, CO<sub>2</sub>-uitstoot en energieprijzen per uur in 2030. Onderstaand figuur geeft ter illustratie de productie van zon en wind in 2030 weer, op basis van het windjaar 2013, als output uit het PowerFlex model.

Zonne-energie kent een duidelijk patroon met pieken rond het middaguur. Voor de windproductie varieert de productie van dag tot dag: een gemiddelde dag komt nauwelijks voor. Kenmerkend is dat het doorgaans gedurende de dag harder waait (en meer windstroom beschikbaar is) dan gedurende de nacht. Op momenten dat er veel vraag is naar energie (bv. in de ochtend tussen 7:00 en 9:00) en weinig duurzame energie beschikbaar is, zijn fossiele centrales nodig om de vraag in te vullen. Hierdoor ligt op die momenten de CO<sub>2</sub>-uitstoot per kWh hoger. Om de invloed van het weer op de effecten te minimaliseren zijn verschillende naar 2030 geëxtrapoleerde weerjaren gesimuleerd (2013, 2014 en 2015). De verschillen hiertussen zijn beperkt.

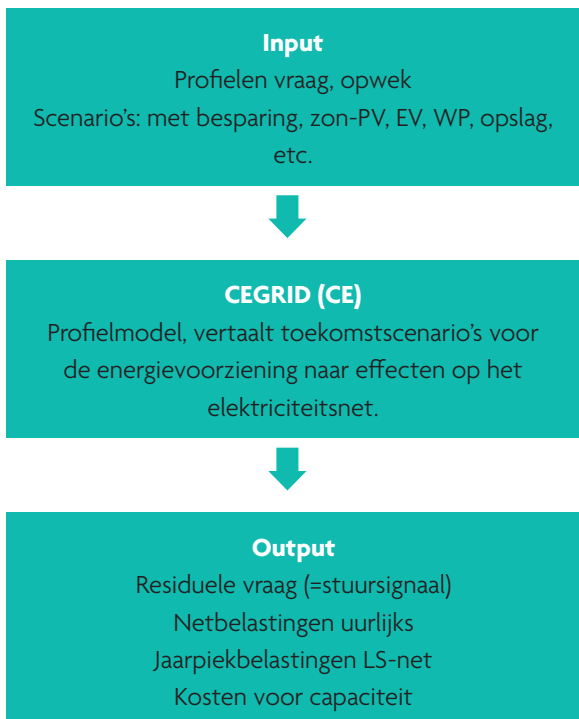


## AD 2B. SIMULATIE LS-NETBELASTING IN 2030

### Uitgangspunten: 20 GW zon-PV met 12 GW zon-PV op LS-net

Het CEGRID-model vertaalt toekomstscenario's voor de energievoorziening (met daarin energiebesparing, zon-PV, elektrische voertuigen, warmtepompen, opslag, etc.) naar effecten op het elektriciteitsnet. Het model rekent uit hoe de netbelasting zich ontwikkelt, waar capaciteitsknelpunten ontstaan, hoe flexibiliteitsopties (demand response, opslag, slim laden, etc.) dit beïnvloeden.

RELEVANTE DATA LS-NETVLAK	
	Energie GWh/jaar
Woningen (7,9mln)	21.100
Utiliteit kleinverbruik (840k)	8.000
Straatverlichting	700
Elektrische voertuigen (2,8mln)	7.400
Zon-PV op LS: 12 GW	10.810



In deze studie gebruiken we het model om een stuursignaal te maken voor het gespreid laden (sturen op netcapaciteit), gedefinieerd als de totale uurlijkse LS-vraag minus de LS-opwek (zon-PV), en tevens om de effecten die in de scenario's zijn berekend te vertalen naar de investeringsopgave voor de netbeheerder (kosten van netverzwaringen).

#### GEBRUIKTE INPUTDATA

De ontwikkelingen in vraag en aanbod zijn gebaseerd op de NEV, waarbij we hebben aangenomen dat van de 20 GW veronderstelde zon-PV, 60% (12 GW) op het laagspanningsnet zal worden geïnstalleerd. Het kostenkental om de verschillen in de piek-netbelasting tussen de alternatieven en de referentie te vertalen naar de investeringsopgave voor netbeheerders is € 916 per kW. Dit kental komt uit de Net voor de Toekomst-studie.

#### BIJZONDERHEDEN

In de simulatie wordt het stuursignaal iteratief bijgewerkt terwijl de simulatie loopt (dit voorkomt 'oversturing').



### AD 3. OPTIMALISEREN VAN HET LAADGEDRAG

#### Algoritmes voor slim laden om optimale laadmoment te berekenen

Via het optimalisatiemodel dat door HvA en ElaadNL is ontwikkeld in het TKI-project Nationaal Dataonderzoek Slimme Laadstrategieën vindt optimalisatie van de laadsessies plaats op basis van de twee stuursignalen voor duurzaam laden en gespreid laden. In het model wordt op basis van het stuursignaal naar het meest optimale laadmoment gezocht, met het uitgangspunt dat alleen de laadtijd binnen de totale connectietijd wordt verschoven. Het gaat hierbij om het volledig verschuiven van een laadsessie; voor 'cut and divide' is geen algoritme beschikbaar. Met andere woorden: een elektrische auto is altijd volledig opgeladen bij vertrek.

Het algoritme om tot een geoptimaliseerd laadprofiel per sessie te komen kent twee stappen. De eerste stap is het bepalen van de huidige situatie. Deze stap dient ter referentie van de later verschoven profielen. De tweede stap is om de vrije ruimte, gedefinieerd als de tijd van de sessie waarin niet wordt geladen, in de sessie op te breken in een aantal delen. Dit aantal is ook direct het aantal nieuwe profielen dat wordt bekeken. Voor elk van deze profielen worden de kosten bepaald en wanneer er een beter profiel ontstaat wordt deze opgeslagen.

De 'prijs' van een laadprofiel wordt bepaald door het somproduct van het profiel en de zogeheten kostenfunctie. Voor een reeks aan mogelijke profielen worden deze kosten berekend en het beste profiel, afhankelijk van het optimalisatie criterium, wordt geselecteerd. Voor het optimaliseren van duurzaam laden (sturen op CO<sub>2</sub>-uitstoot) is er geen feedback uit de omgeving. Dat wil zeggen: de kosten van een sessie worden niet beïnvloed door andere sessies die al eerder geoptimaliseerd zijn. Voor de optimalisatie richting netbelasting is dit wel het geval. Hier wordt telkens wanneer een sessie plaatsvindt, deze sessie bij de kostenfunctie opgeteld. Hierdoor stijgt de 'prijs' op het tijdstip van laden voor een andere sessie. Er wordt daarbij gebruik gemaakt van een 'first come first serve' principe. Dit dwingt de sessies die later komen naar momenten waar in totaal minder wordt geladen.

De input van het gehele systeem is een laadsessie uit historische data en de output is een nieuwe sessie die binnen zijn connectietijd op een, waar mogelijk, beter tijdstip aan het laden is.

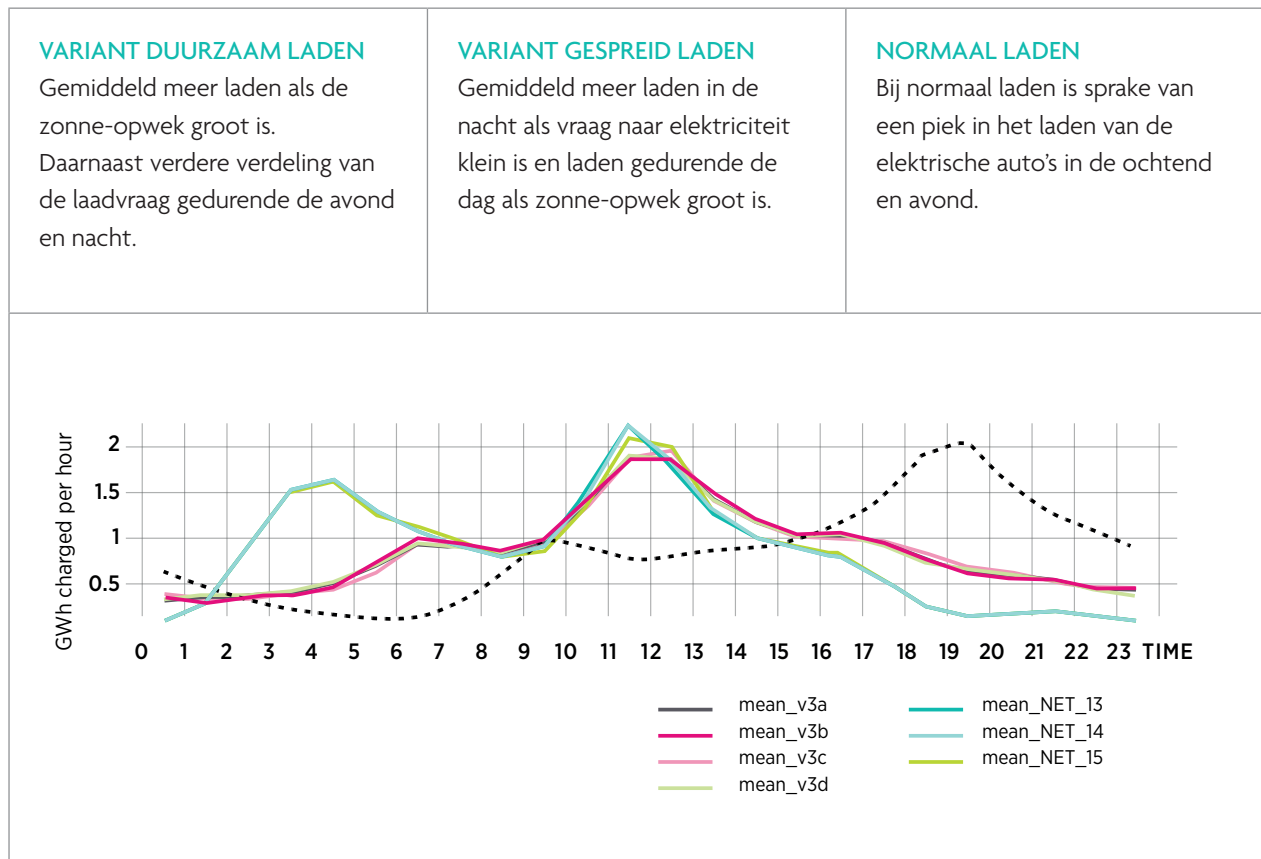


## AD 3. OPTIMALISEREN VAN HET LAADGEDRAG

### Optimalisaties zorgen voor verschuivingen in laadmomenten

Het TKI-simulatie model geeft inzicht in het geoptimaliseerde laadgedrag in 2030, op basis van de twee stuursignalen die als input zijn meegegeven. Deze resultaten zijn de basis voor het verder analyseren van de kosten en baten. Onderstaand figuur geeft de laadmomenten weer die hieruit volgen.

NB. Dit figuur kan een vertekend beeld geven van de resultaten omdat de reguliere energievraag op dezelfde momenten niet is weergegeven. Het figuur geeft bovendien gemiddelden weer. Elk uur van de dag gedurende het jaar verschilt waardoor deze figuur niet leidend is voor het berekenen van de resultaten en ter illustratie dient voor de output van het TKI-optimalisatiemodel.



## AD 4. KWANTIFICERING VAN KOSTEN EN BATEN

### Uitgangspunten

Op basis van de optimalisaties van het laadgedrag volgt de uurlijkse laadbehoefte van elektrische voertuigen voor normaal laden, duurzaam laden en gespreid laden.

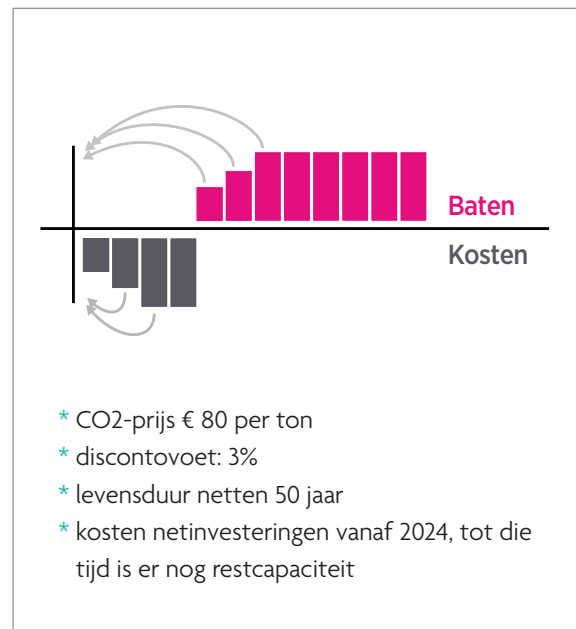
### BEREKENEN EFFECTEN VIA POWERFLEX EN CEGRID

Via PowerFlex en CEGRID (zie Ad 2) kwantificeren we deze effecten voor de CO<sub>2</sub>-uitstoot, kosten voor de EV-rijders, groothandelsmarkt en netbelasting. Deze effecten worden – indien nodig – op basis van kentallen gemonetariseerd. Voor de CO<sub>2</sub>-uitstoot wordt gebruik gemaakt van het kental € 80 per ton dat door het CPB is geadviseerd (WLO-klimaatscenario's en de waardering van CO<sub>2</sub>-uitstoot in MKBA's, 2016; WLO hoog). Voor de belasting op het LS-net wordt gerekend met een investering van € 916 per kW, als resultaat van de studie Net van de Toekomst, uitgevoerd door CE Delft in opdracht van Netbeheer Nederland in 2017.

### KWANTIFICEREN VAN KOSTEN EN BATEN

Om de kosten en baten met elkaar te kunnen vergelijken, worden deze netto contant gemaakt met de volgende uitgangspunten:

- De berekende effecten en kosten en baten vallen niet in dezelfde jaren (zie illustratie). Hiervoor is gecorrigeerd door alles terug te rekenen naar het beginjaar (in dit geval 2018). Dit wordt gedaan met een discontovoet, en resulteert in een Netto Contante Waarde (NCW). De gehanteerde discontovoet is 3%; de investeringen (slimme ICT etc.) zijn mogelijk niet te classificeren als onomkeerbare grote investeringen in publieke infrastructuur met hoge aanvangsrisico's.
- Een MKBA gaat uit van netto welvaartseffecten; in sommige gevallen is sprake van herverdeling van baten. Dit zijn dan even grote kosten voor andere partijen die netto geen extra welvaart opleveren. Daarvoor vindt een correctie plaats. Dit betekent dat de effecten voor EV-rijders niet worden meegenomen. Een toelichting hierop is opgenomen in bijlage 2.



## 4. RESULTATEN

### EFFECTEN VAN DUURZAAM EN GESPREID LADEN

#### Veelal positieve effecten ten opzichte van normaal laden

Uit de analyses komen de volgende resultaten. De presentatie in deze tabel betreft de gemiddelde waarden, in bijlage 1 zijn de hoge en lage waarden opgenomen die volgen uit doorrekeningen met andere weerjaren. De tabel presenteert voor duurzaam laden en gespreid laden de effecten ten opzichte van normaal laden als referentie. Voor bijvoorbeeld normaal laden zorgt de stroomproductie voor 1,63 Mton CO<sub>2</sub>-uitstoot in 2030, de reductie bij normaal laden is 0,31 Mton CO<sub>2</sub> en bij gespreid laden 0,18 Mton CO<sub>2</sub>. De afzonderlijke resultaten worden hierna verder toegelicht.

	Normaal laden (referentie)	Duurzaam laden (sturen op CO <sub>2</sub> )	Gespreid laden (sturen op netcapaciteit)
<b>BATEN</b>			
CO <sub>2</sub> -uitstoot	1,63 Mton/jr	- 0,31 Mton (-19,1%)/jr - € 8,90 per EV/jr	- 0,18 Mton (-10,9%)/jr - € 5,00 per EV/jr
Stroomprijs EV-rijder	€ 157,5 per EV/jr	- € 50,3 per EV/jr	- € 42,0 per EV/jr
Stroomprijs groothandelsmarkt	---	- € 46,9 per EV/jr	- € 39,6 per EV/jr
Netinvesteringen	9.502 MW piek + 3.000 MW t.o.v. geen EV's	+ 2.877 MW piek + € 37 per EV/jr	- 2.012 MW piek - € 26 per EV/jr
<b>KOSTEN</b>			
Investeringen in infrastructuur	SC-ready = standaard	Geen extra investering	Geen extra investeringen
Investeringen in systemen	€ 0	€ 100 mln	€ 100 mln
Beheer en onderhoud	€ 0 per jaar	€ 5 mln per jaar	€ 5 mln per jaar

## EFFECTEN IN TERMEN VAN KOSTEN EN BATEN

### Effect van netinvesteringen dominant in kosten en baten

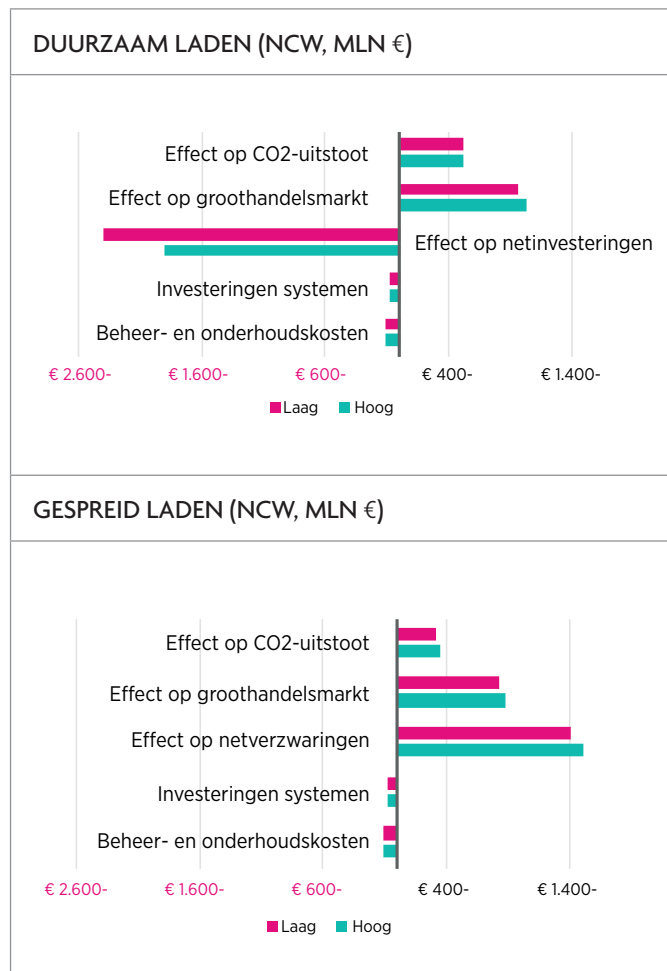
De effecten voor duurzaam en gespreid laden zijn verrekend in kosten en baten. Voor beide beide varianten presenteren we de bandbreedte (in termen van laag en hoog) op basis van de doorrekeningen op verschillende weerjaren.

#### DUURZAAM LADEN: HOGERE BATEN TENIET GEDAAN DOOR NETINVESTERINGEN

Bij het sturen op CO<sub>2</sub>-uitstoot liggen de baten voor reductie in CO<sub>2</sub>-uitstoot op ca. € 500 miljoen (NCW), de baten voor de groothandelsmarkt zijn ca. € 1 miljard. Deze baten worden ruimschoots tenietgedaan door de hogere netinvesteringen die ontstaan door de extra gelijktijdige piekvraag: ca. € 2 miljard negatief. De totale kosten zijn een factor 2 tot 5 hoger dan de baten. Er is netto een afname van de welvaart, veroorzaakt door de netinvesteringen.

#### GESPREID LADEN: LAGERE BATEN, VERSTERKT DOOR BESPARING NETINVESTERINGEN

Bij het gespreid laden liggen de baten op ca. € 300 miljoen door reductie in CO<sub>2</sub>-uitstoot, ca. € 700 miljoen op de groothandelsmarkt en ca. € 1,4 miljard (NCW) voor de netinvesteringen. Hiermee zijn de baten een factor 13 tot 14 hoger dan de kosten.



## VERDIEPING EFFECTEN

### CO<sub>2</sub>-uitstoot, kostprijs EV-rijder en groothandelsmarkt

#### EFFECT OP CO<sub>2</sub>-UITSTOOT

Op basis van de output van het TKI-HvA model en de uurlijkse gesimuleerde CO<sub>2</sub>-intensiteit van de elektriciteitsopwekking uit het PowerFlex model, is in de referentie de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot als gevolg van het laden van de 2,8 miljoen EV's in 2030 bepaald. De jaarlijkse uitstoot bedraagt 1,60 Mton CO<sub>2</sub>. Door het verschuiven van de laadsessies treedt in variant 1 (sturen op CO<sub>2</sub>) een besparing op van 0,31 Mton in 2030 (-19%). In de variant sturen op netbelasting blijkt er nog steeds een besparing te zijn, alleen is deze met 0,19 Mton substantieel lager.

#### EFFECT OP KOSTPRIJS LAADSTROOM VOOR EV-RIJDER

Doordat EV-rijders op momenten laden dat goedkopere zonne- en windenergie beschikbaar is, hebben ze lagere laadkosten voor het opladen. De verschuivingen van de laadsessies zijn input geweest voor het PowerFlex model waarmee vervolgens de prijseffecten zijn gesimuleerd op de elektriciteitsmarkt. Dit leidt tot een besparing van €50,30 per EV per jaar bij sturen op CO<sub>2</sub> en een besparing van €42,00 per EV per jaar bij sturen op netbelasting. Dit effect categoriseren we als een herverdelingseffect<sup>2</sup>. Hiertegenover staat een daling van de inkomsten van de producenten. Welvaartseffecten op de verminderde productiekosten van elektriciteit zijn apart in beeld gebracht.

#### EFFECT OP GROOTHANDELSMARKT

Slim laden heeft effecten voor de producenten van energie. Het slim laden leidt tot vermindering van de inzet van inefficiënte centrales en vergroot de kostenefficiënte inzet van elektriciteitscentrales en leidt tot dalende productiekosten. Dit ontstaat onder andere doordat er meer geladen wordt als duurzame energie beschikbaar is, zoals zonneproduktie gedurende de dag. Deze zijn inzichtelijk gemaakt met het PowerFlex model. De uurlijkse productiekosten van de regelbare centrales zijn gekwantificeerd, in de gevallen mét en zonder EV's. Dit leidt tot een batenpost in beide varianten, €46,90 per EV per jaar bij sturen op CO<sub>2</sub> en €39,60 per EV per jaar bij sturen op netbelasting.

<sup>2</sup> In een MKBA wordt uitgegaan van een netto effect op de welvaart. Soms is sprake van herverdeling van effecten tussen partijen. In bijlage 2 is dit nader uitgelegd.

## RESULTATEN EFFECTEN, GEKWANTIFICEERDE BATEN/KOSTEN

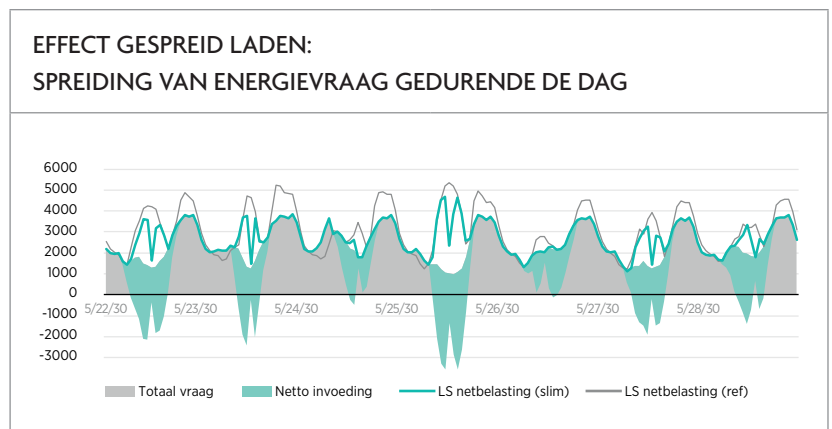
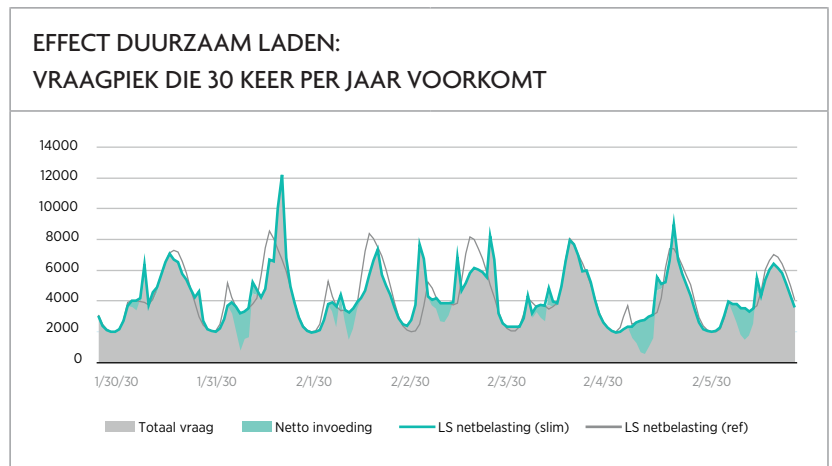
### Effect op netbelastingen

In de referentie is sprake van piekbelasting in het LS-netwerk van ongeveer 9,5 GW in 2030. Gespreid laden (sturen op netbelasting) leidt in de modelsimulaties met het CEGRID-model tot meer spreiding van het laadgedrag en verminderde piekbelastingen ten opzichte van normaal laden als referentie. Dit effect is een reductie van de piekbelasting met 2 GW in 2030. Bij duurzaam laden (sturen op CO<sub>2</sub>-uitstoot) neemt de netbelasting in het LS-netwerk toe. Dit effect ontstaat doordat de EV's meer op dezelfde (duurzame) momenten gaan laden. Dit resulteert in ongeveer 2,900 GW extra piekbelasting.

De piekbelastingen zijn omgerekend naar kosten door het kengetal uit de studie "Net van de Toekomst (2017)" van CE Delft toe te passen (€ 916 per kW). Bij het gespreid laden vinden in de modelberekeningen tussentijdse optimalisaties plaats, waardoor demping ontstaat van de vraagpiek. Bij duurzaam laden wordt een moment gezocht waarbij de CO<sub>2</sub>-uitstoot zo laag mogelijk is, wat vaak overlapt met momenten dat de vraag relatief hoog is (bv. gebruik van wind op zee tijdens de avondpiek). Hierdoor ontstaat juist een vraagpiek.

Een kanttekening hierbij is dat in de praktijksituatie bij 'duurzaam laden' vermoedelijk tijdig een 'grens' wordt gesteld aan de maximale netbelasting, waardoor een ander moment van laden gezocht zal worden. Dit zal leiden tot minder reductie van de CO<sub>2</sub>-uitstoot en minder piekbelastingen op het LS-net waardoor de investeringen ook kleiner worden.

EFFECTEN IN PIEKBELASTING	
Analyse	LS-belastingpiek (GW)
Geen elektrische auto's	6,51
Referentie scenario Normaal laden 2,8 mln. EV's	9,50 (+3 GW t.o.v. geen EV))
Duurzaam laden scenario Sturen op CO <sub>2</sub>	12,4 GW (+2,9 GW t.o.v. referentie)
Gespreid laden scenario Sturen op netbelasting	7,49 GW (-2.0 GW t.o.v. referentie)



## 5. CONCLUSIES

---

### SLIM LADEN LEVERT OP: ELEKTRISCH RIJDEN NOG SCHONER EN GOEDKOPER

Door te laden op momenten dat duurzame energie (wind, zon) beschikbaar is, daalt de CO<sub>2</sub>-uitstoot met 19% als gevolg van het opladen van EV's. Dit staat gelijk aan een besparing van 0,31 Mton CO<sub>2</sub> in 2030 aan bronemissie op basis van de gehanteerde uitgangspunten. Indien het energie-aanbod schoner wordt, neemt het effect af. Het 'regulier laden' gebeurt dan automatisch ook eerder duurzaam. Slim laden heeft verder als bijkomend voordeel dat de kosten voor laadstroom voor de EV-rijders dalen.

### SLIM LADEN HEEFT EEN POTENTIEEL GROTE WAARDE OM DE NETCAPACITEIT OPTIMAAL TE BENUTTEN

De variant waarbij wordt gestuurd op netbelasting laat zien dat sturen op de belasting kan leiden tot forse besparingen in netinvesteringen (het gaat hierbij om vermeden kosten voor netinvesteringen), omdat de piekcapaciteit minder hoeft te worden uitgebreid. Daar staat tegenover dat sturing op CO<sub>2</sub>-reductie in deze studie leidt tot meerkosten voor netverzwaringen doordat de EV's meer op hetzelfde moment laden. Op dit punt lopen de twee varianten sterk uiteen. Sturen op duurzaam laden zorgt voor een toename van 30,3% van de piekbelasting op het LS-netwerk, sturen op zo gespreid mogelijk laden verlaagt de piekbelasting op het LS netwerk met 20,2%.

### TOEPASSING VAN SLIM LADEN BEPALEND VOOR HET SUCCES

De varianten duurzaam en gespreid laden in deze studie zijn binair: er wordt geoptimaliseerd op één stuursignaal, waardoor het model geen garantie biedt dat de effecten in de praktijk op dezelfde wijze uitpakken en de impact in termen van kosten en baten in de praktijk gelijk is aan de uitgevoerde modelsimulaties. Uit de analyses blijkt wel dat de wijze waarop slim laden wordt toegepast bepalend is voor het succes. Het sturen op netcapaciteit laat zien dat er een zeer positief scenario ontstaat doordat aan het net een grens wordt gesteld die niet wordt overschreden. Een dergelijk effect is ook te verwachten als bijvoorbeeld op marktprijzen wordt gestuurd; deze corrigeren immers zichzelf door vraag en aanbod. Voor het duurzaam laden, sturen op CO<sub>2</sub>-uitstoot, geldt dat niet. Daar ontbreekt de grens waardoor ongewenste effecten ontstaan, in deze studie voor de benodigde netcapaciteit met extra investeringen tot gevolg. Met andere woorden: slim laden heeft zeer veel positieve effecten, mits de toepassing rekening houdt met grenzen van het systeem.



## 6. AANBEVELINGEN

---

De uitgevoerde studie kent beperkingen in de modellen en reikwijdte van de analyses. We doen de volgende aanbevelingen om de resultaten verder te verdiepen.

### VERDIEP OP ANDERE STUURSIGNALEN, WAARVAN TEN MINSTE HET STUURSIGNAAL 'PRIJS'

Afgevraagd kan worden of dit stuursignalen zijn waarvoor een mechanisme in de praktijk ontstaat. Een alternatief kan zijn om te sturen op energieprijzen voor EV-rijders bij het opladen van elektrische voertuigen. De energieprijs is immers een spel van vraag en aanbod en een bestaand marktmechanisme. Hierdoor ligt het voor de hand dat hoge vraagpieken, zoals die nu ontstaan bij duurzaam laden, worden vermeden (prijscorrectie) en toch zo duurzaam mogelijk wordt geladen (dan is de prijs doorgaans lager). Van belang hierbij is dat een model wordt gebruikt dat een dynamische energieprijs kent die zichzelf bijstelt in de modelsimulatie.

### VERDIEP HET ONDERZOEK NAAR ANDERE SLIMME LAADSTRATEGIEËN: SNELLER LADEN EN CUT-AND-DIVIDE

Het gebruikte slim laden model in deze studie gaat alleen uit van het verschuiven van het laadmoment in de tijd. Andere slimme laadstrategieën zoals het opknippen van laadsessies 'cut and divide' of variëren met de laadsnelheid bieden mogelijk extra mogelijkheden om het nut van slim laden ten volle te benutten. Naar verwachting leidt dit tot positievere effecten. Voor deze analyses bestaan voor zover bekend op dit moment geen algoritmes.

### VERDIEP DE KOSTEN EN BATEN VAN SLIM LADEN

Voor de kosten van slim laden zijn in deze studie aannames gedaan. Diepgaande studies hierna ontbreken nog. Om een betere uitspraak te doen over de kosten en baten van slim laden is een onderzoek hiernaar aan te bevelen.

### VERDIEP OP TOEGEVOEGDE WAARDE VOOR INVESTERINGEN IN DUURZAME ENERGIE

Toepassing van slim laden kan zorgen voor meer laden op momenten dat duurzame energie beschikbaar is. Het duurzaam laden stuurt hierop door te sturen op CO<sub>2</sub>-uitstoot (die laag is als veel duurzame energie beschikbaar is) en toont indirecte effecten op de energiemarkt. Die kunnen bij diepere energiemarkt analyses beter worden onderzocht. De verwachting is dat slim laden zorgt voor het beter benutten van duurzame energieproductie waardoor de economische waarde, en bereidheid om te investeren, toeneemt.

## COLOFON

---

Deze studie is opgesteld in opdracht van Enpuls door APPM en CE Delft. Wij spreken onze dank uit voor de bijdragen van de Hogeschool van Amsterdam en ElaadNL.

Rotterdam, maart 2019

### ENPULS

Enpuls is onderdeel van Enexis Groep en heeft als doel nieuwe ontwikkelingen in de energietransitie te ontwikkelen en versnellen. Enpuls onderzoekt, initieert en ondersteunt nieuwe producten en concepten die bijdragen aan de energietransitie.

### CE DELFT

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. In dit onderzoek heeft CE Delft de toekomstige scenario's doorgerekend (productie elektriciteit, netbelasting) en de effecten bepaald (CO<sub>2</sub>-uitstoot, netbelasting, kosten).

### APPM

APPM is een onafhankelijk projectmanagement- en adviesbureau gericht op de ruimtelijke leefomgeving met expertise op specifieke thema's, waaronder elektrisch vervoer, laadinfrastructuur en slim laden. APPM heeft in dit onderzoek de projectleiding, analyse van de maatschappelijke kosten en baten en inhoudelijke expertise voor toepassing van slim laden verzorgd.

### HOGESCHOOL VAN AMSTERDAM (HVA)

Het UrbanTechnology onderzoeksprogramma van de Hogeschool van Amsterdam voert praktijkgericht onderzoek naar de energietransitie uit. Onderzoek richt zich o.a. naar laadgedrag op publieke laadinfrastructuur, waarbij gebruik wordt gemaakt van een unieke dataset beschikbaar gesteld door de G4 en MRA-E. Deze dataset is in dit onderzoek gebruikt om een analyse te doen op de effecten van het slim laden van elektrische voertuigen. Tevens heeft HvA de simulaties van het slim laden uitgevoerd onder de toekomstscenario's.

### ELAADNL

Kennis- en innovatiecentrum ElaadNL onderzoekt en test de mogelijkheden voor Smart Charging: elektrische auto's betrouwbaar, betaalbaar en duurzaam opladen. ElaadNL stelde een prognose en verwachting op voor het verwachte laadgedrag van elektrische voertuigen in 2030. Op 18 april 2018 opende staatssecretaris Van Veldhoven het testplein van ElaadNL in Arnhem.

### ENPULS

(onderdeel Enexis Groep)

Willem Alting Siberg  
Allard Haarman

### APPM

Bas Scholten  
Harm-Jan Idema

### CE DELFT

Maarten Afman  
Thijs Scholten

### HVA

Robert van den Hoed  
Jeroen Groot

### ELAADNL

Ruud Noordijk  
Gijs van der Poel  
Nazir Refa

**Beeld:** Bas Stoffelsen,  
Living Lab Smart Charging  
**Ontwerp:** Hope & Glory

## 7. BIJLAGES

### BIJLAGE 1: SPREIDING IN DE EFFECTEN

#### Duurzaam laden (sturen op CO<sub>2</sub>)

De modelberekeningen zijn uitgevoerd met verschillende weerjaren (2013, 2014 en 2015) om gevoeligheden in beeld te brengen. Onderstaande tabel geeft de spreiding van de resultaten (laag, gemiddeld, hoog) weer.

	Laag	Gemiddeld	Hoog
CO <sub>2</sub> -uitstoot	- 0,31 Mton (-18,8%)/jr - € 8,70 per EV/jr	- 0,31 Mton (-19,1%)/jr - € 8,90 per EV/jr	- 0,31 Mton (-19,8%)/jr - € 9,0 per EV/jr
Stroomprijs EV-rijder	- € 51,9 per EV/jr	- € 50,3 per EV/jr	- € 50,4 per EV/jr
Stroomprijs groothandelsmarkt	- € 45,8 per EV/jr	- € 46,9 per EV/jr	- € 49,4 per EV/jr
Netinvesteringen	+ 2.620 MW piek + € 33 per EV/jr	+ 2.877 MW piek + € 37 per EV/jr	+ 3.314 MW piek + € 42 per EV/jr

#### Gespreid laden (sturen op netbelasting)

De modelberekeningen zijn uitgevoerd met verschillende weerjaren (2013, 2014 en 2015) om gevoeligheden in beeld te brengen. Onderstaande tabel geeft de spreiding van de resultaten (laag, gemiddeld, hoog) weer.

	Laag	Gemiddeld	Hoog
CO <sub>2</sub> -uitstoot	- 0,16 Mton (-10,4%)/jr - € 4,7 per EV/jr	- 0,18 Mton (-11%)/jr - € 5,0 per EV/jr	- 0,19 (-11,3%)/jr - € 5,5 per EV/jr
Stroomprijs EV-rijder	- € 40,4 per EV/jr	- € 42,0 per EV/jr	- € 42,8 per EV/jr
Stroomprijs groothandelsmarkt	- € 38,1 per EV/jr	- € 39,6 per EV/jr	- € 40,4 per EV/jr
Netinvesteringen	- 2.094 MW piek - € 25 per EV/jr	- 2.012 MW piek - € 26 per EV/jr	- 1.918 MW piek - € 27 per EV/jr

## BIJLAGE 2: TOELICHTING WELVAARTSEFFECTEN

De ‘verkenning MKBA werkwijzer Energie’ (Koopmans, Mulder en Tieben, 2018) bevat enige wenken hoe mogelijk om te gaan met de effecten op het energiesysteem in MKBA’s, als opmaat naar een nog nader op te stellen werkwijzer Energie. Een dergelijke werkwijzer zou een vastgestelde invulling bieden, gericht op Energie-MKBA’s, die dan een aanvulling is op de algemene leidraad MKBA van CPB en PBL (Romijn en Renes, 2013) en de werkwijzer Milieu (De Bruyn et al, 2017). Daarom is de verkenning een relevant stuk. De verkenning behandelt een aantal mogelijke thema’s en effecten globaal. Hoewel er niet heel concreet toepasbare methoden worden geschetst, wordt er wel aangegeven in welke richting oplossingen moeten worden gezocht.

De verkenning maakt onderscheid tussen effecten voor de voorzieningszekerheid, de flexibiliteit en de leveringszekerheid.

- Voorzieningszekerheid gaat over het beschikbaar zijn van voldoende energiebronnen (olievoorraden, elektriciteitscentrales, etc.) tegen - economisch gezien - ‘redelijke’ prijzen. Redelijke prijzen kunnen hoog of laag zijn, al naar gelang de markt nodig heeft om op een zinnige termijn te reageren op veranderingen in de markt (vraag en aanbod). Denk aan voldoende hoge prijzen om een investeringsprikkel te geven aan producenten.
- Bij flexibiliteit gaat het om het op elkaar afstemmen van vraag en aanbod naar energie op kortetermijnbasis (bv. minuten). Dit koppelt aan voorzieningszekerheid maar betreft vooral de korte termijn. Dit is binnen elektriciteitsmarkten een onderwerp dat extra van belang is vanwege de ontwikkelingen in hernieuwbare energie, die de vraag naar flexibiliteit vergroot.
- Leveringszekerheid wordt vooral ingestoken vanuit de ononderbroken beschikbaarheid van de levering via de energienetten, zodat de energiebronnen ook daadwerkelijk beschikbaar zijn bij de eindverbruiker.

### EFFECTEN OP VOORZIENINGSZEKERHEID

Slim laden van elektrische auto’s is niet in de eerste plaats bedoeld om vraagstukken ten aanzien van voorzieningszekerheid te ondervangen. Er kunnen effecten zijn van het introduceren van elektrisch rijden op de nationale voorzieningszekerheid, via de verminderde afhankelijkheid van olie, maar dat effect is er dan ook bij ‘regulier laden’. Effecten van slim laden op de verbeterde beschikbaarheid van elektriciteitscentrales vallen meer onder de noemer flexibiliteit.

De Verkenning werkwijzer Energie geeft richtlijnen over hoe een effect op voorzieningszekerheid via een effect op de prijsvolatiliteit van energie in beeld kan worden gebracht. Als een maatregel effect heeft op de energieprijzen zodat deze minder volatiel worden, dan kan er sprake zijn van welvaartswinst. Volatiliteit - in het bijzonder als volatiliteit niet goed te voorspellen is - vergt immers diverse kostbare risicomangementstrategieën. Hoewel het kwantificeren van het effect van een maatregel op de onvoorspelbare volatiliteit aanknopingspunten biedt, gaat een duiding hiervan binnen de aanpak van deze studie te ver. Wel hebben we gekeken naar de effecten op een eenvoudiger metriek van volatiliteit, de standaarddeviatie van de prijs, en de introductie van slim laden heeft een effect hierop: deze daalt, jaargemiddeld zo’n 3%.

### EFFECTEN OP FLEXIBILITEIT

Door slim laden zal er geladen worden op het moment dat de prijzen op de elektriciteitsmarkt anders zijn, en waarschijnlijk lager. Dat kan welvaartseffecten tot gevolg hebben, aangezien consumenten- en producentensurplus anders komen te liggen. Kwantificeren van consumentensurplus op de stroommarkt onder de scenario’s wordt echter een te ingewikkelde en onzekere benadering. Dit komt enerzijds omdat het om zeer grote surplussen gaat. De kortetermijnvraag is zeer beperkt elastisch en kent dus een typisch zeer steile vraagcurve. Dit leidt tot een zeer groot consumentensurplus bij alle regulier optredende prijzen. Anderzijds is kwantificering ook onzeker omdat de elasticiteiten niet exact bekend zijn en aan veranderingen onderhevig.

De Verkenning werkwijzer Energie geeft eenvoudige aanknopingspunten voor het kwantificeren van welvaartseffecten, via het analyseren van het effect op de kosten om het systeem van vraag en aanbod in balans te houden. Het gebruikte elektriciteitsmarkt-simulatiemodel van CE Delft berekent de meest kostenefficiënte allocatie van productiemiddelen om te voldoen aan de vraag voor alle uren van het jaar. De uurlijkse elektriciteitsprijs die het model produceert, is de evenwichtsprijs waartegen de inzet van productiemiddelen kostenoptimaal is. Daarom kunnen wij effecten op flexibiliteit beschouwen via een effect op de gesimuleerde uurlijkse elektriciteitsprijzen, en hoe de introductie van slim laden van EV's het optreden van hoge en lage prijzen verandert ten opzichte van de situatie van regulier laden. Wij beschouwen het effect op de gesimuleerde prijzen als een verschil in kosten om het systeem in balans te houden.

Dat dit relevant is, betogen we door nog twee punten aan te stippen die spelen op de elektriciteitsmarkt. De verregaande introductie van hernieuwbare elektriciteit die is voorzien in het Klimaatakkoord zal het adresseren van deze zaken belangrijker maken. Dit zijn:

- Momenteel zijn veel eindgebruikers afgeschermd van tijdsveranderlijke elektriciteitsprijzen. Deze informatieachterstand leidt tot gedrag dat extra kosten veroorzaakt aan de kant van de elektriciteitsproducenten om vraag en aanbod in balans te houden. Effecten op deze kosten kunnen een welvaartseffect zijn.
- De elektriciteitsmarkt is een serie aan separate markten op verschillende tijdschalen (termijn markt, day ahead, intraday, onbalansmarkten). Deze markten verschillen in eisen t.a.v. deelname en in deelnemers. Naarmate men dichterbij het moment van levering komt is het aantal marktdeelnemers geringer. Hiermee ontstaat ook een verschil in allocatieve efficiëntie tussen de verschillende markten. Er zijn studies gedaan naar de welvaartseffecten van het verbeteren van de toegang tot de kortetermijnmarkten. Dit is ook een thema dat de aandacht heeft van TSO's. Door meer partijen toe te laten, kunnen deze markten tot efficiëntere uitkomsten leiden.

Wij stellen dat elektrische auto's die slim laden, desnoods via aggregators, op meerdere kortetermijnmarkten kunnen acteren, dat deze de liquiditeit van die markten vergroten, bijdragen aan het efficiënt functioneren van die kortetermijnmarkten, en kosten verminderen die andere marktpartijen (de elektriciteitsproducenten) moeten maken. Om deze redenen zien we de kosteneffecten op de inzet van centrales als een welvaartseffect dat we mee mogen tellen in de MKBA.

### LEVERINGSZEKERHEID EN INVESTERINGEN IN ELEKTRICITEITSNETTEN

In dit onderzoek kwantificeren we effecten op de vermeden netinvesteringen. Deze netinvesteringen zijn in het nulalternatief en in de projectalternatieven in verschillende mate van toepassing in verband met het verwachte optreden van congestie (knelpunten in de transportcapaciteit), gedreven door enerzijds de vraag naar laadinfrastructuur voor EV's en anderzijds door de transportvraag van zon-PV in laagspanningsnetten en (niet in de studie gekwantificeerd) ook in verband met elektrische warmtepompen. Onder de huidige regulering moeten netbeheerders congestie adresseren. Zij doen dit door de netten te verzwaren waar dat nodig is.

Effecten hierop zijn niet uitgewerkt in de Verkenning werkwijzer Energie, tenzij men congestie ziet als een effect dat mogelijk de leveringszekerheid of transportzekerheid bedreigt. Hoe dan ook, congestie is wel van invloed op de investeringen die netbeheerders moeten doen in het huidige landschap. Deze investeringen zijn maatschappelijke kosten en daarom nemen we baten van vermeden congestie en vermeden netinvesteringen mee in dit onderzoek.

