

# **Eindrapport Smart Planning**

-

TESG113003

Penvoerder: Enexis

Medeaanvragers: Alliander, Rendo, Stedin, TU Eindhoven

Periode 1-3-2014 – 28-2-2018

## Samenvatting

Nieuwe ontwikkelingen zoals de groei in het aantal elektrische auto's en warmtepompen en de sterke stijging van het aantal huishoudens met zonnepanelen hebben veel invloed op de belasting van de elektriciteitsnetten. Vooral de laagspanningsnetten ondervinden veel invloed van deze ontwikkelingen. In het project Smart Planning hebben Alliander, Enexis, Rendo, Stedin en de TU Eindhoven onderzocht wat de impact op de netten is van de genoemde ontwikkelingen. Ook is aandacht besteed aan mogelijke oplossingen, met speciale aandacht voor zog. Smart Grid oplossingen. Dit om te kunnen bepalen of en in hoeverre deze een interessant alternatief zijn voor conventionele verzwaringen.

Als eerste is onderzoek gedaan naar de huidige manier van netontwerp bij netbeheerders in Nederland, dit om een referentie te hebben bij het verdere onderzoek. Vervolgens zijn diverse scenario's ontwikkeld om meer zicht te krijgen op hoe de groei van zonnepanelen, elektrische auto's en warmtepompen zich kan ontwikkelen. Hierbij is veel aandacht besteed aan de geografische spreiding van deze ontwikkelingen: in het ene gebied zal het sneller gaan dan in het andere gebied. Op basis van de (locatiespecifieke) scenario's zijn vervolgens vermogenspatronen ontwikkeld. Dit om een goede indruk te hebben van het patroon van verbruik over een dag, om zodoende de piekmomenten op het spoor te komen. Wanneer deze patronen bekend zijn, kan vervolgens de impact op de netten bepaald worden. Hierbij is ook gekeken naar mogelijke oplossingen. Dat kan enerzijds conventionele verzwaring zijn, maar anderzijds kan er ook gebruik gemaakt worden van Smart Grid oplossingen. Voorbeelden van deze oplossingen zijn bijvoorbeeld vraagsturing (Demand-Side Management, DSM), opslag en regelbare transformatoren. Gebleken is dat toepassing van opslag of regelbare transformatoren een effectief alternatief kunnen zijn voor conventionele netverzwaringen, echter zijn de kosten hiervan niet per se lager. Door ze in combinatie met DSM te gebruiken kunnen de kosten aanzienlijk gereduceerd worden. Het project heeft veel nieuwe inzichten opgeleverd, en ook nieuwe tools die ingezet kunnen worden bij netbeheerders om meer inzicht te krijgen in de impact van nieuwe ontwikkelingen op het net en om te onderzoeken of Smart Grid oplossingen een goed alternatief zijn voor conventionele netverzwaringen.

## 1. Inleiding

Een groot aantal ontwikkelingen zorgt voor een sterk stijgende belasting van de elektriciteitsnetten in Nederland. Deze ontwikkelingen, zoals de groei in het aantal elektrische auto's en warmtepompen en de sterke stijging van het aantal huishoudens met zonnepanelen hebben grote invloed op de belasting van de laagspanningsnetten. Voor netbeheerders is het dan ook van belang om meer inzicht te krijgen op de groei van de genoemde ontwikkelingen. Hierbij is het vooral ook van belang dat bekend is waar deze ontwikkelingen zich voordoen. Hiermee kan op een fijnmazige manier bepaald worden waar zich knelpunten voor zullen doen. In het project Smart Planning is er een model ontwikkeld waarmee het effect van lokale ontwikkelingen op het lokale net onderzocht kan worden. De traditionele oplossing in geval van dreigende overbelasting van het elektriciteitsnet is het verzwaren van componenten zoals kabels of het aanleggen van extra kabels. Gezien de sterk stijgende belasting zal dit de komende jaren in forse investeringen resulteren. Om deze investeringen te reduceren wordt sterk ingezet op de toepassing van Smart Grids. Hiermee kan optimaal gebruik gemaakt worden van de flexibiliteit van aangesloten, en van andere componenten in het elektriciteitsnet, om de belasting op piekmomenten te verlagen om zodoende investeringen uit te stellen of zelfs te voorkomen. In het project Smart Planning is onderzoek gedaan naar de effectiviteit van deze 'slimme alternatieven' in het uitstellen of voorkomen van conventionele netverzwaringen.

Het voorliggende document bevat het eindverslag van het project Smart Planning. Als eerste wordt in hoofdstuk 2 ingegaan op het project zelf. Hoofdstuk 3 bevat het hoofddeel van het verslag. Hierin worden de belangrijkste resultaten van het onderzoek beschreven. Hoofdstuk 4 tenslotte gaat in op de uitvoering van het project.

## 2. Het project

### 2.1 Doelstelling

Het project Smart Planning had tot doel om inzicht te verkrijgen in de baten van Smart Grids voor een efficiënte en effectieve uitrol van Smart Grid in Nederland waarbij netcapaciteit en flexibiliteit van aangeslotenen optimaal worden uitgenut door gebruikers, leveranciers en netbeheerders.

### 2.2 Werkwijze

Het project is opgedeeld in een aantal fases. Deze worden hieronder kort beschreven.

#### *Vooronderzoek*

Het project is gestart met een vooronderzoek waarin een literatuurstudie is gedaan naar de huidige wijze van het plannen van laagspanningsnetten. Ook is hierbij uitgebreid stilgestaan bij manieren van belastingmodellering, spreidingsmodellen en wiskundige manieren om netwerksimulaties te vereenvoudigen en/of versnellen. Naast een literatuurstudie naar netwerkplanning in het algemeen is er ook specifiek gekeken naar de manieren van planning bij de deelnemende netbeheerders. Hiertoe heeft de promovendus bij alle netbeheerders een aantal weken / maanden 'stage' gelopen om zodoende meer inzicht te krijgen in de manier van werken.

#### *Scenario's*

Om meer inzicht te krijgen in toekomstige netwerkplanning, en de rol die smart grids daarbij kunnen spelen, is het van belang om meer te weten over hoe vraag en aanbod zich zullen ontwikkelen. Uiteraard is het onmogelijk om deze toekomst te voorspellen en daarom wordt er gewerkt met scenario's die mogelijke toekomstbeelden representeren. Scenario's zijn over het algemeen niet locatiespecifiek. D.w.z. dat meestal uitgaan van een uniforme spreiding over het land, of een bepaald gebied, van de ontwikkelingen. In de praktijk zal dat echter niet zo zijn. De ene wijk in een stad zal bijvoorbeeld veel meer elektrische auto's of zonnepanelen krijgen dan de andere wijk. Daarom is ook veel aandacht gegeven aan spreidingsmodellen, waarmee een betere schatting gemaakt kan worden van de toekomstige verdeling van ontwikkelingen.

#### *Modelleren van vraag- en aanbodscenario's*

Nadat de locatiespecifieke scenario's bekend zijn, is de volgende stap het omzetten hiervan naar vermogenspatronen. Bij scenario's gaat het meestal om ontwikkeling in de energievraag. Voor netstudies is echter de vermogensvraag, en het profiel hiervan over een dag, van belang. Om dit te bereiken zijn diverse wiskundige methodieken ingezet om tot goede vermogensprofielen te kunnen komen.

#### *Toepassen van scenario's op de netten*

De scenario's en de vermogensprofielen die in de vorige onderdelen ontwikkeld zijn, zijn in de laatste fase losgelaten op een aantal netten om de impact van de toekomstige netten te kunnen bepalen. Daarna is ook gekeken naar mogelijke oplosrichtingen. Dat kan enerzijds conventionele verzwaring zijn, maar anderzijds kan er ook gebruik gemaakt worden van smart grid oplossingen. Hierbij is onder andere gekeken naar de toepassing van smart agent

technology. Door vervolgens beide oplosrichtingen te vergelijken is meer inzicht gekregen in de kosteneffectiviteit van smart grids.

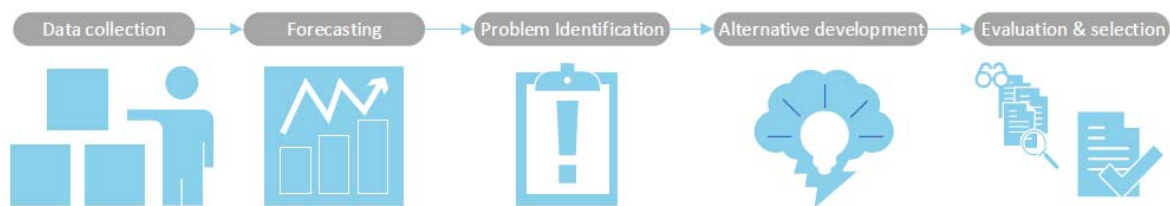
### 3. Resultaten

In dit onderdeel van het rapport wordt een samenvatting gegeven van de belangrijkste resultaten van het onderzoek. Als eerste zal aandacht gegeven worden aan de huidige manier van netplanning bij de beheerders van laag- en middenspanningsnetten in Nederland. Daarna wordt ingegaan op het toepassen van scenario's en met name het modelleren daarvan. Tot slot wordt ingegaan op de manier waarop de impact op de netten bepaald wordt, en wat de uitkomsten daarvan. De nadruk in dit rapport ligt op de laagspanningsnetten. Voor middenspanningsnetten is echter een soortgelijke aanpak mogelijk.

#### 3.1 Plannen van laagspanningsnetten

In deze paragraaf wordt kort ingegaan op de huidige wijze van het plannen van laagspanningsnetten in Nederland. Dit als basis voor de volgende paragrafen waar gekeken wordt naar nieuwe ontwikkelingen en de (veranderende) eisen die dit stelt aan de planning van de laagspanningsnetten.

Conceptueel kan het planningsproces in 5 fases opgedeeld worden, zoals te zien is in onderstaande figuur. Op elk van de 5 stappen wordt kort ingegaan.



Figuur 3.1. Conceptuele weergave van het planningsproces van LS-netten.

##### *Data collection*

Om adequaat netten te plannen en ontwerpen is het in de eerste plaats van belang om over de juiste data te beschikken. Deze informatie wordt door netwerkbeheerders uit zowel interne als externe bronnen verzameld. Een van de belangrijkste bronnen hierbij is de informatie die gemeentes verstrekken over de plannen die zij hebben m.b.t. het ontwikkelen van nieuwe woonwijken, industriegebieden, etc. Ook wordt er soms gebruik gemaakt van meetdata, hoewel die voor de laagspanningsnetten meestal maar op een beperkt aantal locaties beschikbaar is.

##### *Forecasting*

Het voorspellen van de toekomstige belasting wordt vooral gedaan door het extrapoleren van de ontwikkeling in het verleden. Dit wordt dan gecombineerd met de informatie van gemeentes, zoals die hierboven beschreven staat.

Uitgangspunt voor de planning is de piekbelasting zoals die gemeten is in de afgelopen jaren. Hier bovenop wordt een jaarlijkse groei van zo'n 1-2% aangenomen. Zeker in de laagspanningsnetten passen netbeheerders over het algemeen een 'fit-and-forget' benadering toe. Dat betekent dat netten dusdanig ontworpen worden dat ze voor vele tientallen jaren voldoende capaciteit hebben. Met de langzame groei van 1-2% was dat in het

verleden altijd vrij eenvoudig te realiseren. Met de opkomst van nieuwe ontwikkelingen wordt dit veel moeilijker en kan het zijn dat de netten veel sneller hun limiet bereiken.

#### *Problem identification*

Met behulp van de ontwikkelde scenario's worden de bestaande LS-netten geanalyseerd en wordt gekeken of er knelpunten ontstaan. Analyse van de bestaande netten gebeurt veelal door het doen van load-flow berekeningen. Hiermee wordt nagegaan over er door de nieuwe ontwikkelingen knelpunten ontstaan zoals een te hoge belasting of een te lage of te hoge spanning.

#### *Development of alternatives*

Wanneer duidelijk is dat er knelpunten zijn worden alternatieven ontwikkeld die als oplossing kunnen dienen. Standaard oplossingen zijn over het algemeen het leggen van nieuwe kabels, het verzwaren van een MS/LS transformator of het plaatsen van een nieuw MS/LS station. Bij deze alternatieven is standaardisatie vaak een belangrijk item. Om duidelijkheid naar de toekomst te creëren streven netbeheerders veelal naar overzichtelijke en eenvoudige netstructuren. Ook wordt gebruik gemaakt van een beperkt aantal kabeldiameters en een beperkte aantal typen MS/LS transformator.

#### *Alternative evaluation and selection*

Nadat mogelijke oplossingen zijn geïdentificeerd worden deze met elkaar vergeleken. Criteria hierbij zijn de kosten, de snelheid van realisatie, de betrouwbaarheid en de robuustheid naar de toekomst. Voor de verschillende oplossingen worden deze tegen elkaar afgewogen, waarna de oplossing die het beste scoort gekozen wordt.

## 3.2 Scenario modellering

### 3.2.1. Inleiding

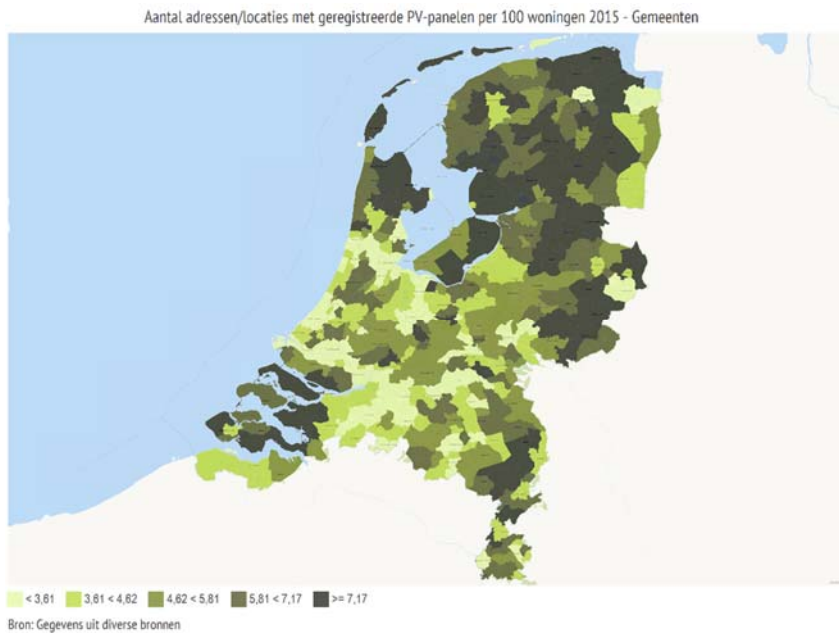
De energietransitie begint steeds meer op stoom te komen. Er is sprake van een versnelling van duurzame ontwikkelingen. Zowel op grootschalig niveau als ook op kleinere schaal: bijvoorbeeld het toepassen van warmtepompen en zonnepanelen. Ook het aantal elektrische auto's blijft stijgen. Al deze ontwikkelingen hebben forse invloed op de productie en het verbruik van energie. Zo kunnen zonnepanelen leiden tot een omkering van de energiestroom in het elektriciteitsnet, die ertoe kan leiden dat de spanning in het net te hoog oploopt. Elektrische auto's leiden tot een forse verhoging van de piekvraag naar elektriciteit, wat een tekort aan netcapaciteit tot gevolg kan hebben. En wanneer in woonwijken waar de bewoners niet de beschikking hebben over een parkeerplaats op eigen terrein het aantal elektrische auto's flink toeneemt, geldt dat ook voor de behoefte aan oplaadpunten in de openbare ruimte. Elektrische warmtepompen leiden tot een daling van het gasverbruik en een stijging van het elektriciteitsverbruik. Om op dergelijke ontwikkelingen tijdig te kunnen inspelen, en zo te voorkomen dat er belemmeringen ontstaan voor de transitie naar een duurzamer energiesysteem, is het noodzakelijk om de snelheid van de energietransitie niet alleen op nationaal, maar ook op lokaal niveau te kunnen voorstellen.

### 3.2.2 Lokatiespecifieke informatie

Om inzicht te krijgen in de consequenties van de verduurzaming van het energiesysteem worden vaak scenariostudies toegepast. Daarin worden verschillende scenario's gedefinieerd en geanalyseerd. Zo wordt de toekomst verkend door een inschatting te maken van het tempo waarin verschillende ontwikkelingen zich manifesteren en van de onzekerheidsmarges in deze inschattingen. Op basis daarvan kan vervolgens een beeld worden geschetst van de gevolgen van deze ontwikkelingen en de onzekerheden die daarbij aan de orde zijn. Scenario's worden veelal op nationaal niveau gedefinieerd. Factoren die daarbij een belangrijke rol spelen zijn bijvoorbeeld het totale energieverbruik, de spreiding van dat verbruik over verschillende energiedragers (elektriciteit, gas, warmte), het aandeel hernieuwbare energie, de verhouding tussen centrale, grootschalige en kleinschalige, decentrale productie of de te bereiken reductie van de CO<sub>2</sub> uitstoot. Op basis van de kenmerken van het scenario kan vervolgens de penetratiegraad van verschillende technologische oplossingen worden bepaald. Aan de hand daarvan kunnen vervolgens de consequenties van het scenario worden geanalyseerd op verschillende vlakken, zoals bijvoorbeeld de kosten, de vereiste subsidies, het ruimtebeslag op land en/of op zee en de benodigde investeringen in de energienetten.

Omdat in dergelijke studies scenario's worden gedefinieerd op nationale schaal, leiden ze logischerwijs tot uitspraken en inzichten die betrekking hebben op Nederland als geheel. Voor besluitvorming en vervolgacties op een meer lokale schaal geven ze echter weinig houvast terwijl de lokale variatie aanzienlijk kan zijn. Dit blijkt duidelijk uit figuur 3.1, waarin het aantal geregistreerde PV-panelen per 100 woningen is weergegeven per gemeente. Voor bepaalde partijen, zoals de rijksoverheid, commerciële energiebedrijven en banken is inzicht op nationale schaal voldoende. Voor andere partijen, zoals lokale overheden, projectontwikkelaars en netbeheerders is echter meer geografische detaillering vereist. Voor een netbeheerder die bijvoorbeeld wil weten waar de toekomstige knelpunten in zijn net optreden, of een gemeente die wil overgaan tot het plaatsen van oplaadpunten en daar de meest geschikte locaties voor zoekt, is het belangrijk om niet alleen te weten *welke* ontwikkelingen zich voordoen, maar ook *waar* deze zich voordoen. Want dat er tussen specifieke locaties grote verschillen kunnen zijn, blijkt uit figuur 3.1.





*Figuur 3.1. Verschillen in lokale penetratieniveaus van zonnepanelen*

In het Smart Planning project zijn methoden ontwikkeld die meer grip te krijgen op het ontwikkelingstempo en de penetratiegraad van nieuwe technologie op specifieke locaties. Kernpunt daarbij is dat de relevante karakteristieken van deze locaties worden verdisconteerd. Te denken valt daarbij aan het binnen een bepaald gebied beschikbaar dakoppervlak en de oriëntatie daarvan. Dit is van grote invloed op de hoeveelheid zonnepanelen die kan worden geïnstalleerd. Het gemiddelde inkomen in het betreffende gebied zal daarop echter ook van invloed zijn. Dat beïnvloedt dan ook weer de verwachting van het aantal elektrische auto's. Want naarmate het inkomen hoger is, zullen mensen gemiddeld in jongere en in duurdere auto's rijden. De kans dat zo'n jongere en duurdere auto mettertijd een elektrische auto betreft, is groter dan dat mensen die in goedkopere en oudere auto's rijden elektrisch gaan rijden. Door relevante locatiespecifieke gegevens te relateren aan de historische ontwikkelingen op het vlak van nieuwe technologie, wordt het mogelijk om uitspraken te doen over de verwachte toekomstige ontwikkelingen. Het kader voor de locatiespecifieke ontwikkelingen wordt daarbij gevormd door het gekozen scenario op nationaal niveau. Concreet: wanneer voor geheel Nederland een bepaald volume aan zonnepanelen wordt verondersteld, dan kan het totaal van de lokaal geïnstalleerde volumes niet hoger worden dan het veronderstelde volume op nationaal niveau.

Naarmate op nationaal niveau meer zonnepanelen en elektrische auto's worden verondersteld, zullen ze op lokaal niveau ook meer voor (moeten) komen omdat anders de nationale verwachting niet wordt ingevuld. Tegelijk blijft gelden dat op bepaalde locaties de ontwikkelingen sneller zullen gaan dan op andere locaties als gevolg van locatiespecifieke factoren. Belangrijke aanname in het Smart Planning project is dat de invloed van deze locatiespecifieke factoren onafhankelijk is van het gekozen energiescenario op nationale schaal. Met andere woorden: of er in het nationale energiescenario nu meer of minder zonnepanelen worden voorzien, de kans dat zonnepanelen worden geïnstalleerd op een dakvlak met een gunstige oriëntatie op het zuiden door een bewoner met een bovengemiddeld inkomen blijft groter dan dat een bewoner met een lager inkomen en een dak op het noorden zonnepanelen zal aanschaffen en installeren. Doel van het Smart

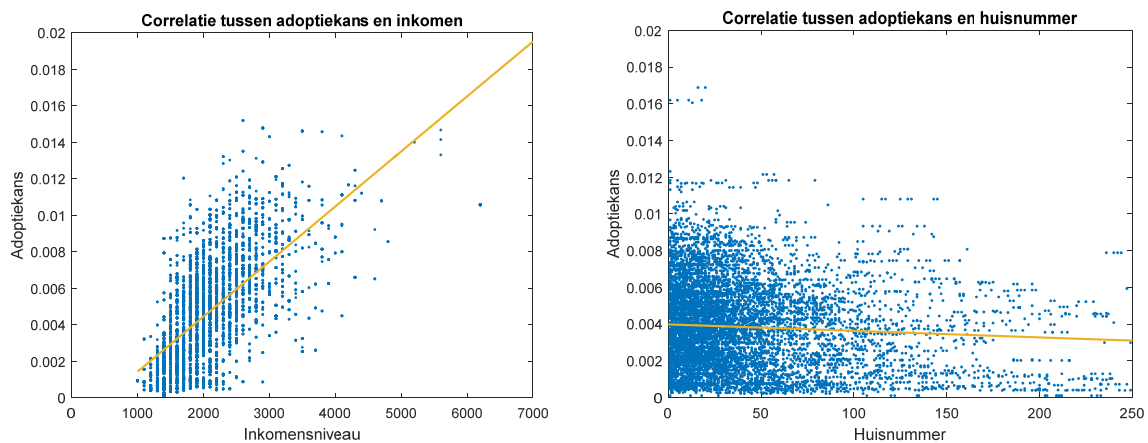
Planning project is om de koppeling te maken tussen enerzijds het nationale niveau en anderzijds specifieke locaties met hun eigen karakteristieken.

### 3.2.3. Methodologie

Om het verband te bepalen tussen het tempo van adoptie van verschillende nieuwe technologieën en relevante locatiespecifieke factoren wordt gebruik gemaakt van de statistische methode van *regressie analyse*. Hiermee kan een model gemaakt worden dat de samenhang, ofwel de ‘correlatie’ beschrijft tussen verschillende zogenoemde inputs, de zogenaamde ‘verklarende variabelen’ en een bepaalde uitkomst, de ‘afhankelijke variabele’. Voor de ontwikkeling van het model worden bestaande gegevens benut. Daarmee wordt onderzocht of er een correlatie bestaat tussen verschillende verklarende variabelen en de uitkomst, en zo ja, hoe sterk deze correlatie dan is. Wanneer de correlaties op basis van bestaande data zijn bepaald, kan het model vervolgens ook op andere situaties worden toegepast. Bijvoorbeeld situaties waarvoor geldt dat de verklarende variabelen bekend zijn, maar de afhankelijke variabele niet bekend is. Of toekomstige situaties.

### Zonnepanelen

Om het verband te bepalen tussen de invloed van verschillende kenmerken op de kans dat een huishouden zonnepanelen heeft worden de kenmerken van huishoudens met zonnepanelen vergeleken met die van huishoudens zonder zonnepanelen. Vervolgens geldt dan in nieuwe situaties, waarvoor geen gegevens over het aantal zonnepanelen bekend zijn, maar de kenmerken van de huishoudens wel, dat huishoudens met kenmerken die lijken op die van huishoudens met zonnepanelen een hogere kans krijgen toegewezen dat zij overgaan tot aanschaf van een eigen pv-systeem. Zo blijken bijvoorbeeld de huishoudensamenstelling, omgevings-adressendichtheid en het gemiddeld inkomen een statisch relevante correlatie te hebben met de aanwezigheid van zonnepanelen. Woningbezitters met pv hebben over het algemeen een wat hoger dan gemiddeld inkomen, zijn van bovengemiddelde leeftijd, en wonen vaker in gebieden die wat minder dicht bebouwd zijn. In figuur 3 is links de relatie tussen de adoptiekans en het inkomensniveau weergegeven. Rechts staat de relatie tussen de adoptiekans en het huisnummer weergegeven. Zoals mag worden verwacht zijn inkomensniveau en adoptiekans wel gecorreleerd en huisnummer en adoptiekans niet.



Figuur 2.2. Correlaties tussen adoptiekans en respectievelijk inkomen en huisnummer

Om met dit soort methoden tot betrouwbare resultaten te komen zijn veel gegevens vereist. Als gevolg van de ontwikkeling richting open data komen er steeds meer bruikbare gegevens beschikbaar. Zo beheert het Kadaster de Basisregistraties Adressen en Gebouwen (BAG), waarin gegevens van alle adressen en gebouwen in Nederland te vinden zijn zoals o.a. bouwjaar, oppervlakte, geometrische gegevens en het gebruiksdoel. Deze kunnen weer gekoppeld worden aan bijvoorbeeld de socio-demografische gegevens 'kerncijfers postcodegebieden' van het CBS. Hierin staan per postcodegebied gegevens over o.a. de samenstelling van huishoudens en de leeftijd van de bewoners, maar ook de mate van verstedelijking, de gemiddelde WOZ-waarde en het gemiddeld inkomen van de bewoners van het gebied. Om uit dit soort gegevens conclusies te kunnen trekken over adoptiekansen van zonnepanelen kijken we vervolgens naar de huidige verdeling van zonnepanelen over de gebouwen in Nederland. In 2011 is het productie-installatie register (PIR) opgericht, een database die beheert wordt door Netbeheer Nederland waarin consumenten hun zonnepanelen (en eventuele andere energie opwekkers) kunnen aanmelden. De gegevens hierin geven een goed beeld van de huidige verdeling van geïnstalleerde zonnepanelen in Nederland. In figuur 4 wordt links de verdeling van zonnepanelen in een wijk in Nederland weergegeven; rechts in de figuur staan de met het model voorspelde bijbehorende adoptiekansen per woning.



*Figuur 2.3. Huidige verdeling zonnepanelen (links) en bijbehorende adoptiekansen uit het model (rechts)*

### **Elektrisch vervoer en warmtepompen**

In de voorgaande paragraaf is uitvoerig beschreven hoe de spreidingsmodellen voor PV ontwikkeld zijn. Op een soortgelijke manier zijn ook modellen voor de geografische spreiding van elektrische vervoer (EV) en warmtepompen opgesteld. Dit wordt in deze paragraaf nog kort besproken.

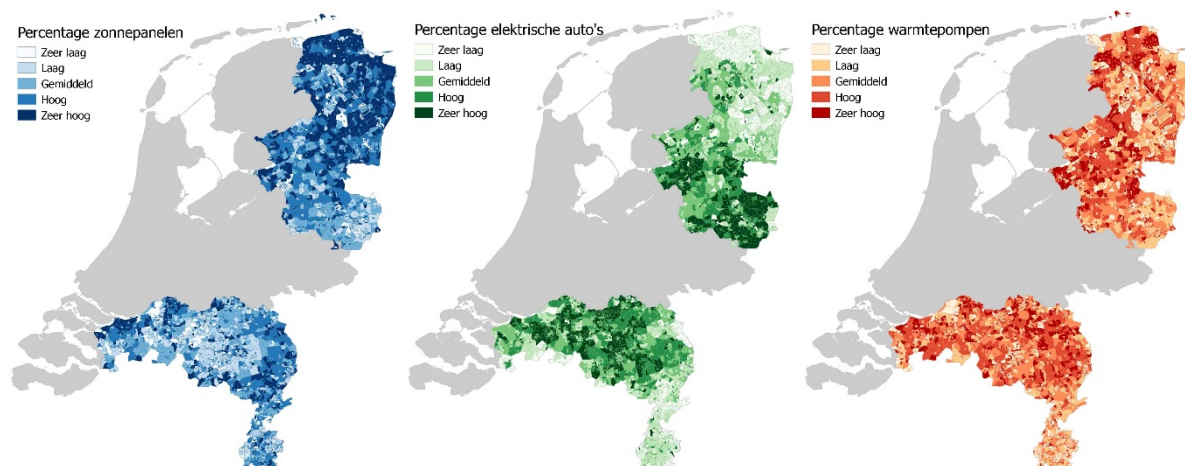
Installaties voor PV komen al in grote aantallen voor. Het aandeel elektrische auto's is echter nog veel kleiner. Ook is hiervan minder (open) data beschikbaar. Daarom worden de spreidingsmodellen deels op een andere manier opgebouwd. Omdat er nog relatieve weinig

elektrische auto's zijn, zullen er veel gebieden zijn waar nog geen, of slechts een heel beperkt aantal, elektrisch auto's zijn. Dit maakt het lastig om regressiemethoden toe te passen omdat deze een minimale set aan aanwezige elektrische auto's nodig hebben. Daarom is er gewerkt met het aantal elektrische auto's per gemeente, waarna gewerkt is met een kansverdeling om uiteindelijk weer per huishouden een kans te krijgen op de aanwezigheid van elektrische auto's.

Voor warmtepompen is vrijwel geen informatie beschikbaar over de graad van adoptie en de regionale spreiding. Om hier toch iets over te kunnen zeggen is er gebruik gemaakt van een studie van de OESO waarin onderzoek gedaan is naar gedrag op huishoudelijk niveau. In dit onderzoek zijn 12.000 mensen geïnterviewd, waaronder ook een groot aantal in Nederland. In het interview werden mensen o.a. gevraagd naar hun gebruik van hernieuwbare bronnen en ook toepassing van bijvoorbeeld warmtepompen. Op de uitkomsten van het onderzoek is een lineaire regressie toegepast om vast te stellen welke parameters de belangrijkste bijdrage leveren aan de adoptie van warmtepompen.

## Resultaat

In het voorgaande is beschreven hoe spreidingsmodellen ontwikkeld zijn voor de drie meest belangrijke ontwikkelingen. Met deze modellen is het mogelijk om voor deze technologieën de locatiespecifieke effecten te bestuderen. In onderstaande figuur zijn voorbeelden gegeven van de verwachte geografische groei van de drie verschillende technologieën. Deze zijn hier toegepast op het netgebied van Enexis.



*Figuur 2.4. Verwachte lokale groei van zonnepanelen, elektrische auto's en warmtepompen in het verzorgingsgebied van netbeheerder Enexis*

In de figuur is te zien dat het percentage huizen met zonnepanelen harder zal toenemen in de minder stedelijke gebieden, terwijl de adoptie van elektrische auto's (als percentage van het totaal aantal auto's in een wijk) zich juist meer concentreert in de buitenwijken van de grotere steden en de kleinere steden hieromheen.

## 3.3 Toepassing op netten

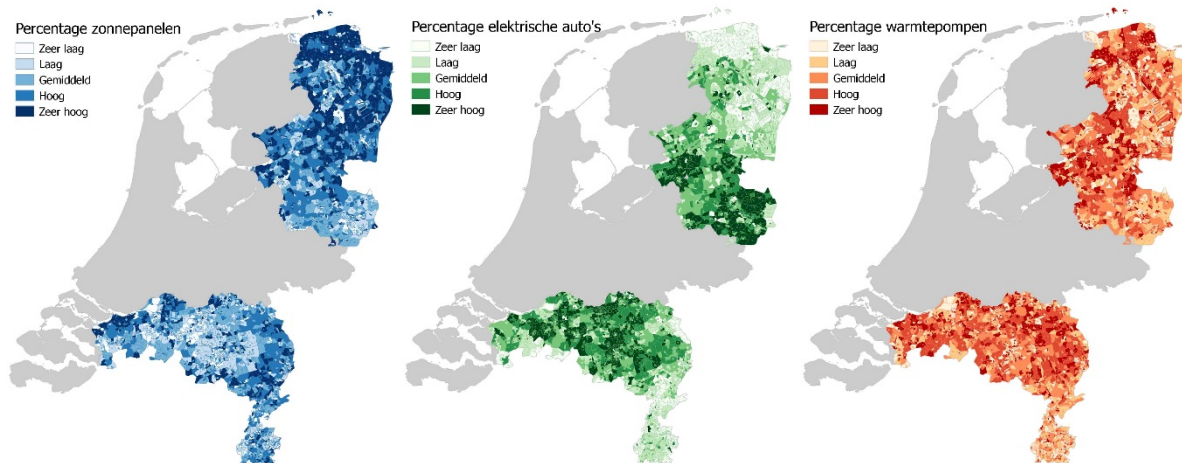
### 3.3.1. Inleiding

De groei van nieuwe ontwikkelingen zoals zonnepanelen, elektrisch vervoer en warmtepompen kunnen voor een forse extra (piek-)belasting van het elektriciteitsnet zorgen. Netbeheerders volgen deze ontwikkelingen nauwlettend, omdat het tempo waarin deze

technieken geadopteerd worden van groot belang is voor het plannen van de elektriciteits- en gasnetten. Netbeheerders hebben immers als kerntaak om ervoor te zorgen dat de (elektriciteits)netten ook in de toekomst kunnen voorzien in de behoefte aan energie. Daartoe moet de netcapaciteit voldoende zijn om in de bestaande elektriciteitsvraag te kunnen voorzien, nieuwe verbruikers zoals elektrische auto's en warmtepompen te bedienen en lokaal geproduceerde elektriciteit te kunnen afvoeren naar verbruikers elders.

Aangezien het tempo van de energietransitie lokaal flink kan verschillen, waardoor ook de impact op het net varieert, is het van belang om voor verschillende locaties specifieke voorspellingen te kunnen doen met betrekking tot de te verwachten ontwikkelingen. In de voorgaande paragraaf is beschreven hoe in het Smart Planning project methoden zijn ontwikkeld die inzicht geven in het ontwikkelingstempo en de penetratiegraad van nieuwe technologie op specifieke locaties. Door gedetailleerde gegevens van wijken en buurten te analyseren in relatie tot de lokale adoptiesnelheid van nieuwe energie-technologieën, kunnen relevante factoren en verbanden gevonden worden waarmee de adoptie van nieuwe technologieën op een specifieke locatie kan worden voorspeld.

Een resultaat van dit soort voorspellingen zien we bijvoorbeeld in *Figuur 1*, waar de verwachte groei van relevante technologieën is gevisualiseerd voor het verzorgingsgebied van regionale netbeheerder Enexis. Zo zien we bijvoorbeeld dat het percentage huizen met zonnepanelen harder zal toenemen in de minder stedelijke gebieden, terwijl de adoptie van elektrische auto's (als percentage van het totaal aantal auto's in een wijk) zich juist meer concentreert in de buitenwijken van de grotere steden en de kleinere steden hieromheen. De modellen bevestigen veelal wat intuïtief logisch lijkt, maar leveren kwantitatieve inzichten die voor een toekomstbestendige planning van de elektriciteitsnetten van grote waarde zijn.



*Figuur 1* Verwachte lokale groei van zonnepanelen, elektrische auto's en warmtepompen in het verzorgingsgebied van netbeheerder Enexis.

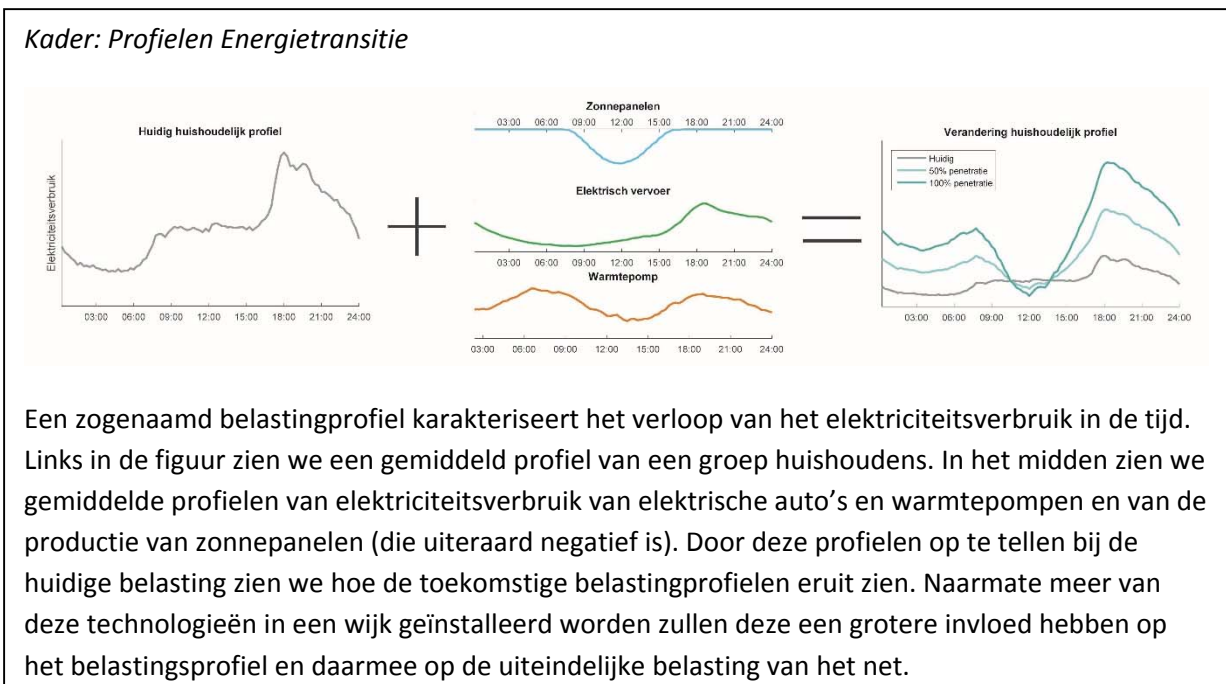
### 3.3.2. Belastingmodellering

Om de ontwikkelde transitie-scenario's voor specifieke locaties daadwerkelijk te kunnen toepassen in het planningsproces is nog een extra stap nodig, namelijk het vertalen van het verwachte penetratieniveau van deze nieuwe technieken naar de impact daarvan op het elektriciteitsnet.

Eén van de belangrijkste parameters in het planningsproces van de netbeheerders is de verwachte piekbelasting van het netwerk. Deze piekbelasting moet lager zijn dan de maximale

stroom die netcomponenten, zoals kabels of transformatoren, kunnen voeren. Om in te schatten of er – in elk geval voorlopig- voldoende netcapaciteit beschikbaar is, wordt een voorspelling gemaakt van de verwachte groei van het elektriciteitsverbruik in een bepaald gebied. Deze groei kan worden veroorzaakt door nieuwe aansluitingen op een bestaand net of door een stijging van elektriciteitsverbruik van bestaande afnemers. Meer dan 90% van de op het elektriciteitsnet aangesloten verbruikers zijn huishoudens, waarvan geldt dat het elektriciteitsverbruik substantieel zal veranderen als gevolg van de energietransitie. Inzicht in de (lokale) invloed van de energietransitie op de (piek)belasting van het net is dus een cruciale factor voor het toekomstbestendig plannen van het elektriciteitsnet.

In dit project hebben wij belastings- en opwekprofielen ontwikkeld op basis van meetdata en resultaten van o.a. mobiliteitsonderzoek. Met behulp van methodes voor de analyse en statistische modellering van gegevens kunnen opwekking en verbruik van elektriciteit worden gemodelleerd. Zo zijn bijvoorbeeld op basis van metingen van warmtepompen in een pilot project modellen gemaakt van het elektriciteitsverbruik van deze warmtepompen op verschillende momenten van de dag en bij verschillende buitentemperaturen. Ook zijn, op basis van een (uiteraard geanonimiseerde) dataset van meetgegevens van slimme meters van verschillende huishoudens, modellen gemaakt die het statistisch gedrag voor elk kwartier van de dag representeren. Hiermee kunnen dan weer synthetische profielen worden gegenereerd die representatief zijn voor een soortgelijke groep (zie kader: *Profielen Energietransitie*). Door deze profielen te combineren kunnen geaggregeerde profielen worden gegenereerd van verschillende percentages zonnepanelen, elektrische auto's en warmtepompen in een wijk.



### 3.3.3 Impact op het net

We hebben nu locatie specifieke voorspellingen over de verwachte adoptie van zonnepanelen, elektrische auto's en warmtepompen. Ook hebben we profielen van de elektriciteitsvraag van deze technologieën gedurende de dag. Door deze twee ingrediënten te gebruiken in netberekeningen kunnen we een inschatting maken van het effect van verschillende scenario's op de belastingprofielen en de verwachte groei van de piekbelasting in een specifieke buurt.

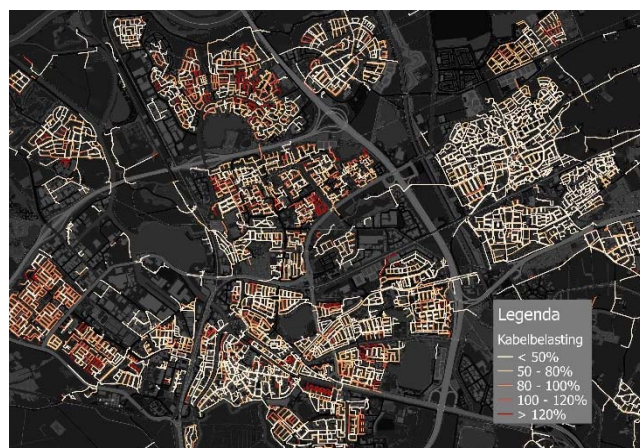
Als voorbeeld nemen wij een scenario waarin uiteindelijk 40% van de huizen zonnepanelen op hun daken heeft liggen, 30% van de auto's elektrisch zijn en 20% van de huizen met een warmtepomp zijn uitgerust i.p.v. een Cv-ketel. Voor dit scenario zien we in *Figuur 2* de verschillen in belastinggroei voor een netwerk van laagspanningskabels in een stad in Nederland. Hierin geeft de kleur de verwachte groei in piekbelasting per kabelsectie weer; hoe roder de kabel hoe hoger de belastinggroei. Er zijn grote verschillen in de te verwachten belastinggroei op verschillende locaties. Waar in sommige wijken de belasting met circa 50% toeneemt zijn er ook locaties waar aan het eind van het scenario een meer dan twee keer zo hoge piekbelasting van het netwerk wordt verwacht.



*Figuur 2 Belastinggroei per kabel*

Als we de absolute belasting vervolgens afzetten tegen de capaciteit van het elektriciteitsnet in het gebied kunnen we specifiek de zones en individuele kabels aanwijzen die gedurende de tijdshorizon van het gekozen scenario overbelast raken. In *Figuur 3* zien we de belasting van de kabels t.o.v. de capaciteit in twee verschillende jaren van het gesimuleerde scenario (2035 en 2045). De donkeroranje- en roodgekleurde kabels zijn overbelast. Dit betekent dat investeringen om de capaciteit te vergroten noodzakelijk zijn of dat er moderne oplossingen zoals vraagsturing of elektriciteitsopslag met accubatterijen zullen moeten worden ingezet om de leveringszekerheid van het net te waarborgen.

De ontwikkelde methode op basis van statistische modellering en voorspelling maakt het mogelijk om op gedetailleerd niveau in te schatten waar capaciteitsknelpunten in het elektriciteitsnet het eerst zullen optreden en wat de benodigde netcapaciteit wordt. Dit laatste is van belang wanneer transformatoren of kabels worden bijgeplaatst of vervangen – er moet dan immers keuzes gemaakt worden met betrekking tot de capaciteit van deze componenten. Daarnaast kan met de ontwikkelde methode snel inzichtelijk worden gemaakt hoe verschillende scenario's voor de energietransitie deze



*Figuur 3 Verwachte (over)belasting van kabels in jaar 2035 en 2045 van het gesimuleerde scenario.*

netinvesteringen beïnvloeden qua omvang en qua locatie(s). Zo kan de kans en het tijdstip van dreigende overbelastingen voor elke locatie inzichtelijk worden gemaakt. Dat maakt het mogelijk om prioriteiten te stellen en keuzes te maken, zodat er efficiënt en effectief in de elektriciteitsnetten wordt geïnvesteerd en verspilling van maatschappelijke middelen wordt voorkomen.

### 3.4 Oplosrichtingen en smart grids

In de voorgaande paragrafen is de impact van de nieuwe technologieën op het elektriciteitsnet beschreven. Voor bepaalde scenario's zijn grote investeringen nodig. Dit leidt tot hoge maatschappelijke kosten en brengt veel werk met zich mee, waarvoor schaars technisch personeel noodzakelijk is en wat overlast geeft omdat straten moeten worden afgezet en opgebroken. Het loont daarom de moeite om de toepassing van alternatieven voor het uitbreiden van de netcapaciteit te onderzoeken, die omvangrijke netverzwaringen uit kunnen stellen of soms zelfs helemaal overbodig kunnen maken.

Een voorbeeld van zo'n slim alternatief is het gestuurd laden van elektrische auto's. De piek in het (huishoudelijk) elektriciteitsverbruik treedt op dit moment zo op tussen 6 en 7 uur 's avonds, wanneer de meeste mensen thuiskomen van het werk. Als op dat moment ook iedereen zijn elektrische auto wil opladen kan dat leiden tot een verdubbeling van de huidige piekbelasting van het elektriciteitsnet – en tot forse investeringen in de netten om deze piekbelasting aan te kunnen. En dat terwijl de auto in de meeste gevallen de volgende ochtend pas weer gebruikt wordt en dus ook prima 's nachts opgeladen kan worden als de belasting van de netten laag is en er voldoende capaciteit beschikbaar is. Een auto die ongeveer 50 km heeft gereden (de gemiddelde rijafstand van een auto in Nederland per dag) zou met het maximaal vermogen van een standaard één-fase huisaansluiting in ongeveer 2,5 uur opgeladen kunnen worden. Door met een lager vermogen op te laden, of door de oplaadtijden te spreiden over de nacht kan de impact op het net sterk gereduceerd worden zonder dat de consument hier iets van merkt.

In het verlengde daarvan kan toepassing van een lokale elektriciteitsmarkt ervoor zorgen dat vraag naar en aanbod van elektriciteit lokaal op elkaar worden afgestemd om op die manier de piekbelasting te reduceren en de aanwezig netcapaciteit beter te benutten. In zo'n lokale markt is de prijs van elektriciteit bijvoorbeeld afhankelijk van de lokaal beschikbare hoeveelheid zonne-energie. Op momenten dat de zon flink schijnt en de aanwezige zonnepanelen veel elektriciteit produceren kunnen mensen profiteren van een lagere elektriciteitsprijs. Daardoor is het gunstiger om dan elektriciteit te gebruiken dan in de avond wanneer productie van de zonnepanelen stilvalt. Doordat de elektriciteit lokaal wordt opgewekt en verbruikt hoeft er minder via het elektriciteitsnet getransporteerd te worden, waardoor dit minder zwaar belast wordt en er minder netcapaciteit nodig is.

Een andere optie is het toepassen van lokale elektriciteitsopslag om pieken in de opwek of het verbruik van elektriciteit op te vangen. In de vorm van (mobiele) buurtbatterijen bijvoorbeeld, die ingezet kunnen worden om de pieken in het elektriciteitsverbruik lokaal te leveren, doordat zij elektriciteit kunnen opnemen op momenten dat er netcapaciteit beschikbaar is, en dit lokaal weer kunnen terugleveren op het moment dat dit niet geldt.

De kosten en baten van het toepassen van traditionele en moderne oplossingen voor het voorkomen van capaciteitsknelpunten in het netwerk worden dus bepaald door de lokale netsituatie en de te verwachten ontwikkelingen van elektriciteitsproductie- en verbruik. Dit



onderstreept het belang van het lokaal kunnen inschatten van de effecten van de energietransitie op het elektriciteitsnet; op basis van dit inzicht kan worden afgewogen of het kosteneffectiever is om een moderne oplossing toe te passen of dat een conventionele netverzwaring een betere optie is.

Samengevat geven de ontwikkelde modellen die worden gevoed met meetgegevens en andere data een goed zicht op de consequenties van de energietransitie voor het elektriciteitsnet op specifieke locaties. Dat maakt het mogelijk om tijdig de juiste investeringen te kunnen doen, zodat het elektriciteitsnet de energietransitie mogelijk maakt – en niet onmogelijk!

### 3.5 Conclusies en aanbevelingen

Het project Smart Planning had als doel om meer inzicht te verkrijgen in het effect van diverse ontwikkelingen in de laagspanningsnetten in Nederland en de voordelen die Smart Grids daarbij kunnen bieden. Om een antwoord te vinden op deze vraag zijn een aantal stappen gezet. In deze paragraaf worden de belangrijkste conclusies en aanbevelingen van het onderzoek benoemd.

#### 3.5.1 Conclusies

In het onderzoek is een manier ontwikkeld om meer zicht te krijgen op de geografische spreiding van bepaalde ontwikkelingen zoals elektrisch vervoer en zon-PV. Het bleek dat met behulp van statistische en zelflerende systemen een veel nauwkeurig voorspelling gedaan kan worden van lokale ontwikkelingen dan wanneer uitgegaan wordt van een uniforme verdeling. Hiermee is een betere voorspelling van benodigde netinvesteringen te geven. Door vervolgens te kiezen voor een probabilistische methode waarin de onzekerheid in adoptiegraad van ontwikkelingen is meegenomen kan er op een risico gebaseerde manier naar toekomstige overbelasting gekeken worden.

Het onderzoek heeft aangetoond dat er diverse socio-demografische parameters zijn te identificeren die een goede voorspeller zijn voor de adoptiegraad van nieuwe ontwikkelingen. Onder ander het inkomensniveau, samenstelling van het huishouden, leeftijd en gedrag van burens blijken belangrijke voorspellers te zijn.

Er is een modelleringsmethode ontwikkeld die in staat is het stochastisch gedrag van nieuwe ontwikkelingen correct weer te geven. Deze modellen kunnen eenvoudig aangepast worden aan lokale variaties. Als gevolg van de adoptie van nieuwe ontwikkelingen zullen de toekomstige belastingprofielen aanzienlijk wijzigen. Door iedere technologie separaat te modelleren kan het effect van verschillende adoptieniveaus van deze technologieën worden bestudeerd.

De ontwikkelde modellen kunnen gebruikt worden om de groei van de nieuwe technologieën op lokaal niveau te voorspellen en de impact van de nieuwe technologieën op het laagspanningsnet te bepalen. Gebieden met een verhoogd risico op overbelasting kunnen zodoende worden geïdentificeerd. Door gebruik te maken van zogenaamde risico-limieten kan de benodigde rekentijd fors gereduceerd worden. Uit het onderzoek blijkt dat de kabels waar de verwachte groei het hoogste is niet noodzakelijkerwijs ook de kabels zijn die als eerste overbelast worden. De 'voorbelasting' van de kabel, d.w.z. de huidige belasting van de kabels blijkt een betere voorspeller te zijn.

Door gebruik te maken van stochastische profielen is het mogelijk om in detail het effect van 'slimme alternatieven' te vergelijken met dat van conventionele netverzwaringen. Uit het onderzoek is gebleken dat 'slimme alternatieven' een effectieve manier kunnen zijn om netverzwaring uit te stellen, of zelfs te voorkomen. Er is naar verschillende 'slimme alternatieven' gekeken. Gebruik maken van vraagsturing (Demand-Side Management, DSM) kan effectief zijn in het uitstellen van investeringen als gevolg van overbelasting of te grote spanningsvariatie. Het compleet voorkomen hiervan blijkt echter niet altijd mogelijk. De onzekerheid over de effectiviteit van DSM is dan ook vrij groot. Deels heeft dit er mee te maken dat er nog vrij weinig bronnen voor DSM aanwezig zijn. Het is echter te verwachten dat dit in de toekomst wel zal gaan stijgen. In combinatie met andere 'slimme alternatieven' kan DSM echter zeer effectief zijn. Deze alternatieven, zoals opslag of de toepassing van regelbare MS/LS transformatoren zijn over het algemeen vrij duur. Door ze in combinatie met DSM te gebruiken kunnen de kosten aanzienlijk gereduceerd worden.

### 3.5.2 Aanbevelingen

De statistische modellen die ontwikkeld zijn voor elk van de nieuwe technologieën, zijn gebaseerd op de huidige penetratiegraad van deze technologieën. Op de korte tot middellange termijn geeft dit een goede voorspelling. Op de lange termijn zal de voorspelling echter minder goed worden. Bijvoorbeeld prijsdalingen en doorontwikkeling van producten kan dan ook invloed op de penetratiegraad gaan hebben. Technologieën zoals elektrisch vervoer en zon-PV zijn de laatste jaren hard gegroeid zijn en er is sprake van sterke kostendalingen. Door de veranderingen in huidige groei t.o.v. voorgaande jaren te monitoren en mee te nemen in de statistische modellen, kan het effect hiervan op de adoptiegraad beter onderzocht worden en kan dit effect meegenomen worden in de verwachte groei van deze technologieën. Op deze manier wordt als het ware een adaptief model ontwikkeld.

Voor de verschillende technologieën die onderzocht zijn geldt dat vooral van zon-PV veel informatie beschikbaar is. Vanuit het zogenaamde Productie Installatie Register (PIR) is goed bekend waar nu zon-PV aanwezig is. Voor elektrisch vervoer en warmtepompen is deze informatie veel slechter beschikbaar. Het beter beschikbaar krijgen van deze informatie zal leiden tot betere modellen voor de groei en geografische verspreiding van deze ontwikkelingen.

De laatste jaren zijn diverse nieuwe technieken ontwikkeld die gebruikt kunnen worden voor het doen van voorspellingen. Vooral zogenaamde 'deep learning' technieken lijken veelbelovend. Het zou dan ook goed zijn om te onderzoeken of deze ook in deze context effectief zijn.

In het onderzoek is gekeken naar diverse 'slimme alternatieven'. Het effect hiervan is sterk afhankelijk van de wijze van aansturing ervan. De ontwikkelde modellen bieden de mogelijkheid om de effectiviteit van verschillende aansturingsprincipes te onderzoeken. Het zou goed zijn om hier meer onderzoek naar de toen om de beste wijze van aansturing van de 'slimme alternatieven' te bepalen.

## 4. Uitvoering project

Dit hoofdstuk beschrijft in het kort de uitvoering van het project. Eerst wordt ingegaan op de verschillen tussen plan en realisatie. Daarna wordt ingegaan op de wijze van kennisverspreiding. Tot slot wordt kort ingegaan op een internationaal project waarin geparticipeerd is.

### 4.1 Verschillen

Het project is zonder noemenswaardige problemen en wijzigingen uitgevoerd. De officiële begindatum van het project was 1 januari 2014. Omdat de promovendus pas per 1 maart 2014 kon beginnen is dat ook aangehouden als de begindatum van het project. Daarmee is ook de einddatum verschoven van 31 december 2017 naar 28 februari 2018.

Participanten in het project waren de TU Eindhoven en de netbeheerders Alliander, Enexis, Rendo en Stedin. De belangrijkste rol qua uitvoering was hierbij weggelegd voor de promovendus bij de TU Eindhoven. De rol van de netbeheerders was het beschikbaar stellen van kennis, gegevens over de netten, belastinggegevens, etc. Ook was het plan dat de promovendus veldonderzoek zou doen bij de deelnemende netbeheerders. Al de genoemde bijdragen zijn ook geleverd: de promovendus heeft veldonderzoek gedaan bij de verschillende netbeheerders en alle gevraagde informatie is beschikbaar gesteld. De hoeveel uren die de netbeheerders daar voor nodig hadden was echter veel lager dan verwacht. Dit komt o.a. doordat het veldonderzoek bij de netbeheerders minder tijd in beslag nam dan verwacht, doordat de promovendus zich de benodigde kennis zeer snel eigen maakte. Verder bleek dat nadat het veldonderzoek bij de eerste netbeheerder was afgerond het bij de andere netbeheerders ook aanzienlijk sneller ging, doordat er veel overeenkomsten bleken te zijn. Een ander punt is dat de meeste deelnemende netbeheerders niet gewend waren om uren te schrijven op specifieke projecten. Daarom zijn de gemaakte uren vaak niet geboekt. Dit alles resulteert erin dat het aantal gemaakte uren door de meeste netbeheerders veel lager is dan vooraf ingeschat. Uitzondering hierop vormt Enexis. Hier is men meer gewend aan het schrijven van uren op dit soort projecten en ook heeft vanuit Enexis meer directe begeleiding plaatsgevonden van de promovendus. Aangezien de uren van de netbeheerders niet gesubsidieerd zijn hebben de verschillen verder geen effect op de financiële resultaten van het project.

Verder valt bij de uren van de TU/e op dat het aantal uren van de medewerkers naast de promovendus aanzienlijk lager is dan verwacht. Dit komt enerzijds doordat in de loop van het project de begeleiding van de promovendus steeds meer gedaan is door medewerkers van Enexis. Daarnaast geldt ook hier dat de promovendus veel dingen zelf opgepakt heeft. Tot slot valt op dat het aantal uren dat besteed is aan Industrieel Onderzoek, lager is dan verwacht. Werkpakket 4 was geclassificeerd als industrieel onderzoek. Dit werkpakket, waarin de ontwikkelde scenario's zijn toegepast op de netten, ging aanzienlijk sneller dan verwacht en kostte daardoor aanzienlijk minder tijd dan het jaar wat ervoor gepland stond. Daar staat tegenover dat de eerdere werkpakketten meestal net iets meer dan een jaar tijd kostten.

### 4.2 Kennisverspreiding

Kennisverspreiding heeft op diverse manieren plaatsgevonden. In de eerste plaats is er minimaal eens per half jaar een voortgangsbespreking geweest waarin de resultaten gedeeld zijn met de deelnemende netbeheerders. Daarnaast is de promovendus ook regelmatig bij

de deelnemende netbeheerders geweest om met kleine groepen betrokkenen de uitkomsten te presenteren en zijn er een aantal gezamenlijke publicaties geschreven.

Voor de verdere kennisverspreiding in Nederland zijn er een aantal Nederlandstalige vakpublicaties geschreven in Energie+:

- Bernards, R. ; Morren, J. ; Slootweg, J.G./ Elektriciteitsnetten en de energietransitie. In: Energie +. 2018 ; Vol. 14, No. 1., pp. 11-13
- Bernards, R. ; Morren, J. ; Slootweg, J.G./ Snellere transitie door voorspellen duurzame energie. In: Energie +. 2016 ; Vol. 12, No. 3. pp. 27-29

Daarnaast is er een heel aantal internationale vakpublicaties geschreven:

- Bernards, R. ; Morren, J. ; Slootweg, J.G./ Development and implementation of statistical models for estimating diversified adoption of energy transition technologies. In: IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2018
- Bernards, R. ; Morren, J. ; Slootweg, J.G./ Statistical modelling of load profiles incorporating correlations using Copula. 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), 26-29 September 2017, Torino, Italy. Piscataway : Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2017. pp. 1-6
- Bernards, R. ; Verweij, R. ; Coster, E. ; Morren, J. ; Slootweg, J.G./ Application and evaluation of a probabilistic forecasting model for expected local PV penetration levels. In: CIRED – Open Access Proceedings Journal. 2017 ; Vol. 1. pp. 2101-2105
- Reinders, J. ; Bernards, R. ; Geldtmeijer, D.A.M. ; Morren, J. ; Slootweg, J.G./ Utilising residential flexibility in the planning of LV networks. 24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED): Session 5: Planning of power distribution systems, 12-15 June 2017, Glasgow, Scotland. London : Institution of Engineering and Technology (IET), 2017. pp. 2576-2580 (CIRED - Open Access Proceedings Journal).
- Bernards, R. ; Morren, J. ; Slootweg, J.G./ Evaluating impact of new technologies on low voltage grids using probabilistic data enriched scenarios. IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC2016), 7-10 June, 2016, Florence, Italy. Piscataway : Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2016.
- Bernards, R. ; Reinders, J. ; Klaassen, E.A.M. ; Morren, J. ; Slootweg, J.G./ Meta-analysis of the results of European smart grid projects to quantify residential flexibility. Proceedings of the CIRED Workshop, 14-15 June, Helsinki, Finland. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2016.
- Nijhuis, M. ; Bernards, R. ; Gibescu, M. ; Cobben, J.F.G./ Stochastic household load modeling from a smart grid planning perspective. Proceedings of the IEEE International Energy Conference (Energycon 2016), 4-8 April 2016, Leuven, Belgium. Piscataway : Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2016.
- Bernards, R. ; Morren, J. ; Slootweg, J.G./ Incorporating the smart grid concept in network planning practices. Proceedings of the 50th Universities' Power Engineering Conference. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2015.
- Bernards, R. ; Morren, J. ; Slootweg, J.G./ A basis for smart planning : requirements for expansion planning of future distribution networks. Proceedings of the 23rd

International Conference on Electricity Distribution (CIRED), 15-18 June 2015, Lyon, France. 2015.

- Bernards, R. ; Morren, J. ; Slootweg, J.G./ Maximum PV-penetration in low-voltage cable networks. Proceedings of the 7<sup>th</sup> IEEE Young Researchers Symposium, 24-25 April 2014, Ghent, Belgium. 2014. pp. 1-5.

### 4.3. Internationaal project

Tot slot heeft de promovendus samen met Enexis geparticipeerd in een internationaal onderzoek naar Smart Planning. Naast de TU Eindhoven en Enexis namen hieraan ook universiteiten en netbeheerders uit Duitsland en Zwitserland deel. Resultaat van dit onderzoek is een internationale planningsrichtlijn voor distributienetten.