

Het ene model is het andere niet

Zes rekenmodellen voor de energietransitie
in de gebouwde omgeving onderzocht



provincie **HOLLAND**
ZUID

Talent
voor
Transitie 

Inhoud

Voorwoord	3
Samenvatting	4
1 Inleiding	9
2 Methodiek	10
3 Energietransitie rekenmodellen	11
3.1 Positionering van een model	11
3.2 Definitie van een model	11
3.2.1 Uitkomst	12
3.2.2 Invoergegevens	13
3.2.3 Bewerking van gegevens	13
3.2.4 Versiebeheer	14
3.3 Leeswijzer	14
4 Invoergegevens	15
4.1 Energiebesparingspakketten (RVO voorbeeldwoningen, NoM)	15
4.1.1 Kostenkengetallen voor isolatiemaatregelen: prijspeil 2018	17
4.1.2 Huidige energieprestatie van gebouwde omgeving	18
4.1.3 Energielabel in het eindbeeld	19
4.2 Verwarmingstechnieken	19
4.2.1 CAPEX	19
4.2.2 OPEX	23
5 Bewerking van gegevens	24
6 Uitkomst	27
6.1 Verdisconteringsvoet	27
6.2 Leercurve	27
7 Conclusies en aanbevelingen	30
7.1 Conclusies en aanbevelingen voor energietransitie rekenmodellen	30
7.2 Conclusies en aanbevelingen voor gemeenten	34
7.3 Conclusies en aanbevelingen voor (de startanalyse van) de Leidraad	36
Appendix	38

Voorwoord

Dit rapport is tot stand gekomen in een samenwerking tussen Provincie Zuid-Holland en Talent voor Transitie BV. Enorm veel dank gaat uit naar CE Delft, DWA, Innoforte, Over Morgen, PBL en Quintel voor hun medewerking in het onderzoek. De ondersteuning in de vorm van gesprekken en het meelesen van concepten is enorm waardevol en getuigt van een transparante markt met een gemeenschappelijk en maatschappelijk verantwoord doel. Het feit dat uit gesprekken al blijkt dat de partijen onderling de samenwerking en daarmee elkaars krachten vinden, wordt door de Provincie Zuid-Holland gezien als goede ontwikkeling en geeft vertrouwen in dat de uitdagingen die in het onderhavige rapport worden beschreven voortvarend door de markt worden aangepakt. De Provincie Zuid-Holland ziet dit rapport en de inzet van procesadviseurs in haar gemeenten als een middel om basisniveau aan kennis over modellen bij gemeenten te vergroten. Met als doel dat rekenmodellen effectief worden ingezet, uitkomsten juist worden geïnterpreteerd en vervolgstappen sneller concreet worden.

Verder gaat ook dank uit naar de werkgroep Energietransitie Rekenmodellen (WG-ETRM), de Data en Monitoring groep van IPO, Eline van den Ende van HVC en Programmabureau Warmte & Koude voor alle inzichten en platform voor discussie over het onderwerp. De presentaties en gesprekken die hier zijn gevoerd hebben geholpen om de conclusies en aanbevelingen in het rapport aan te scherpen.



Samenvatting

Waarom dit onderzoek?

In de nieuwe Omgevingswet is opgenomen dat gemeentes in 2021 als onderdeel van hun omgevingsplan een Transitievisie Warmte (TVW) en Uitvoeringsplan moeten inbrengen. In het ontwerp Klimaatakkoord wordt aangegeven dat regio's de opdracht krijgen om een concept 'Regionale Energie Strategie' (RES) vast te stellen.

Voor de transitie naar een duurzaam verwarmde gebouwde omgeving hebben gemeenten data nodig om hun beslissingen op te kunnen baseren: welke manier van verwarmen leidt tot de laagste kosten voor de eindgebruiker, de laagste maatschappelijke kosten of hoogste baten, minimale investeringskosten, enzovoort. Om aan die vraag tegemoet te komen, hebben verschillende adviesbureaus modellen gebouwd die verschillende verwarmingstechnieken vergelijken op deze uitgangspunten. In de praktijk blijkt echter dat de uitkomsten van deze modellen sterk van elkaar kunnen verschillen. Toch zijn deze modellen voor gemeenten een belangrijke basis om beslissingen op te baseren. Daarom is het belangrijk om

gemeenten inzicht te geven in deze verschillen. Voor dit doel heeft de provincie onderzoek gedaan naar zes rekenmodellen.

Het onderzoek

Diverse gemeenten in de regio hebben de afgelopen tijd modellen ingezet voor studies naar de warmtetransitie. Voor het onderzoek hebben we de uitkomsten van deze studies met elkaar vergeleken. Daarbij zien we zowel overeenkomsten als verschillen. Zo kan de uitkomst van een model voor een buurt bijvoorbeeld zijn dat een Hoog Temperatuur warmtenet het meest kosteneffectief is, terwijl uit een ander model All-Electric komt. Dit soort verschillen maken uitkomsten onzekerder waardoor draagvlak voor beleidskeuzes kan afnemen. Daarnaast heeft de provincie zes modellenbouwers uitgenodigd om de verschillen toe te lichten. Een aantal onderwerpen zijn nader uitgediept aan de hand van de modellen.

In deze studie is onderzocht hoe verschillen in uitkomsten ontstaan wanneer verschillende energietransitie rekenmodellen verduurzamingsroutes uitrekenen voor hetzelfde gebied. Eerst is gekeken of de zes modellen op eenzelfde manier de gebouwde omgeving inventariseren en karakteriseren. Alle modellen gebruiken het BAG register om gebouwobjecten te inventariseren en het CBS om buurten te definiëren. Daarmee is, als het ware, het startpunt van de modellen vrijwel hetzelfde, zodat verschillen in andere aspecten van het model moeten ontstaan.

In de studie is ingegaan op:

- Invoergegevens: verschillende energiebesparingspakketten, verwarmingstechnieken;
- Bewerking: volgorde van bewerkingsschappen;
- Uitkomst: gebruikte verdisconteringsvoeten en het gebruik van een leercurve.

De modellen

Onderstaande modellen van zes adviesbureaus zijn onder de loep genomen:



Figuur 1. Zes energietransitie rekenmodellen die in deze studie zijn opgenomen.

De gegevens die ingevoerd worden zijn data die voor elk warmtetransitievraagstuk worden verzameld:

- Gegevens van woningen en andere gebouwen (scholen, kantoren e.d.);
- Maatregelen voor energiebesparing;
- Verschillende verwarmingstechnieken.

Gegevens over gebouwen en technieken vandaag

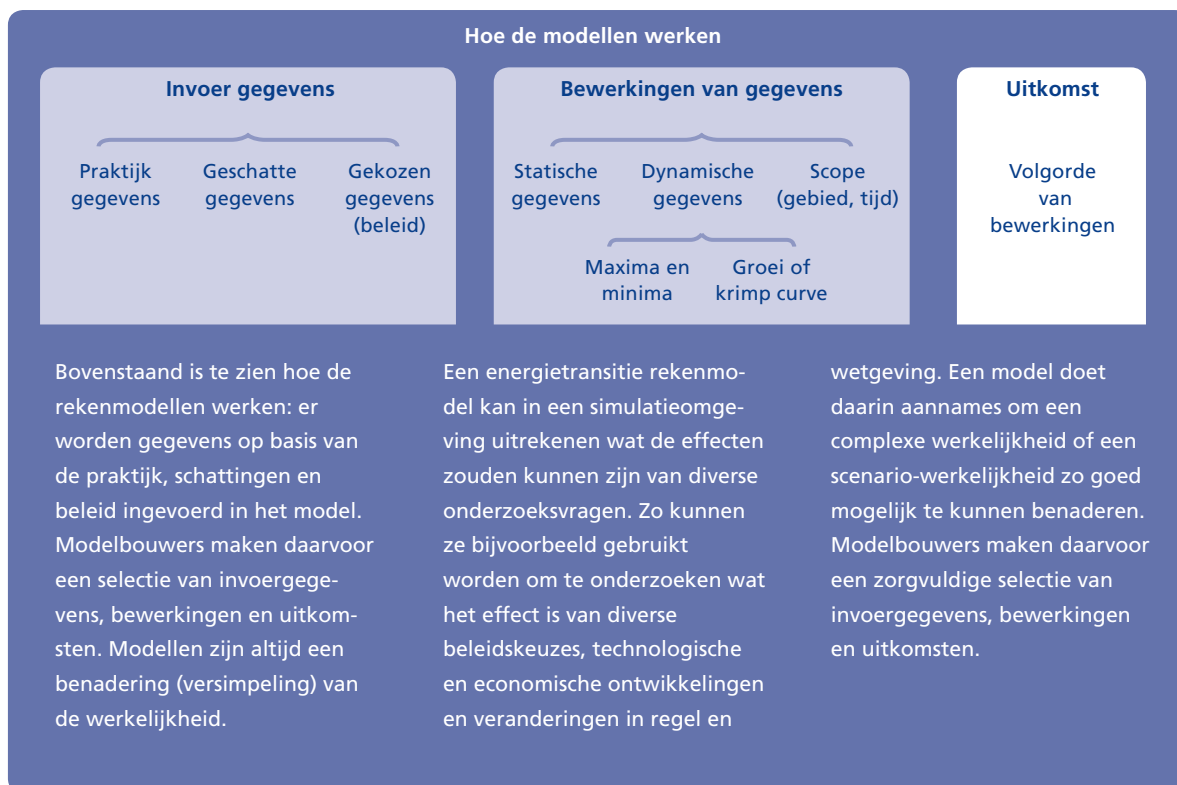
de dag zijn in een groot aantal publieke databases te vinden. Andere gegevens, echter, moeten geschat worden op basis van ervaring uit de praktijk (verleden tijd) of op basis van een projectie van hoe praktijk van vandaag de dag zich zal ontwikkelen (toekomstige tijd). Zo moet bijvoorbeeld geschat worden wat de warmtevraag van woningen in de toekomst zal zijn of wat de kostprijs van een warmtepomp is in 2050.

De verschillen

De zes modellen hebben een vergelijkbare methode om energiebesparingsstappen in woningen tot en met gemiddeld energielabel B¹ te modelleren. Verschillen kunnen ontstaan door gebrek aan standaardisering in gebruikte gegevens, de bewerking en de uitkomst.

Verschil in gegevens:

- Verschil in definitie van gebouwtypes, of verschil in clustering per buurt, wijk, stad of ander gebied.
- Individuele aanpak of projectmatige aanpak. Met



¹ In Voorbeeldwoningen Bestaande bouw 2011 en in de Energiebesparingsverkenner van RVO kunt u allerlei mogelijke scenario's voor sprongen in energielabel vinden voor verschillende voorbeeldwoningen.

een projectmatige aanpak wordt al gauw tot wel €1000 per woning bespaard.

- Voor besparing verder dan energielabel B ontbreekt het aan standaarden voor de samenstelling van de besparingspakketten. Behalve verschillende gradaties aan na-isolatie kan er ook gestreefd worden naar concepten zoals Nul-op-de-Meter of Nul-op-de-Rekening waarvoor de opwek van energie in of nabij de woning plaats zal moeten vinden. Dan worden installaties zoals zonnepanelen en de warmtepomp onderdeel van de renovatie.
- De kosten van een hoog temperatuur warmtenet worden redelijk vergelijkbaar gemodelleerd, maar de kosten van een all electric netwerk variëren nog sterk omdat er een groot verschil is in kosten voor warmtepompen, hoe je de gebruikers van en vraag aan het net definieert, de keuze van verwarmingsinstallatie zoals vloerverwarming, radiatoren, muurverwarming, infrarood etc.

Verskil in bewerking, onderzoeksvraag en uitkomst:

- De onderzoeksvraag bepaalt waar een model op optimaliseert. Zo kan op meerdere manieren invulling worden gegeven aan een kosteneffectief systeem, bijvoorbeeld 'zo laag mogelijke investering voor eindgebruikers' en 'zo laag mogelijke maatschappelijke kosten'.
- De ambitie van de opdrachtgever heeft invloed op welke technieken een model in zal zetten. Zo worden andere oplossingen bedacht voor 'aardgasvrij' dan voor 'energieneutraal' of 'CO₂-arm'.

Leercurve

Vaak wordt aangenomen dat een nieuwe uitvinding in het begin duur is, maar doordat makers van de uitvinding steeds handiger worden, wordt deze steeds efficiënter geproduceerd en hierdoor goedkoper. Modelmatig kan hier rekening mee gehouden worden door investeringskosten af te laten nemen over tijd. Dit wordt een zogeheten 'leercurve' genoemd. De bediener van het model kan een aantal instellingen wijzigen:

- Het zichtjaar of eindjaar van de analyse;
- Het aantal meetpunten, bijvoorbeeld kosten bijstellen elke vijf jaar;
- Het totale 'leereffect', bijvoorbeeld een totale afname van kosten van 50% in het zichtjaar;
- Het tempo van leren, ofwel de vorm van de curve.

- De volgorde van stappen in een model maakt ook veel uit: kies je eerst voor het verminderen van de warmtevraag en zet je daarna duurzame energiebronnen in om in die vraag te voorzien, of zet je eerst duurzame energiebronnen in en verminder je daarna de warmtevraag. Dit leidt tot andere verduurzamingsroutes.
- Een model kan rekening houden met eventuele schaarste in energiebronnen of uit gaan van onuitputbare energiebronnen
- Soms wordt in een model een leercurve opgenomen, waarbij je in de toekomst uitgaat van lagere kosten vanuit de aanname dat nieuwe technieken goedkoper worden. Het maakt veel uit welke termijn daarvoor gehanteerd wordt.

Aanbevelingen voor gemeenten

Voor gemeentes is het belangrijk om zich te realiseren dat de gestelde onderzoeksvraag aan een model leidt tot andere soorten studies. Zo zullen oplossingen van laagste maatschappelijke kosten afhangen van de ambitie (aardgasvrij, energie-neutraal, CO₂-arm, etc.) en hangt het effect van de leercurve enorm af van de termijn: aardgasvrij in 2030 of aardgasvrij in 2050. We adviseren gemeentes om ter voorbereiding op een uitvraag aan adviesbureaus de belangrijkste stakeholders in beeld te krijgen en met die stakeholders de onderzoeksvraag te formuleren en te verscherpen. Een aanpak daarin kan zijn:

Voorgestelde aanpak ten behoeve van uitvraag modelstudie:

- 1 Quickscan van relevante stakeholders.
- 2 Organiseer een projectteam met stuurgroep. Stakeholders kunnen lid zijn van het team of kunnen adviserend optreden.
- 3 Bespreek een aantal mogelijke scenario's en criteria voor.
- 4 Pas een model toe wat aansluit bij dit proces en lokale aspecten, zoals:
 - Aanwezigheid van lokale energiebronnen en initiatieven;
 - Ruimtelijke (on)mogelijkheden voor infrastructuur/bronnen.
- 5 Overweeg een gevoeligheidsanalyse om de kantelpunten van het model te bepalen.

Uitkomsten die níét uit energietransitie rekenmodellen komen

- De betaalbaarheid van een verduurzamingsscenario. Daarvoor mist nog informatie over de budgetten van gebouw eigenaren, de business case van de energiebedrijven en een beeld van wat betaalbaar is voor huurders.
- De technische inpasbaarheid van een verduurzamings-scenario. Er heeft nog géén engineering plaatsgevonden, dus er is nog niet bekend waar warmteleidingen en onderstations kunnen komen te

liggen, of verregaand isoleren wel mogelijk is, of er ruimte is voor een warmtepomp, etc.

Wat levert het dan wel op?

- Modellen berekenen wel de kosten en baten voor de verschillende partijen in de keten.
- De voorbereidingen voor een uitvraag aan adviesbureaus en het bespreken van de uitkomsten van het onderzoek zijn kansen om verschillende belanghebbenden in het proces te betrekken.

- Met het onderzoek wordt een dataset opgebouwd en worden een aantal oplossingsrichtingen verkend. De uitkomst vormt de basis voor een gesprek over welke oplossingsrichtingen de moeite waard zijn om in een haalbaarheidsstudie nader uit te werken.
- Van de gegevens en uitkomsten worden visualisaties gemaakt, bijvoorbeeld in de vorm van kansenkaarten. Dat zijn essentiële bouwstenen voor de warmtetransitievisie.

In de afweging over welk energietransitie model wanneer toe te passen, heeft Netbeheer Nederland een keuzehulp gemaakt. Daarnaast helpt het om na te denken in krachten en grenzen van een model (zie kader).

Aanbevelingen voor modelbouwers

Modelbouwers kunnen een belangrijke rol spelen om gemeentes te helpen in het stellen van een juiste onderzoeksvraag of het interpreteren van onderzoeksresultaten. Dit doen zij vaak al door aan het eind van een studie een rapport op te leveren met visualisaties van de uitkomsten. Ook is er voor hen een rol weggelegd in het standaardiseren en verbeteren van gegevens en berekeningen. Wij doen een aantal aanbevelingen:

- Duid in rapportage gegevens die standaard zijn en gegevens die afwijken van die standaard, bijvoorbeeld vanwege lokale omstandigheden.
- Maak inzichtelijk wat voor soorten onderzoek met het model gedaan kan worden en welke onderzoeken (nog) niet. De keuzehulp van Netbeheer Nederland zet daar een belangrijke eerste stap in.
- Modellen hebben een standaard reikwijdte waarvoor het gemaakt is; in gesprek zal nagaan moeten worden hoeveel daarvan afgeweken kan en moet worden voor de specifieke vraag en hoe deze inspanning verrekend wordt.

Een gedetailleerde beschrijving van hoe de modellen werken (hoe worden isolatiepakketten gedefinieerd, welke technieken worden gehanteerd, waar komen kostenkengetallen vandaan) helpt in de uitvraag om scherpere vragen te stellen.

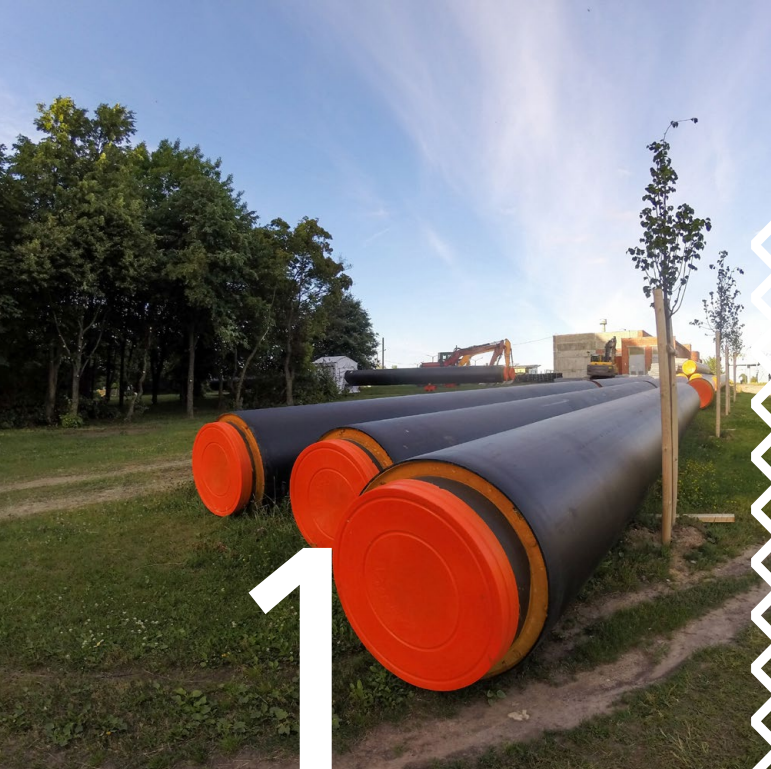
- Voornaamste aanbeveling aan de modellen is meer uniformiteit van de gegevens. De adviesbureaus die in deze studie aan bod zijn gekomen zijn op eigen beweging al aan de slag gegaan om kostenkengetallen zoveel mogelijk te standaardiseren.

Aandachtspunten voor (de startanalyse van) de Leidraad

Eind september zal de eerste versie van de start analyse voor alle gemeentes in Nederland worden gepubliceerd. Deze doorrekening wordt aangeboden door Expertise Centrum Warmte (ECW). PBL helpt bij het opzetten van het project en is uitvoerend voor de berekeningen die worden gedaan. Het betreft een eerste doorrekening van maatschappelijke kosten en kosten voor verschillende stakeholders voor verschillende technieken op buurniveau. Dit is onderdeel van de Leidraad die is opgenomen in het ontwerp van het Klimaatakkoord. In sommige gemeentes zal al een vergelijkbare studie zijn verricht of wordt er momenteel een studie uitgevoerd of uitgevraagd. Provincie

Zuid-Holland vraagt aandacht voor een aantal aspecten:

- De Leidraad van eind september is een eerste doorrekening. In vervolgstappen zal verfijning moeten plaatsvinden met lokale gegevens en uitgangspunten en zal de haalbaarheid van uitkomsten onderzocht moeten worden.
- Maak een handreiking die gemeentes ondersteunt in het verzamelen van relevante lokale gegevens. Ook is ondersteuning nodig in het stellen van de juiste onderzoeksvragen. In deze studie zijn een aantal afwegingen opgenomen.
- In deze transitieperiode - waarin de Leidraad nog in ontwikkeling is - is het belangrijk dat er helderheid komt voor adviesbureaus en gemeenten over wat precies het model in gaat houden en wat níet en wat de consequenties zijn van het gebruik van andere modellen in het verleden, nu of in de toekomst.



Inleiding

In de nieuwe Omgevingswet is opgenomen dat gemeentes in 2021 als onderdeel van hun omgevingsplan een Transitievisie Warmte (TVW) en Uitvoeringsplan moeten inbrengen. Daarnaast zal komend jaar het Klimaat- en Energieakkoord (KEA) in gang worden gezet. Daarin krijgen regio's de opdracht om in zes maanden na het sluiten van het KEA een concept Regionale Energie Strategie (RES) vast te stellen.

In de Uitvoeringsplannen en RES'en worden de contouren geschetst van een route naar een duurzaam verwarmde gebouwde omgeving. Een van de aanliegroutes om te komen tot een gedragen plan en strategie is om te zoeken naar

de meest kosteneffectieve manier van verwarmen, waarbij kosteneffectief subjectief is: bijvoorbeeld laagste maatschappelijke kosten en baten, laagste kosten voor de eindgebruiker, minimale investeringskosten, enzovoort. Diverse adviesbureaus hebben modellen gebouwd die techniek-pakketten onderling vergelijken op zulke uitgangspunten.

In diverse gemeentes zijn studies uitgevoerd gebruikmakend van deze modellen. Wanneer je de uitkomsten met elkaar vergelijkt zie je veel overeenkomsten, maar soms ook verschillen. Zo kan een model voor een buurt bijvoorbeeld hebben uitgerekend dat een Hoog Temperatuur warmtenet het meest kosteneffectief is, terwijl uit een ander model All-Electric komt. Dit soort verschillen maken uitkomsten onzekerder waardoor draagvlak voor beleidskeuzes kan afnemen. Dit is aanleiding geweest voor Provincie Zuid-Holland om inzicht proberen te krijgen in waar verschillen door ontstaan en om ze te kunnen uitleggen.

Daarnaast wordt in het klimaatakkoord de Leidraad voor Gebouwde Omgeving opgenomen. Daarin wordt één model beschreven met een set van uitgangspunten en data waarmee straks gemeentes voor hun warmtevisie en regio's voor hun RES een eerste benchmark kunnen doen. Idee achter één set data en uitgangspunten is dat deze benchmark optelbaar is en gebruikt kan worden om gemeentes met gemeentes, regio's met regio's en ook gemeentes met regio's onderling te kunnen vergelijken.

Het doel van dit rapport is drieledig:

- Verklaren van verschillen in uitkomsten tussen de modellen.
- Perspectief bieden op hoe energietransitie rekenmodellen effectief gebruikt kunnen worden in de totstandkoming van RES'en en Transitievisies Warmte.
- Consequenties in beeld brengen van de keuze voor één model in de Leidraad.



Methodiek

In de studie zijn zes modellen (figuur 2) onderzocht die onder meer in Zuid-Holland veel worden gebruikt. Voor een breder overzicht van energie transitie rekenmodellen die in Nederland worden gebruikt, wordt u verwezen naar het [overzicht](#) wat Netbeheer Nederland met de werkgroep Energie-transitie Rekenmodellen (WG-ETRM) heeft samengesteld.

CEGOIA (CE Delft)	Warmte transitieatlas (Overmorgen)	Aardgasvrije wijken (DWA)
MAIS/Vesta (PBL)	ETM (Quintel)	Caldomus (Innoforte)

Figuur 2. Zes modellen en ontwikkelaars die zijn onderzocht in deze studie.

Per model is een tabel gemaakt waarin diverse componenten zijn opgenomen zoals welke isolatiepakketten worden gebruikt of welke kostenkengetallen voor een warmtepomp. Deze tabellen zijn aan de hand van gepubliceerde studies, modeldocumentatie en een gesprek met de modelbouwers opgesteld. Van elk gesprek is een gespreksverslag gemaakt en afgestemd met de modelbouwers. De tabellen en gespreksverslagen hebben de basis gevormd voor deze notitie. Er is niet naar alle verschillen in detail gekeken; onderwerpen of modelcomponenten die in de gesprekken aan bod kwamen en door de modelbouwers als belangrijk werden gezien zijn nader onderzocht.

Ook is er niet kwantitatief gekeken naar welke parameters de kantelpunten in uitkomst veroorzaken. Daartoe is aanvullende studie nodig waarbij de werkelijke modellen gedraaid worden. Een techniek zoals een Monte Carlo simulatie is dan nodig waarbij alle parameters worden opgeblazen of juist geminimaliseerd om te zien bij welke startsituaties welke uitkomsten ontstaan.

Naast deze notitie is er een Tussenstand gepresenteerd in oktober. Daar zijn de resultaten van de eerste fase van de studie gedeeld. Deze presentatie is o.a. gehouden bij de Programmaraad van bureau Warmte & Koude Zuid-Holland, op de warmte kennis deeldag bij Provincie Zuid-Holland en aan een aantal leden van IPO.

Ten slotte is er ter begeleiding van deze notitie een eindpresentatie gemaakt die in December o.a. is gehouden voor de WG-ETRM van Netbeheer Nederland, de data en monitoring werkgroep van IPO en Programmaraad van bureau Warmte & Koude Zuid-Holland.



Energietransitie rekenmodellen

3.1 Positionering van een model

Energietransitie rekenmodellen kunnen gebruikt worden om een eindbeeld te schetsen van de energietransitie. Daarin moet een set uitgangspunten worden meegegeven waarop het model probeert te optimaliseren of te beredeneren. Meestal wordt gevraagd om kosteneffectiviteit uit te rekenen van diverse verduurzamingsroutes, waarbij gestuurd wordt op laagste maatschappelijke kosten of laagste kosten voor de eindgebruikers. Daarin zit de aanname dat betaalbaarheid (voor maatschappij of eindgebruiker) de belangrijkste voorwaarde voor draagvlak is. In sommige studies worden modellen ingezet om bijvoorbeeld verduurzamingsroutes uit te rekenen die de meeste CO₂-besparing opleveren. Zo zijn er nog vele factoren die de uiteindelijke keuze voor energietransitie beleid beïnvloeden. In deze studie is met name gekeken naar studies naar de meest kosteneffectieve verduurzamingsroutes van de gebouwde omgeving, d.w.z. van woningen en bedrijven.

De uitkomst van een model geldt binnen de

simulatieomgeving van dat model. Die simulatieomgeving is een vereenvoudiging van de werkelijkheid. Bij de vertaling naar de werkelijkheid kan het zich voordoen dat uitkomsten van het model niet haalbaar blijken. Misschien is de infrastructuur technisch niet inpasbaar of blijkt ondanks de lage maatschappelijke kosten het onmogelijk om een positieve business case te maken voor een techniek. Of misschien is er wel meer draagvlak voor alternatieven ook al zijn ze maatschappelijk gezien duurder of riskanter. Een energietransitie-model levert dan ook niet een haalbaarheidsstudie op of een business case, maar geeft – in een veilige simulatieomgeving – inzicht in verschillende onderzoeksvragen. Daarmee is het een middel om grip te krijgen op de complexiteit van de energietransitieopgave en om vervolgstudies te kunnen prioriteren.

Het bespreken van uitkomsten uit de modellen is een kans om stakeholders rondom één opgave te organiseren en een rol te geven. In een goed proces worden de stakeholders al betrokken in de voorbereiding van de uitvraag aan de modelbouwers zodat lokale uitgangspunten (zoals technische (on)mogelijkheden) worden meegenomen in de studie. Zodoende sluit de studie beter aan bij lokale onderzoeksvragen en heeft het een verbindende kracht.

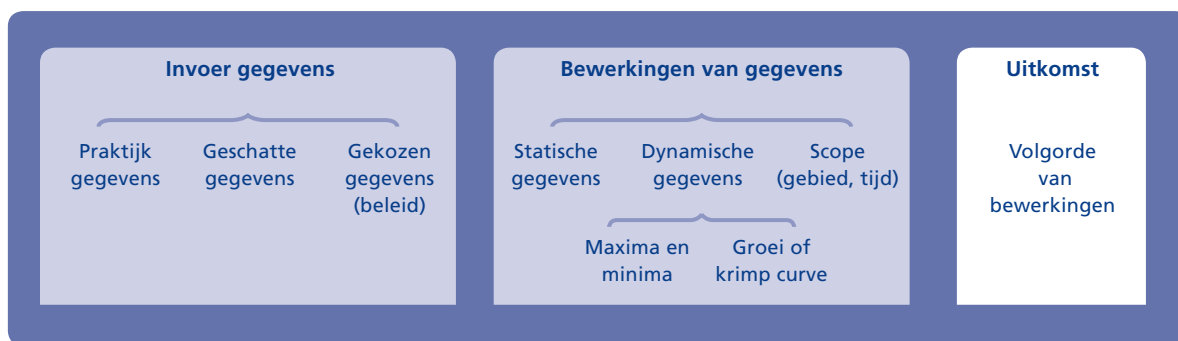
3.2 Definitie van een model

Om te begrijpen waar verschillen in uitkomsten door ontstaan is het verder belangrijk om te begrijpen wat modellen zijn en hoe ze werken. Daar wordt in dit hoofdstuk nader op in gegaan.

Een model heeft een input, bewerkingsstappen en een output (figuur 3 op volgende bladzijde).

3.2.1 Uitkomst

In een maatschappelijke kosten batenanalyse wordt een optelsom gemaakt van investeringen, operationele kosten en baten binnen de systeemgrenzen van een studie. Met systeemgrenzen wordt bedoeld dat niet met alle factoren rekening gehouden kan worden. Je kunt bijvoorbeeld naast gebruikelijke investeringskosten en energiebesparing nog rekenen met kosten en besparing van CO₂-emissie, de 'derving' van kosten voor aardgasinfrastructuur (bijvoorbeeld via verwijderingskosten van aardgasaansluiting), de kosten voor



Figuur 3. Conceptueel kader van een rekenmodel.

overlast (omleidingen, tijdelijke uit huis plaatsing, en dergelijke maatregelen die door werkzaamheden worden veroorzaakt), de baten van nieuw gecreëerde werkgelegenheid, enzovoort. Waar je de grens trekt heeft invloed op de betaalbaarheid en duurzaamheid van de nieuwe energievoorziening. Als met dezelfde systeemgrenzen wordt gewerkt (dus welke kosten/baten wel en welke kosten/baten niet worden meegenomen) dan kan binnen een model een juiste kwantitatieve vergelijking gedaan worden tussen twee alternatieve infrastructuur.

In deze studie is niet zo zeer onderzocht of binnen het model tussen verschillende infrastructuur dezelfde systeemgrenzen worden gekozen. Dat viel buiten de scope van het onderzoek. Daarvoor zou de complete waardeketen van warmtenet en all-electric bijvoorbeeld beschreven moeten zijn en voor beide zou dan opwek, distributie, gebouw en installatie kosten gedefinieerd kunnen worden. Wel is er gekeken naar verschillen tussen de modellen. Daar lijken een aantal verschillen te bestaan die in deze notitie besproken worden. Dat maakt het onzeker of kwantitatieve uitkomsten tussen de modellen te vergelijken zijn, dus bijvoorbeeld of je de hoogte van kosten van een warmtenet in model A kan vergelijken met de hoogte van kosten van een warmtenet in model B. Dat kan alleen als exact dezelfde waardeketen is gebruikt. De verwachting is wel dat binnen de modellen de kwantitatieve afweging tussen diverse verduurzamingsroutes van voldoende kwaliteit is om tussen verduurzamingsroutes te kunnen kiezen. De uitkomsten tussen de modellen zijn daarmee nog wel kwalitatief vergelijkbaar, dus bijvoorbeeld de conclusie voor een warmtenet als voorkeursoplossing op basis van laagste maatschappelijke kosten. Een belangrijke voorwaarde daarvoor is wel dat de studies zijn opgezet met

hetzelfde doel. Een studie naar laagste maatschappelijke kosten voor het aardgasvrij maken van de gebouwde omgeving is bijvoorbeeld niet per definitie vergelijkbaar met een studie naar laagste maatschappelijke kosten voor een energieneutrale gebouwde omgeving.

De Leidraad in het Klimaatakkoord biedt vanuit één gestandaardiseerde, gevalideerde set van gegevens en uitgangspunten een berekening aan per buurt van de maatschappelijke kosten en baten en de lasten per gebruiker voor verschillende verwarmingstechnieken. Uitkomsten zijn dan op verschillende schaalgroottes (gebouw, buurt, wijk, gemeente) optelbaar en vergelijkbaar, omdat dezelfde uitgangspunten en gegevens zijn gehanteerd. In vervolgstappen zal verfijning moeten plaatsvinden met lokale gegevens en uitgangspunten en zullen gemeentes alsnog de haalbaarheid van de uitkomsten nader moeten gaan onderzoeken.

Recentelijk is er een studie naar de MKBA-werkwijze in energietransitie gestart bij de [TU Delft](#). Daarnaast hebben de Rijksuniversiteit Groningen en SEO Economisch Onderzoek dit jaar een verkenning gedaan naar een [werkwijzer](#) voor MKBA's in de energietransitie. Deze studies en ook de Leidraad in het Klimaatakkoord bouwen voort op de [leidraad voor MKBA's](#) van het CPB in 2013. Deze documenten zijn derhalve toegevoegd aan deze notitie voor de geïnteresseerde lezer.

3.2.2 Invoergegevens

Als input worden allerlei geuren en kleuren aan technieken ingevoerd, zoals alle kosten componenten van een warmtenet van opwekinstallatie en infrastructuur tot de benodigde aanpassingen aan een gebouw, de aanwezige warmtebronnen, een karakterisatie van de woningvoorraad en bijpas-

sende warmtevraag, etc. Deze gegevens kunnen komen uit praktijk of uit beleid. Gegevens die komen uit de praktijk kunnen werkelijke getallen zijn of veralgemeniseerde gemiddeldes of ‘kengetallen’. Warmteleveranciers hebben bijvoorbeeld kengetallen voor de warmtevraag in gigajoules per vierkante meter voor een schoolgebouw. Die kengetallen zijn dan gebaseerd op eerdere projecten waar schoolgebouwen werden aangesloten. In een nieuwe wijkaanpak kan je dan aan de hand van dat kengetal en de oppervlakte uit bijvoorbeeld het BAG-register schatten wat de warmtevraag zal zijn van scholen in die wijk. Anderzijds weet je soms al het werkelijke gasverbruik van deze scholen en kun je met omrekeningsfactoren ook uitrekenen wat ongeveer de werkelijke warmtevraag van deze gebouwen zal zijn.

Echter in een vooruitblik naar bijvoorbeeld 2050 zullen veel gegevens geschat moeten worden. Het energievraagprofiel van bewoners kan bijvoorbeeld in de toekomst gaan veranderen doordat er meerdere vormen van opslag worden ontwikkeld of doordat mensen zelf energie gaan opwekken. Van geothermie weten we dat er vandaag de dag nog niet veel geothermieputten zijn, maar op basis van een geschatte potentie van aardwarmte kun je wel een gok wagen over hoeveel putten er in 2050 gebouwd kunnen worden en hoeveel aardwarmte dat voor de gebouwde omgeving kan opleveren. En de kosten van een warmtepomp of warmteafleverzet kunnen vandaag de dag misschien hoger zijn dan in 2050 als gevolg van een leercurve (hoofdstuk 7.1.2).

Kortom: in de invoergegevens zitten veel verschillende manieren waarop je getallen kan kiezen en daarnaast is er veel onzekerheid van hoe bronnen, kosten, warmtevraag, subsidies, belasting, enzovoort zich zullen ontwikkelen in de tijd. De vraagsteller en modelleur maken in overleg een afweging tussen ofwel terug vallen op aannames (versimpelen van het model) ofwel uit gaan van gevoeligheidsanalyses en scenario's (compliceren van het model). In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op een aantal parameters die in de modellen worden uitgekozen.

3.2.3 Bewerking van gegevens

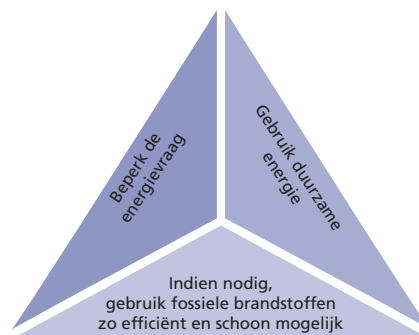
Gegevens die in het model worden ingevoerd kunnen constant blijven of over tijd veranderen. Zo gaven we eerder al aan dat vaak wordt aangenomen dat investeringskosten van een warmtepomp

of warmteafleverset langzamerhand lager zullen worden (zie ook 7.1.2). Voor mutaties kun je ook maxima en minima toevoegen, zoals wat is per gebouwtype het maximum isolatieniveau wat te halen is en welk minimum startniveau aan isolatie wordt er gekozen?

Ten slotte, en daar wordt meer op ingegaan in hoofdstuk 6, maakt de volgorde van berekeningen veel uit voor de uitkomst. Dit is vergelijkbaar aan “Meneer van Dale wacht op antwoord”: eerst vermenigvuldigen, dan delen levert een andere uitkomst op dan eerst delen, dan vermenigvuldigen. In de energietransitie is een bekend voorbeeld de Trias Energetica. Dit is een strategie die stamt uit 1979 met het mantra “eerst energiebesparen, dan duurzame energie opwekken, daarna met het restant fossiel efficiënt om gaan” (figuur 4).

Volgens deze rekenregels zou dan eerst maximaal geïsoleerd worden voordat de verduurzamingsroutes worden uitgerekend. Dit werkt in het nadeel voor oplossingen waar isoleren geen eis is voor de technische haalbaarheid, zoals een hoog temperatuur warmtenet. Draai je het om, dan zal een hoog temperatuur warmtenet relatief goed uit de bus komen voor woningen met een slecht energielabel omdat daar isolatiekosten onevenredig hoog kunnen zijn.

Op welke manier modellen tegen de wereld aankijken en hoeveel ruimte er zit om verschillende scenario's te berekenen noemen we in deze studie de modelfilosofie. In hoofdstuk 6 worden een aantal varianten besproken.



Figuur 4. Trias Energetica, RVO.

3.2.4 Versiebeheer

In deze modellenstudie is geprobeerd om op allerlei variabelen een vergelijk tussen modellen te maken. Het was lastig om in deze tabellen overeenstemming te bereiken met de adviesbureaus. Dat heeft een drietal oorzaken:

- Gegevens in de modellen zijn vaak contextspecifiek. Dat wil zeggen, getallen kunnen ingesteld worden naar wens van een gemeente of om tegemoet te komen aan lokale context. Wanneer dan één getal wordt opgeschreven, wordt tekort gedaan aan de flexibiliteit.
- De modellen worden voortdurend ontwikkeld. Instellingen vandaag de dag kunnen morgen anders zijn. In gesprekken met de modelbureaus bleek al dat er onderdelen waren die aangepast zouden worden in een nieuwe versie en daarom niet meer helemaal actueel waren. De uitkomsten in een gemeente worden doorgaans niet (kosteloos) opnieuw uitgerekend nadat een nieuwe versie is gelanceerd.
- Regel en wetgeving heeft grote invloed op de uitkomsten van modellen. Het warmtetarief bijvoorbeeld wordt elk jaar weer opnieuw vastgesteld door het ACM en de methodiek daarvoor is in het Warmtebesluit al een aantal keren bijgesteld en een nieuwe wijziging wordt voorzien in 2019.

Derhalve is de dataset en rekenwijze van modellen een dynamisch geheel. Het terugbrengen van gegevens in één tabel wekt onterecht de suggestie dat de modellen statisch zijn.

3.3 Leeswijzer

In het vervolg zal volgens de structuur van invoer, bewerking en uitkomst nader worden gekeken naar diverse aspecten van een energietransitie rekenmodel. Er wordt niet op alle aspecten van de modellen ingegaan.

In de studie is ingegaan op verschillende energiebesparingspakketten (hoofdstuk 4.1), verwarmings technieken (hoofdstuk 4.2), volgordelijkheid van bewerkingsstappen en modelfilosofie (hoofdstuk 5) en verschillende manieren van verrekenen (hoofdstuk 6.1.1) en het gebruik van een leercurve (hoofdstuk 6.1.2). Er wordt afgesloten met een hoofdstuk waarin de conclusies en aanbevelingen worden gepresenteerd voor energietransitie rekenmodellen (hoofdstuk 7.1), gemeenten (hoofdstuk 7.2) en de Leidraad van het Klimaat en Energie Akkoord (hoofdstuk 7.3).



Invoergegevens

In elk warmtetransitievraagstuk worden gegevens verzameld over de wijken en de gebouwde omgeving, maatregelen voor energiebesparing en verwarmingstechnieken. Voor gegevens over wijken en gebouwen worden publieke bronnen geraadpleegd zoals het BAG-register van Kadaster of publicaties van het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS). Deze gegevens worden jaarlijks meerdere keren geactualiseerd op basis van echte registratie van objecten.

Andere gegevens, echter, moeten geschat worden op basis van ervaring uit de praktijk (verleden tijd) of op basis van een projectie van hoe praktijk van vandaag de dag zich zal ontwikkelen (toekomstige tijd). Om bijvoorbeeld in een woning energie te besparen, zullen er isolatiemaatregelen plaatsvinden. Bouwbedrijven hebben al enige ervaring met dergelijke werkzaamheden en kunnen offertes uitbrengen voor wat zulke maatregelen kosten. De warmtevraag zal als gevolg van een verbeterde isolatie afnemen. Dat kan geschat worden op basis van theorie of praktijk.

In dit hoofdstuk wordt nader ingegaan op hoe gegevens over energiebesparing (4.1) en gegevens voor verwarmingstechnieken (4.2) worden verzameld en ingeschat.

4.1 Energiebesparingspakketten (RVO voorbeeldwoningen, NoM)

Nederlandse wetgeving maakt gebruik van bouwbesluiten die regelmatig worden bijgesteld zodat woningen gedurende de looptijd van dat bouwbesluit conformeren aan een aantal standaarden. Dat is handig voor de energietransitie, omdat de gehele Nederlandse bouwvoorraad is te categoriseren in een aantal groepen voorbeeldwoningen. Dat zijn woningen die volgens een bepaald bouwbesluit binnen een bepaalde periode in grote getalen zijn gebouwd en daarom onderling weinig verschillen. RVO heeft in 2011 hiertoe een document gepubliceerd waarin deze categorieën worden weergegeven (figuur 5 op volgende pagina).

Hoe meer homogeniteit, hoe makkelijker het in te schatten is welke energiebesparingsstappen en verwarmingstechnieken er mogelijk zijn voor de diverse voorbeeldwoningen. In de Energiebesparingsverkenner van RVO wordt jaarlijks gerapporteerd welke energiebesparingsstappen per voorbeeldwoning mogelijk zijn om te maken en wat ze kosten.

Sommige adviesbureaus gebruiken dit document als basis voor inschattingen van de warmtevraag en de mogelijkheden voor energiebesparing. Dit doen zijn door de voorbeeldwoningen te plotten op het BAG register van Kadaster. Daar staan alle gebouwen in Nederland op afgemeld. Op basis van bouwjaar, vorm, functie, etcetera concludeert het model in welke klasse voorbeeldwoningen een gebouw hoort. Daarna kan door aannames in de reeds aanwezige schil een inschatting gedaan worden over de warmtevraag en tevens welke energiebesparingsmaatregelen nog uitgevoerd kunnen worden.

RVO beschrijft stappen in energiebesparing tot maximaal label A. Naar de toekomst toe zijn diverse bouwstandaarden bedacht voor nieuwbouw en grootschalige renovatie zoals Nul-op-de-Meter en Bijna Energie Neutraal Gebouwd. Voor kantoorgebouwen is recent besloten dat deze minstens

Kenmerken woning	
Gebruiksoppervlakte (m ²)	123,0
Aantal bewoners	3,0

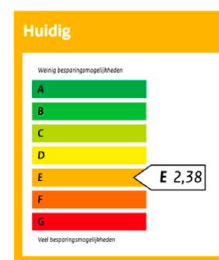
Bouwdelen	Huidig			Besparingspakket			Investeringskosten	
	Opp. (m ²)	Rc-Waarde (m ² K/W)	U-Waarde (W/m ² K)	Opp. (m ²)	Rc-Waarde (m ² K/W)	U-Waarde (W/m ² K)	Per m ²	Totaal
Begane grondvloer ³	60,0	0,17	2,33	60,0	2,53	0,36	€ 20	€ 1.200
Plat dak ³	14,0	0,86	0,89	14,0	2,53	0,36	€ 193	€ 2.700
Hellend dak ³	65,2	0,86	0,89	65,2	2,53	0,36	€ 53	€ 3.460
Gevel								
– Gesloten ³	104,7	0,43	1,45	104,7	2,53	0,36	€ 21	€ 2.200
– Enkelglas ³	6,7		5,20	–		–	€ 139	€ 940
– Dubbelglas ³	24,6		2,90	–		–	€ 142	€ 3.490
– HR ⁺ glas	–		–	31,3		1,80		

Installatie	Huidig	Besparingspakket	Investeringskosten
Ruimteverwarming ³	HR107 ketel	HR107 ketel	–
Warmtapwater	Combitap HR	Combitap HR	
Ventilatie	Natuurlijke ventilatie	Natuurlijke ventilatie	

2 onder 1 kap woning: Investeringskosten ² meest voorkomende subtype van energieniveau 'huidig' naar energieniveau 'besparingspakket'	€ 13.990
--	----------

Energieprestaties subtype 2 onder 1 kap	Huidig	Besparingspakket	Besparing
El (-)	2,38	1,08	1,30
Energie label	E	B	3 energielabel(s)
Totaal primair energiegebruik (MJ)	133.274	60.383	72.891
Gasgebruik (m ³ /jaar) ¹	3.046	1.233	1.813
Hulpenergie, verlichting, PV (kWh/jaar) ¹	1.051	1.051	0
CO ₂ emissie (kg/jaar)	6.017	2.790	3.227
Energiekosten, exclusief BTW per jaar	1.888	1.088	€ 800

- ¹ Op basis van de El-berekening, maar met een binnentemperatuur van 16,5°C i.p.v. 18°C, zonder comfortcorrectie bij lokale verwarming en keukengeiser en directe aftrek van de opbrengst van PV.
- ² De investeringen van 'Huidig' naar 'Besparingspakket' zijn exclusief BTW en gelden bij projectmatige aanpak. Prijspeil 1 maart 2010.
- ³ Telt mee bij investering meestvoorkomende subtype.



Figuur 5. RVO Brochure Voorbeeldwoningen Bestaande Bouw, 2011, pagina 14. Gegevens van een vrijstaande woning gebouwd tot en met 1964.

energielabel C moeten zijn vanaf 2023. Dergelijke beleidskeuzes beïnvloeden de vereiste energielabelstappen die de gebouwde omgeving moet nemen en het tempo daarvan. In het modelleren naar de toekomst toe wordt hier rekening mee gehouden voor zover dat mogelijk is, waarbij aannames worden gedaan over de afname in warmtevraag (door energiebesparen), mogelijkheden voor technieken (“vanaf label X is het mogelijk om met laag temperatuur te verwarmen”) en kostprijsontwikkelingen.

De modelbouwers gaven in ons onderzoek een aantal uitdagingen aan waar zij vervolgens verschillend mee omgaan, te weten:

1. De kostenkengetallen uit de publicatie van RVO voor voorbeeldwoningen en isolatiemaatregelen dateren uit een prijspeil van 2010. Om deze te actualiseren kan gebruik gemaakt worden van

de energiebesparingsverkenner die zijn gegevens baseert op onderzoek van Arcadis.

2. De huidige stand van gebouwen reflecteert niet de staat van gebouwen in het bouwbesluit. Bureaus gaan hier verschillend mee om. Bijvoorbeeld een actualisatie aan de hand van enquêtes of afgemelde energielabels in het BAG register.
3. Ten behoeve van diverse energieconcepten is niet helder welk minimum vereiste isolatieniveau nodig is. Bijvoorbeeld hoe goed een voorbeeldwoning geïsoleerd moet zijn om comfortabel elektrisch te verwarmen met een luchtwarmtepomp.

4.1.1 Kostenkengetallen voor isolatiemaatregelen: prijspeil 2018

Voor de energieprestatie en mogelijkheden voor besparingsstappen tot en met label A gebruiken de meeste bureaus de eerder genoemde Voorbeeld-

woningen van RVO. RVO heeft de kosten die in de publicatie staan geactualiseerd in de Energiebesparingsverkenner. Sommige bureaus hebben hun eigen actualisatie gedaan of net wat andere brongegevens gebruikt. In de volgende tabel zijn de kosten voor isolatiepakketten tot en met label B/A opgenomen voor een rijwoning van diverse bouwjaren.

Let op dit zijn dus de gerapporteerde kosten voor een standaard grondgebonden woning (tussenwoning) van diverse bouwjaren voor zover dat afgeleid kon worden. Ze gelden dus niet voor alle gebouwtypes. Niet elk model definieert dezelfde type woningen als in het BAG register. Caldomus kent bijvoorbeeld meerdere typen gestapelde bouw dan bekend in de BAG en herleidt deze typen op basis van vorm, oppervlakte en gebouwhoogte. CEGOIA definieert één gemiddeld gebouw waar een stukje van alle soorten gebouwen in de wijk in zit om zo tot één gemiddelde prijs te komen. Hier ontstaan mogelijk kleine verschillen in kosten door tussen de modellen.

Tevens bestaat er in het basisdocument van RVO een onderscheid tussen individuele kosten en projectmatige kosten². Projectmatige kosten zijn altijd lager, omdat er grootschaliger wordt ingekocht. Voor een tussenwoning van 1975-1991 bijvoorbeeld zijn de kosten van een individuele aanpak per woning €1000 hoger (van €8240 naar c.a. €9240). Hier moet dus steeds een keuze gemaakt worden tussen projectmatige of individuele kosten of een gemiddelde daarvan.

Samengevat zien we dus drie mogelijke oorzaken voor verschillen in kostenkengetallen voor basis isolatie:

- Verschil in definitie en diversifiëring van gebouwtypes
- Correctie voor projectmatige aanpak
- Actualiseren van kosten uit 2010.

² Met projectmatig wordt bedoeld dat er meerdere woningen dezelfde renovatie ondergaan, waardoor de werkzaamheden projectmatig kunnen worden ingericht.

Tabel 1. Kosten voor schilverbetering voor rijwoning/tussenwoning.

Bouwjaar	RVO (2010) Besparings Pakket	Caldomus R	ETM	DWA Rendabel	CEGOIA Analoog ³	Vesta	Overmorgen warmte
Bron:	-	RVO 2010 + correctie p.p. 2016	Ecofys 2013		RVO 2010 omgerekend naar labelstappen	RVO 2010	Ervaring praktijk
t/m 1945	€11.480	€12.928	€7.200	€12.500	€14.280	€11.930	€10.300-18.500
1946-1964	€7.880	€8.874	€7.200	€8.500	€12.180	€12.133	€8.300-16.500
1965-1974	€8.980	€10.113	€7.200	€10.000	€14.840	€13.197	€8.300-16.500
1975-1991	€8.240	€9.280	€7.200	€9.000	€8.056	€12.900	€6.200-12.400
1992-2005	€1.000	€1.126	€7.200	€1.000	€7.866	€2.018	€1.250-3750
2005-2010	-	-	€7.200	€2.500	- ⁴	-	€1.250
2011-2020	-	-	€7.200	€2.500	- ³	-	€1.250
Gem. label	B	A	B	A	B	B	Beter dan C

³ CEGOIA rekent investeringskosten voor isolatiemaatregelen uit in €/m². De hoogte van de kosten hangt af van het startlabel en streeflabel. Bijvoorbeeld: een sprong van label G naar label B kost 140€/m². Om de tabel hier van bedragen te voorzien is uitgegaan van het startlabel en de oppervlakte van een rijwoning uit de RVO voorbeeldwoningen en een streeflabel van B. Voorbeeldsom: Een rijwoning uit bouwjaar 1946-1964 heeft een startlabel G en een gemiddeld gebruiksoppervlakte van 87 m². Een sprong van label B naar G kost in CEGOIA 140€/m², ofwel 87*140 = €12.180.

⁴ Omdat de RVO Voorbeeldwoningen geen gegevens heeft over het startlabel en vloeroppervlakte voor woningen uit 2005 en verder zijn hier door ons geen bedragen uitgerekend. CEGOIA heeft hier wel kengetallen voor.

4.1.2 Huidige energieprestatie van gebouwde omgeving

De energieprestatie van gebouwde omgeving is voor een groot deel afhankelijk van de isolatieschil in het gebouw. In Nederland zijn er vrij strenge bouweisen opgenomen in het bouwbesluit wat regelmatig wordt bijgewerkt. Echter, gebouw-eigenaren kunnen sinds ingebruikname zelfstandig beslissen of zij aanpassingen willen doen aan het gebouw. Voor een aantal grootschalige aanpassingen zijn vergunningen nodig, maar voor veel aanpassingen zoals het vervangen van glas of installatie van vloerverwarming hoeft dat niet.

Om de informatie over de bouwstaat toch te actualiseren is het in Nederland verplicht om een energie-label af te melden. Dat moet bij verkoop, verhuur of oplevering (nieuwbouw). Vanaf het moment dat een label is afgemeld is deze terug te vinden in [EP-online](#). Dit label is 10 jaar geldig en hoeft pas bijgewerkt te worden na 10 jaar⁵.

5 [Meer informatie](#)

Tabel 2. Verregaande energiebesparingsstappen voor grondgebonden woning.

Woning	Caldomus R++ [€]	CEGOIA A+ ⁶ [€]	Vesta ⁷ [€]	Overmorgen all-electric [€]	ETM [€]	DWA [€]
t/m 1945	31.029	44.982	21.161-24.685	18,500-30.900	-	25.000
1946-1964	26.466	29.319	20.037-21.963	16.500-28.900	-	20.000
1965-1974	32.246	35.722	21.379-23.323	16.500-28.900	-	20.000
1975-1991	32.246	26.818	21.216-23.188	12.400-24.800	-	15.000
1992-2005	34.679	30.438	11.310-17.834	3.700-4.550	-	5.000
2005-2010	37.812	-	11.310-17.834	1.250-4.550	-	5.000
2011-2020	37.812	-	-	1.250-4.550	-	5.000
Beschrijving	Rc vloer = 3,5 m²W/K Rc gevel = 4,5 m²W/K Rc dak = 6,0 m²W/K Triple HR++ glas Geïsoleerde kozijnen Zeer goede kierdichting Label A	Nul-op-de-Meter met elektrische warmtepomp en zonnepanelen	Na-isolatie hellend dak, plat dak en gevel. Nieuwe Rc-waarde ~ 5,0 en aanpassingen ventilatiesysteem ⁸	Beter dan label B, 40-55 kWh/m² (afhankelijk van bouwjaar)	Het ETM splitst huizen uit naar huistype i.p.v. bouwjaar. Tussenwoning: €20.000 Hoekwoning: €26.000 Flat: €15.000 Twee-onder-één-kapwoning: €31.000 Vrijstaand: €44.000 ⁹	Verregaande maatregelen ¹⁰ .

6 Zie ook voetnoot 10. Berekend aan de hand van €/m² - prijs zoals gerapporteerd in warmteanalyse Gouda van CE Delft.

7 Isoleren tot en met label B (zie Tabel 1) en vervolgens meerkosten voor isoleren, uit Vesta 2.0 Uitbreidingen en Data Verificaties, pagina 38. Voorbeeldsom: woning t/m 1945 kost basispakket €11.930. Uit de tabel lees ik voor na-isoleren meerkosten van minimaal-maximaal €9.231-12.755. De totale investering bedraagt dan 21.161-24.685.

8 Vesta heeft naast na-isolatie ook een beschrijving van Nul-op-de-Meter.

9 Het ETM splitst de huizen voorraad uit naar huistype in plaats van bouwjaar. De isolatiekosten waarmee het ETM rekent komen uit de Ecofys studie "De systeemkosten van warmte voor woningen" (2015).

10 In Rapport Woerden Aardgasvrij: Triple glas, voorzetwand of vernieuwen van buitengevel, isoleren van dak aan buitenzijde dakbeschot en vervangen of isoleren van begane grond vloer.

Deze zal dus niet volledig geactualiseerd zijn (energiebesparingsstappen hoeven niet afgemeld te worden), maar wordt in ieder geval voor een gedeelte over tijd bijgewerkt.

Modellen kunnen uitgaan van het afgemelde label in EP-online en koppelen labels aan gebouwobjecten van het BAG register om alvast gedeeltelijk de bouwstaat van de bouwvoorraad te actualiseren. Aan de hand daarvan kan dan een warmtevraag geschat worden. Voor de warmtevraag wordt de theoretische warmtevraag meestal gecorrigeerd op basis van praktijkgegevens uit het promotieonderzoek van Majcen (TU Delft, 2014). Met het huidige label wordt vervolgens de bouwstaat afgeleid uit de RVO Voorbeeldwoningen publicatie. De huidige bouwstaat in dat document komt volgens de Onderzoeksverantwoording uit het WoON onderzoek (BZK) uit 2006. Dat onderzoek wordt driejaarlijks uitgevoerd aan de hand van enquêtes onder een random sampling. Daarmee wordt dus actuele informatie opgehaald en gemiddeld als bijgestelde bouwstaat. In 2018 werd dat nog gedaan met een sample van zo'n 40.000 mensen. Recentelijk zijn de resultaten gepubliceerd. Daarnaast kan gebruik gemaakt worden van de Energiebesparingsverkenner.

De verwachting is dat als een paar gebouwen in een wijk iets verder geïsoleerd zijn dan bekend is in de database van EP-online, dan heeft dat geen grote invloed op de totaalkosten voor isoleren voor de wijk als geheel. Pas wanneer er georganiseerde maatregelen zijn om op grotere schaal te isoleren, dan is een actuele database van energielabels belangrijk.

4.1.3 Energielabel in het eindbeeld

De kostenkengetallen van RVO gaan uit van een isolatiestap naar gemiddeld label B voor de tussenwoningen. Doorgaans wordt gezegd dat voor warmtenetten met een aanvoer van minstens 70 graden Celsius dit een voldoende schil oplevert om comfortabel te verwarmen. Voor laag temperatuur verwarming, bijvoorbeeld via een warmtenet of via een individuele elektrische warmtepomp, wordt meestal aangenomen dat verregaandere maatregelen nodig zijn in zowel isolatie als installatie (speciale radiatoren, vloerverwarming). In tabel 2 wordt een vergelijking gemaakt tussen de meest uitgebreide energiebesparingspakketten in de modellen van deze studie.

Het ETM splitst de huizenvoorraad uit naar huistype in plaats van bouwjaar. Caldomus baseert zijn gegevens op een drieluik aan praktijk cases en CEGOIA en Vesta gaan uit van het relatief nieuwe NoM-concept. Wanneer er dus wordt uitgegaan van een isolatieniveau verder dan gemiddeld label B/A (afhankelijk van bouwtype), dan gaan er grote verschillen ontstaan in isolatiepakketten en bijbehorende kosten.

4.2 Verwarmingstechnieken

Voor diverse onderdelen van een verwarmingstechniek worden prijzen vastgesteld om uiteindelijk de totale kostprijs te bepalen. Daar zijn twee kostencomponenten voor: investeringskosten (incl. vervanging en reparatie) ("Capital Expenditure" of CAPEX) en kosten voor onderhoud en bedrijfsvoering ("Operating Expenditure" of OPEX). De verschillende modellen gebruiken vergelijkbare methodieken om CAPEX en OPEX te bepalen. In deze paragraaf gaan we in op hoe zij dat doen. Wat betreft CAPEX worden soms verschillende kostenkengetallen gebruikt, een aantal worden hier uitgelicht.

4.2.1 CAPEX

Per techniek is er een verschillende kostenopbouw. De waardeketen van een techniek worden in CEGOIA en Caldomus beschreven via opwek, distributie, installatie en gebouw. Kosten vallen dan in die verschillende categorieën. Deze indeling geeft een handige basis voor het beredeneren van diverse scenario's. Binnen de categorieën zijn verschillende stakeholders en worden kosten op verschillende wijzen verrekend. Hoge kosten in distributie en opwek, bijvoorbeeld, zorgen voor een kapitaalintensieve investering voor energiebedrijven, of hoge kosten in installatie en gebouw zorgen voor een kapitaalintensieve investering voor gebouw eigenaren.

In respectievelijk 4.2.1.1 en 4.2.1.2 zijn beschrijvingen opgenomen van hoe het Hoog Temperatuur warmtenet en de All-Electric variant in de verschillende modellen worden gemodelleerd.

Tabel 3. Beschrijving van componenten in een hoog temperatuur warmtenet.

Categorie	Component
Gebouw	Isolatie naar label gemiddeld label B, zie hoofdstuk 4.1.1.
Installatie	Verwijderen van gas. Hier rekenen netbeheerders een vast bedrag voor. In de modellen zagen we €500. Inpandige distributie (evt. warmtestation, afleverset, leidingen, warmteafgiftesystemen). Een model moet afwegen of er in gebouwen reeds een collectief distributienet aanwezig is of dat er individuele aansluitingen zijn. Bij een collectief distributienet worden kosten bespaard, omdat het een kwestie is van gasketel en leidingen eruit, warmtestation en leidingen erin. Bij een individuele installatie moet een ruimte gezocht worden voor het warmtestation en moet een keuze gemaakt worden tussen één collectieve aansluiting of meerdere individuele. We zagen hiervoor in de modellen vaak een kostenkengetal of bandbreedte per aansluiting terug; in werkelijkheid zul je verschillende leidinglengtes hebben per gebouw en is de verhouding collectief / individueel sterk afhankelijk van de gebouwen.
Distributie	Aansluitkosten van pand op wijkdistributienet. Dit is het stuk transportleiding van warmtestation (buiten pand of inpandig) tot het Warmte Overdracht Station (WOS). De kosten hangen af van de relatieve locatie van de WOS ten opzichte van de warmtestations en de kosten voor het materiaal en de aanleg van de transportleidingen daartussen. Deze kosten zijn lastig te modelleren omdat de locatie van WOS en warmtestations afhangt van engineering (bv. locatie is afhankelijk van plekken waar een gemeente/gebouweigenaren ruimte ter beschikking kunnen stellen, grootte en aantal stations hangt af van aantal aansluitingen en warmtevraag) en de werkelijke kosten voor de aanleg van de leidingen sterk afhangen van de grond en eventuele obstakels (bomen, water, wegen e.a. bestaande infrastructuur). Modelmatig wordt daarom gebruik gemaakt van kostenkengetallen per aansluiting. Transportleiding. Dit is de leiding die warmte vanaf de bron (daad werkelijke bron of een aftakking van een groter transportnet) transporteert naar de WOS in de wijk. Om dit modelmatig te berekenen zijn er een aantal uitdagingen; warmtenetten kunnen meerdere bronnen en meerdere buurten als afnemers hebben waardoor het toerekenen van het volledige transportnet aan één buurt vanaf één bron niet een juiste benadering is. Een tweede uitdaging is het bepalen van de locatie van de WOS. In werkelijkheid bepaalt de locatie van de WOS de hoeveelheid transportleiding van binnenkomst buurt – WOS en van WOS – gebouwen. De modellen gaan daarom vaak uit van een gemiddelde van 2 kilometer transportleiding als standaardwaarde waarvan afgeweken kan worden afhankelijk van de lokale context. Om te rekenen naar andere afstanden wordt vaak een kengetal gehanteerd in €/m transportleiding. Er moet daarnaast een aanname worden gedaan voor de capaciteit op de WOS om leidingen te kiezen met het juiste transportvermogen. Warmte Overdracht Station (WOS) In de modellen wordt een kengetal gehanteerd voor kosten per MW capaciteit (meestal €125.000 / MW) met de aanname dat dit lineair schaalt met capaciteit. De warmtevraag bepaalt het benodigde vermogen.
Opwek	Inkoop warmte Er worden tarieven gerekend voor de inkoop van warmte bij de bron; voor een maatschappelijke kosten benadering is dat op zijn minst de kostprijs voor het uitkoppelen van de warmte. Die kan per bron verschillen. We zien sommige modellen differentiëren naar bronnen, andere modellen kiezen één prijs per GJ warmte.

Hoog temperatuur warmtenet

In tabel 3 wordt van een aantal onderdelen van een Hoog Temperatuur Warmtenet beschreven hoe zij modelmatig kunnen worden meegenomen in een kostenanalyse. Er is voor gekozen om ze op componentniveau in deze studie te beschrijven en niet in detail kostenkengetallen te behandelen. De reden hiervoor is dat eigenlijk blijkt dat met name in de beschrijving van de warmtedistributienetten op buurtniveau en de distributienetten in het gebouw nogal wat aannames nodig zijn om een standaardgetal te krijgen die toepasbaar is op alle buurten in Nederland. Omdat de dichtheid van warmtevraag in een buurt zeker niet altijd homogeen verdeeld is en de locatie van infrastructuur afhangt van o.a. ruimte in de ondergrond en in de gebouwen, zal hier om te komen tot realistische getallen altijd de lokale context moeten worden betrokken. Alle bureaus hebben wel in meer of mindere mate diverse leidingdelen van een warmtenet gemodelleerd, maar in het vervolg moet het warmtenet nog in detail worden ontworpen.

All-electric

Voor de keten van een all-electric voorziening wordt in alle modellen aangenomen dat alle woningen een aansluiting hebben op het elektriciteitsnet. Het meest voorkomende all-electric concept is de installatie van een warmtepomp die met behulp van elektriciteit en hetzij lucht hetzij bodemwater warmte van een lage temperatuur produceert. Daarnaast moet er warm water geproduceerd worden voor douche en kraanwater, hetgeen minstens 60 graden Celsius moet worden om te voldoen aan de tapwaternorm om de groei van legionellabacterie te remmen. Hier worden vaak boosterpompen en boilers voor ingezet. Een elektriciteitsvoorziening als deze heeft niet zoals bij warmtenetten het ACM als toezichthouder waar de warmteafgiftesets zijn genormeerd. Derhalve kunnen er afhankelijk van de productiewijze van de warmtepomp (lucht of water), de leveranciers in de omgeving en keuzes in comfort en luxe (vermogen, geluid, formaat) verschillen ontstaan in de categorie installatie.

Een tweede uitdaging is de herkomst van elektriciteit. Anders dan het hoog-temperatuur warmtenet concept, kan elektriciteit zeer lokaal en individueel worden opgewekt met bijvoorbeeld zonnepanelen. De keuze kan ook gemaakt worden voor een wijk, gemeente of regionale schaal oplossingen

zoals windmolenparken of zonnenvelden. Omdat hier al op voorhand een keuze is met hele verschillende waardeketens is er hier eigenlijk al niet meer te spreken van één all-electric concept en zul je dus al verschillende scenario's willen gaan uitrekenen.

Een derde uitdaging is het feit dat het elektriciteitsnet meer gebruikers heeft dan alleen de gebouwde omgeving. Onze auto's, openbaar vervoer en vrachtverkeer worden steeds verder geëlektrificeerd. Diverse laadpunten worden gebouwd op het elektriciteitsnet om in onze transportbehoeftes te voorzien. Het elektriciteitsnet zal als gevolg van een grotere afname aan elektriciteit moeten worden uitgebreid en verzwakt. Het dilemma in een kosten baten berekening is dan waar je de scope legt van de analyse; voor een vergelijking met warmtenetten moet de netverzwaring beperkt worden tot verzwaring die veroorzaakt wordt door de gebouwde omgeving. Anders ontstaat immers een verschil in waardeketen en dan heeft de vergelijking niet zoveel zin meer. En dan kom je op een dilemma die ook in het klimaatakkoord wordt onderhandeld: welk deel van de energietransitie komt op het bordje mobiliteit en welk deel op het bordje gebouwde omgeving?

In tabel 4 op de volgende pagina worden voor een aantal modellen aspecten van de all-electric waardeketen met elkaar vergeleken. Voor de leesbaarheid konden hier drie modellen in de tabel worden opgenomen; er is gekozen voor drie modellen waarvoor de implementatie van netverzwaring sterk onderling verschilt. De overige modellen zijn opgenomen in de appendix. Wederom zijn dit niet alle componenten; de tabel is bedoeld om inzicht te geven in verschillen die, zoals hierboven beschreven, ontstaan doordat er diverse geuren en kleuren aan elektrische warmtevoorzieningen bestaan.

Samengevat blijkt uit deze analyse een aantal belangrijke verschillen:

- Er is geen eenduidig beeld over het minimum niveau waarop een gebouw geïsoleerd moet zijn om comfortabel met lage temperatuur te verwarmen. In deze analyse is nog niet meegenomen dat er ook verschillende manieren zijn om laag temperatuur warmte te distribueren in de woning (bv. convectoren, speciale radiatoren, vloerverwarming, muurverwarming).

Tabel 4. Beschrijving van een aantal componenten van een all-electric waardeketen in Caldomus, DWA en ETM. De lijst is niet compleet maar is ter illustratie van een aantal verschillen tussen modellen.

Categorie	Component	Caldomus	DWA	ETM
Gebouw	Minimum Isolatie voor een all-electric woning	Optimalisatie opwekcapaciteit warmtepomp en elektriciteitsvraag	Minstens bouwstaat van 1992 (label C rijwoning, label B flatwoning)	Eigen keuze
Installatie	Bron van elektriciteit voor de warmtepomp	Elektriciteitsnet en PV panelen	Elektriciteitsnet	Diversen
	Productiewijze warmtepomp	Lucht	Lucht	Lucht of bodem
	Prijs warmtepomp	€7.579	Afhankelijk van vermogen ¹¹ : €7.500 (4 kW) – €12.000 (10 kW)	€9246 (lucht) en €12746 (bodem). Beide met €1500 installatie kosten
	Type tapwatersysteem	Warmtepomp met buffervat	Warmtepomp met buffervat	Diverse opties mogelijk
Distributie / netverzwaring	Oorzaken van een verhoogde elektriciteitsvraag	Verwarmen en elektrisch koken	Verwarmen en elektrisch koken	Zowel GO als mobiliteit.
	Implementatie van netverzwaring in het model	Optimalisatie toe- genomen elektriciteitsvraag i.r.t. capaciteit	Kengetal per woning en kengetal per m ² (voor utiliteit)	Optimalisatie van aanbod om te voorzien in piekvraag + 25% o.b.v. merit order en verzwaren ¹² .
	Hoogspanning	Niet meegenomen	Niet uitgesplitst	Meegenomen
	Middenspanning	Meegenomen	Niet uitgesplitst	Meegenomen
	Laagspanning	Meegenomen	Niet uitgesplitst	Meegenomen
Opwek	Type opwek (individueel/ collectief)	Combinatie elektriciteitsnet met PV	Elektriciteitsnet. Combinatie met PV wel mogelijk, maar niet gemodelleerd.	Diversen. PV zowel individueel als collectief (zonneweide) mogelijk
	Prijs zonnepanelen	€231/m ²	€185/m ² ¹³	€221/m ² ¹⁴

¹¹ DWA Rapport Woerden Aardgasvrij.

¹² Wanneer er minder aanbod is dan de piekvraag + 25%, dan is netverzwaring nodig. Voor de inzet van elektriciteitsbronnen wordt een merit order gehanteerd. Dat houdt in dat op basis van criteria (bijvoorbeeld kosten) een prioriteitsvolgorde wordt gebruikt voor de inzet van elektriciteitsbronnen.

¹³ DWA Rapport.

¹⁴ Het ETM rekent per paneel van 1,6 m² €217 investeringskosten en €136 installatiekosten. Caldomus rekent €799k/MWe, dus $0.000125 * 799.000 = \text{c.a. } 100\text{€}/\text{m}^2$.

- Er worden verschillende warmtepompen ingezet, zowel wat betreft techniek als wat betreft capaciteit. Daardoor ontstaat een bandbreedte in investeringskosten van €7500-€18.500 per woning.
- Er wordt in elk model uitgegaan van stroom uit het huidige elektriciteitsnet. Deze is momenteel nog grotendeels grijs. Alle modellen staan

PV-panelen toe (concurrerend met de elektriciteit die uit het net moet komen). Een aantal modellen, zoals het ETM, staat ook collectieve systemen toe zoals zonneweides.

- Er is geen eenduidig perspectief op hoe netverzwaring gemodelleerd moet worden. Implementatie varieert van modellen die een vast bedrag

rekenen afhankelijk van het aantal aansluitingen (WTA, DWA, Vesta) en modellen die de infrastructuur modelleren (ETM, Cegoia, Caldomus). Daarin wordt m.u.v. het ETM (waar mobiliteit is meegenomen) alleen rekening gehouden met een toegenomen elektriciteitsvraag door warmtepompen en elektrisch koken.

Kortom, als je alleen al kijkt naar de prijs van een warmtepomp per woning, dan zie je grote verschillen ontstaan in uitkomsten van de modellen. Een rekenvoorbeeldje: De eigenaar van een rijtjeswoning wil een warmtepomp aanschaffen. Dat kan voor €7500-18500. De warmtepompen gaan 15 jaar mee. Voor 2050 (incl. 2019 zijn dat nog 32 jaar) zullen twee warmtepompen gekocht moeten worden. Hanteer je geen verdisconteringsvoet en deel je het bedrag door 32, dan kunnen de jaarlasten voor de woning tussen circa €469 en €1156 komen te liggen.

4.2.2 OPEX

Voor nieuwe projecten zijn OPEX kosten lastig te schatten. In alle modellen zie je in ieder geval diverse onderhoudscomponenten terug voor onderdelen zoals de opwekinstallaties van warmte of de verwarmingsinstallatie in de woning. Dergelijk onderhoud wordt vaak geschat als percentage van de totale investeringskosten. Die tactiek zie je bijvoorbeeld terug in het Caldomus model en bij DWA. Daarnaast zijn er kosten voor personeel, het verbruik van brandstoffen en de uitstoot van CO₂.

Om de werkelijke kosten te schatten vandaag de dag, kun je een 'prijsspeil' doen, d.w.z. de gegevens worden in offerte opgevraagd bij leverende partijen. Ook kun je retrospectief schatten op basis van kostenkengetallen, d.w.z. de gegevens zijn op basis van reeds opgeleverde projecten en worden opgevraagd bij energiebedrijven. Een combinatie van beide worden door de meeste modelbureaus gedaan. Naar de toekomst toe is, zoals dat ook voor CAPEX geldt, veel onzekerheid over hoe kosten zich ontwikkelen. De prijs van personeel bijvoorbeeld kan door schaalgrootte afnemen, maar kan ook door schaarste op de arbeidsmarkt toenemen. Daarnaast moet een keuze gemaakt worden over welk soort onderhoud wordt toegerekend aan een verwarmingstechniek. Een voorbeeld is het verwijderen van asbest in een woning. Ook is de hoogte van kosten in sterke mate afhankelijk van subsidiëring en wet- en regelgeving. Zo heeft Provincie Zuid-Holland voor asbest tot 2023 de regeling Asbest eraf, zonnepanelen erop voor bedrijven. CO₂-emissie beprijzing wordt (o.a.) door Europese wetgeving beïnvloed en kan per jaar veranderen. SDE+ beïnvloedt de productiekosten van hernieuwbare energie.

OPEX leent zich hier voor gevoeligheidsstudies zoals scenario's met en zonder SDE+, diverse hoogtes aan CO₂-beprijzing en toename en afname in kosten van personeel. Het Vesta model kan hier bijvoorbeeld mee rekenen.



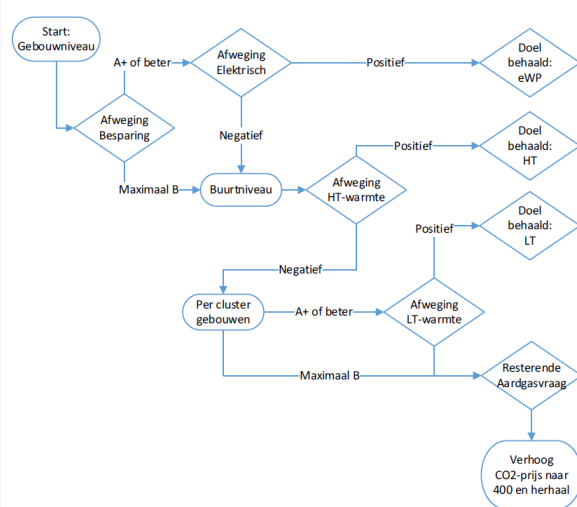
Bewerking van gegevens

In de rekenmodellen voor energietransitie zitten sterke afhankelijkheden tussen diverse bouwblokken. De hoeveelheid duurzame energie die bijvoorbeeld nodig is voor het verwarmen van een gebouw hangt sterk af van de maatregelen die genomen worden om energieverbruik te verminderen. Net als met Meneer van Dale wacht op antwoord maakt de volgorde van de bouwblokken uit voor de uitkomst; investeer je bijvoorbeeld eerst maximaal in energiebesparen, dan hoeft er minder geïnvesteerd te worden in het ontwikkelen van duurzame energie. Dit is het principe van Trias Energetica. In een ander scenario zou ook eerst maximaal geïnvesteerd kunnen worden in infrastructuur voor hoog temperatuur warmte, zodat er minder geïnvesteerd hoeft te worden in het isoleren van woningen. Dit is het principe van “Warmte, tenzij”. Beide scenario’s rekenen met dezelfde getallen en formules. Ook bereiken beide scenario’s het doel van een aardgasvrije warmte-

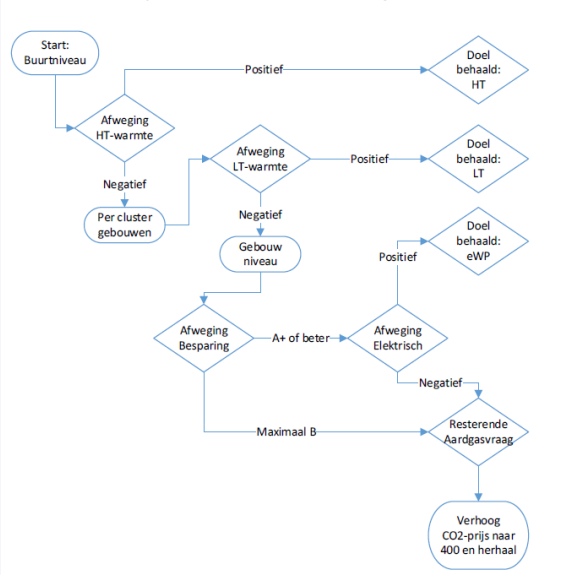
voorziening. De uitkomst, echter, kan verschillen op aspecten van betaalbaarheid, duurzaamheid, betrouwbaarheid en acceptatie.

Adviesbureaus kunnen de volgorde van rekenregels in het model aanpassen om dergelijke scenario’s uit te rekenen. In Drechtsteden¹⁵ heeft PBL een aantal scenario’s uitgerekend, hieronder twee voorbeelden die principes van Trias Energetica en Warmte, tenzij volgen.

“Trias energetica” (in Vesta: “Energiebesparing-Elektrisch”)



“Warmte, tenzij” (In Vesta: “Collectief-Hoge Temperatuur”)

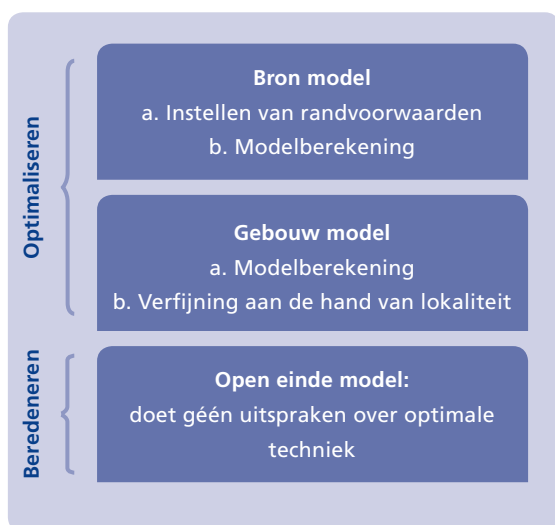


Figuur 6. Twee beslisbomen voor het tot stand brengen van een aardgasvrije gebouwde omgeving; uit een studie van PBL met het Vesta model voor de regio Drechtsteden.

¹⁵ Technische en economisch potentieel voor een aardgasvrije gebouwde omgeving in de regio Drechtsteden, te vinden op https://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2018-technisch-en-economisch-potentieel-aardgasvrije-gebouwde-omgeving-Drechtsteden_3419.pdf.

Een andere categorie scenario's die we tegenkomen is de schaarste-discussie van aanbod aan duurzame energie. Stel bijvoorbeeld dat het aanbod duurzame energie onbeperkt is, dan kunnen in theorie alle gebouwen of buurten gebruik maken van die bron. Aanbod volgt dan de werkelijke vraag. Andersom kan het aanbod duurzame energie als beperkt worden ingesteld. Gebouwen of buurten die het goedkoopst aangesloten kunnen worden op die energiebron hebben dan prioriteit. Niet alle gebouwen of buurten kunnen meer gebruik maken van die energiebron, ook al zou dat de meest kosteneffectieve toepassing zijn geweest. Geloof je in dat aanbod volgt op vraag, dan heb je baat bij een scenario dat geen beperkingen instelt op energiebronnen. Dit noemen we in deze studie een gebouw model. WTA, Aardgasvrije Wijken en Caldomus voeren hun analyses vaak op deze manier uit. Wil je inzicht verkrijgen in lokale mogelijkheden en prioritering aanbrengen in de inzet van schaarse energiebronnen, dan wil je aanbod beperkt instellen. Dit noemen we in deze studie een bron model. CEGOIA en Vesta doen dit soort analyses meestal.

Zowel de gebouwmodellen als de bronmodellen optimaliseren de uitkomst op basis van criteria; het gebouwmodel zoekt naar de meest kosteneffectieve manier van verwarmen en het bronmodel zoekt naar de meest kosteneffectieve manier van verwarmen rekening houdend met schaarste van de bron. Beide soorten modellen noemen we in deze studie optimaliserende modellen.



Figuur 7. Modelfilosofie.

Het Energietransitiemodel van Quintel is een beredenerend model. De gebruiker krijgt een startsituatie of benchmark gepresenteerd met bijbehorende totale kosten en baten (in zowel euro's als CO₂, werkgelegenheid, etc.). Vervolgens kan de gebruiker variabelen aanpassen om mutaties in de uitkomst te onderzoeken. Een optimaliserend model zou dit voor de gebruiker doen en stuurt bijvoorbeeld op laagste maatschappelijke kosten.

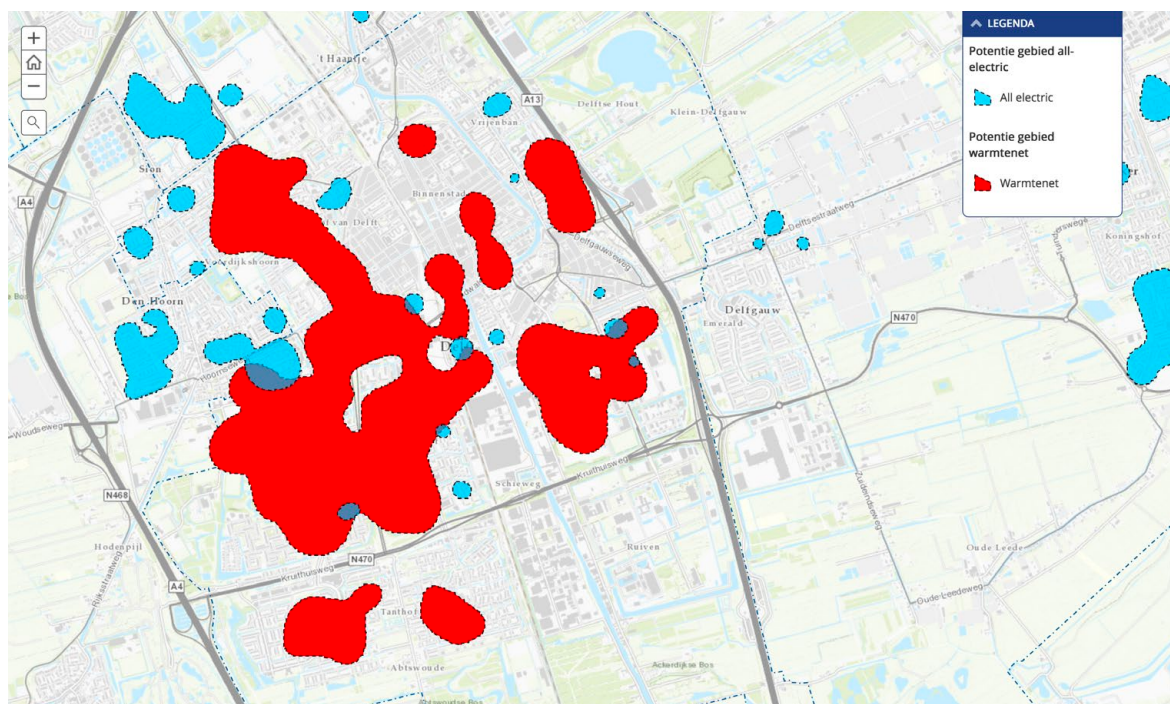
Dit onderscheid in perspectief wat de modellen bieden noemen we in deze studie de modelfilosofie en wordt samengevat in onderstaande figuur 7.

Ten slotte zijn we nog een derde categorie aan scenario's tegengekomen die in de rekenmodellen nog niet altijd kunnen worden uitgerekend. Dit gaat om zogeheten "Ruimtelijke optimalisatie", wat een studie is naar of schaalgrootte of het anders clusteren van gebouwen kan leiden tot betere business cases. Een warmtenet kan bijvoorbeeld uitgerekend worden binnen één buurt of – op een ander schaalniveau – voor een cluster van buurten. Ook zijn buurten niet altijd homogeen wat betreft bebouwingsdichtheid en woningtypes. Logische groepering van gebouwen hoeft dus niet altijd de indeling van een buurt te volgen. In de WTA is bijvoorbeeld een analyse opgenomen voor zogeheten "potentie-eilanden".

Samengevat zijn er een aantal categorieën aan volgordes van berekeningen en modelfilosofie die tot verschillen in uitkomsten leiden:

- Een model kan beredeneren of optimaliseren;
- Een model kan bronnen onbeperkt of beperkt instellen;
- Een model kan spelen met de volgorde van energiebesparen en inzet van energie. Dit levert varianten op zoals Trias Energetica en Warmte, tenzij;
- Het groeperen van gebouwen wordt doorgaans op buurtniveau gedaan. Andere vormen van clustering (in vorm en schaalgrootte) kunnen tot andere resultaten leiden. Dit noemen wij ruimtelijke optimalisatie.

Deze verschillen worden niet opgelost wanneer er gekozen wordt om te standaardiseren naar één model. Wel kan een model zo gebouwd worden dat het meerdere scenario's kan berekenen. Het is aan de gebruiker (vaak gemeente) om te besluiten welke scenario's interessant zijn.



Figuur 8. Potentie-eiland Warmte Transitie Atlas, provincie Zuid-Holland.



Uitkomst

6.1 Verdisconteringsvoet

Elke verwarmingstechniek heeft een eigen waardeketen met opwek, distributie en levering waar investeringen voor worden gedaan. De infrastructuur ligt er niet meteen en baten volgen pas wanneer aansluitingen op warmte of elektriciteitsnet zijn gerealiseerd. De modellen rekenen kosten vaak om naar jaarlasten. Dit wordt gedaan om te kunnen bepalen of de investering nu, op termijn, rendabel is (positieve netto contante waarde NCW+). Deze NCW+ wordt beïnvloed door de gekozen rentevoet (verdisconteringsvoet) en het gekozen eindjaar. De hoogte van de verdisconteringsvoet is van grote invloed op de jaarlasten en daarmee dus ook op de keuze tussen verwarmings technieken. Zie tabel 8 in de Appendix voor een overzicht van hoe modellen dit implementeren. Daarin is te zien dat er tussen de modellen (nog) geen consistentie is wat betreft verdisconteringsvoeten. We zien een aantal varianten:

- Kosten maatschappelijk verdisconteren: een totale maatschappelijke kosten benadering;
- Kosten per toepassing verdisconteren: een business case benadering.

We zien ook varianten in welke ‘groepen’ een verdisconteringsvoet toegewezen krijgen. Zo wordt meestal onderscheid gebruikt tussen groot en kleinverbruikers (glastuinbouw, utiliteiten en industrie krijgen een hoger percentage dan huishoudens) en type eigenaren (particulier of huur). En verder kunnen verschillende onderdelen van de waardeketen (opwek, infrastructuur, gebouw) een eigen verdisconteringsvoet krijgen. Door vervolgens eigenaren toe te wijzen aan componenten kunnen de jaarlasten per stakeholder in deze modellen worden uitgerekend.

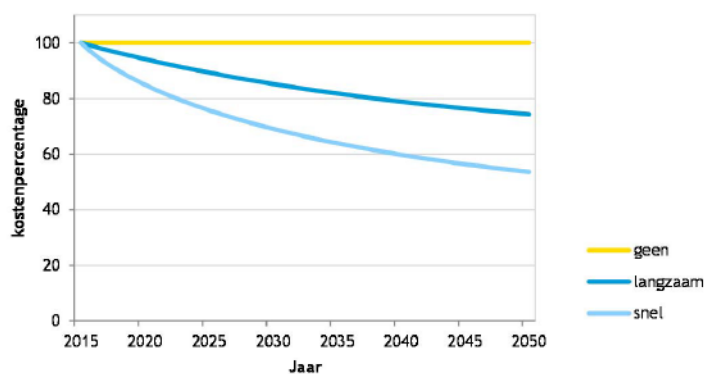
Dit laat zien dat de modellen ieder een eigen kijk hebben op de waardeketen waarover kosten worden verrekend. Dat maakt absolute kosten tussen de modellen moeilijk 1 op 1 vergelijkbaar. Verder speelt mee dat het zichtjaar tussen projecten kan verschillen. Soms wordt een onderzoek geprojecteerd op 2050, soms op 2030. Dit hangt af van de ambitie van een gemeente/opdrachtgever.

Dat maakt uitkomsten in absolute zin moeilijk 1 op 1 vergelijkbaar tussen de modellen of tussen projecten. Op een hoger abstractieniveau doen alle modellen een uitspraak over welke verwarmings-techniek maatschappelijk de beste keuze is door, met een eigen set uitgangspunten, de maatschappelijke kosten tussen de technieken onderling te vergelijken. Daarvoor is het niet erg als er verschil zit tussen de modellen. De conclusies van de modellen zijn in relatieve zin (“welke techniek is het meest rendabel voor een wijk”) wel onderling te vergelijken.

6.2 Leercurve

Naast dat de waarde van geld over tijd verandert, verandert ook de kostprijs van bijvoorbeeld een warmtepomp over tijd. Doorgaans wordt aangenomen dat een nieuwe uitvinding in het begin duur is, maar doordat makers van de uitvinding steeds handiger worden in de productie wordt deze steeds efficiënter geproduceerd en hierdoor goedkoper. Dit wordt een zogeheten ‘leercurve’ genoemd volgens de principes van ‘leren door het te doen’.

Een van de bekendste voorbeelden van een energieproduct waarvan de kostprijs sterk is afgenomen is de PhotoVoltaic Cell of PV-paneel, beter bekend als de zonnepanelen. Die zouden in kostprijs maar liefst in honderdvoud zijn afgeno-



Tabel 5. Leercurve in CEGOIA en Vesta. Voorbeeld uit Scenario's voor de warmtetransitie in Den Haag¹⁸.

men sinds 1950 (Nemet 2005). In het discours van nieuwe verwarmingstechnieken wordt vaak de leercurve gebruikt om aan te geven dat dure apparaten vandaag de dag over tijd goedkoper en daarmee betaalbaarder gaan worden. Een warmtepomp, de opwek van waterstof, seizoensopslag, zouden allemaal nog een leercurve ondergaan en daarmee op termijn betaalbaarder worden. Hierdoor wordt de initiële hoge prijs geen argument om te stoppen met de ontwikkeling ervan. Dit betekent bijvoorbeeld ook dat pioniers of early adapters een hogere prijs betalen dan volgers. Voor een aantal mensen kan de leercurve dan ook juist een argument zijn om vooral nu niets te doen en te wachten op betere prijzen.

Adviesbureaus gaan verschillend om met dit effect. Over Morgen, Caldomus¹⁶ en DWA gaan uit van de techniek van vandaag. Dat wil zeggen dat zij in hun analyse geen aannames doen over kostprijsreductie naar de toekomst toe. Zodoende krijg je een zuiver beeld van wat vandaag de dag mogelijk en wenselijk is. Vesta en CEGOIA hanteren een leercurve die instelbaar is. Zo kun je de leercurve op nul zetten (geen leercurve), kun je hem langzamer of sneller instellen afhankelijk van hoe snel de verwachting is dat prijzen zich zullen ontwikkelen, en kun je hem zowel positief (kostprijsreductie) als negatief (kostprijsstijging) instellen. In de voetnoot is een referentie opgenomen van

hoe de leercurve in Vesta is gemodelleerd¹⁷. ETM gaat in de benchmark uit van 0% leereffect, maar laat de gebruiker van het model zelf een leereffect instellen.

Afhankelijk van het zichtjaar en het gekozen leereffect (geen, langzaam of snel) geeft de leercurve een procentuele korting op de investeringskosten van diverse componenten (zie tabel 5).

In dit voorbeeld kan de korting oplopen tot wel 50%. Het effect op de investeringskosten is daarmee dus enorm. Aangezien de onderhoudskosten (onderdeel van OPEX) doorgaans gedefinieerd wordt als percentage op de investeringskosten, heeft de leercurve ook invloed daarop.

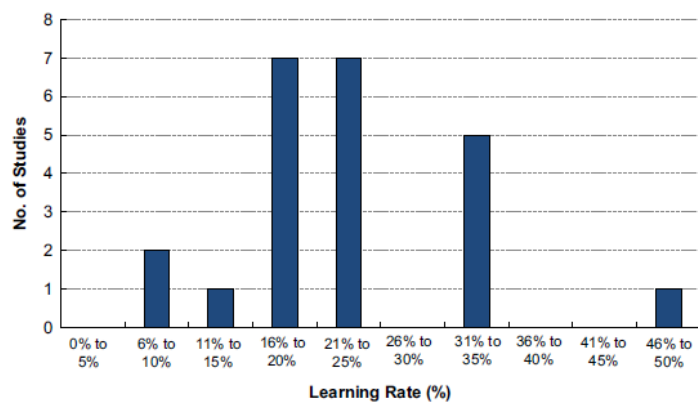
Uitdaging hierin is om voor alle technieken vast te stellen welke leercurve daarbij hoort. Voor PV panelen is daar volop onderzoek voor geweest (Rubin 2015) (zie figuur 9).

Zoals je kunt zien rekenen diverse studies andere percentages uit. Dat komt gedeeltelijk door zichtjaren (welke periodes neem je mee?) en gedeeltelijk door de rekenmethodiek (bijvoorbeeld welke kosten worden aan leereffect toegeschreven?). Voor PV-panelen wordt ter discussie gesteld of het leereffect met de definitie 'leren door te doen' wel de grootste parameter is voor de kost-

¹⁶ Innoforte heeft aangegeven dat een leercurve wordt ontwikkeld voor een nieuwe versie van Caldomus.

¹⁷ Vesta 2.0 – Uitbreidingen en dataverificaties.

¹⁸ Scenario's voor de warmtetransitie in Den Haag, Raadscommissie 30 maart 2017, te vinden op <https://denhaag.raadsinformatie.nl/document/5165408/1>
Presentatie_dhr_B_Schepers_%28CE_Delft%29.



Figuur 9. Grafiek met de Investerings leercurve voor PV vanuit literatuur (Rubin 2015).

prijsreductie. In een studie blijkt bijvoorbeeld de grootste impact de dimensionering van de fabriek te zijn, hetgeen in grootste mate beïnvloed wordt door risico perceptie en verwachtingen van vraaggroei (Nemet 2005). Overheden hebben via subsidiëring, marktordening en andere instrumenten daar onder andere invloed op.

De leercurve die investeringskosten reduceert is een relevante gevoeligheidsanalyse in de energietransitie modellen. In het bespreken van uitgangspunten en modelinstellingen voorafgaand aan de berekening is ook het bespreken van het wel of niet inzetten van een leercurve een belangrijk onderdeel van het proces.

Tenslotte moet in de discussie ook worden opgenomen dat de kostprijs niet per definitie de prijs is die klanten betalen. Daar zitten nog rendementen op die bijvoorbeeld winst genereren, risico's afdekken, de tijdswaarde van geld corrigeren of netverliezen (geldt voor zowel warmte als gas en

elektriciteit) compenseren. Ook profiteren verschillende partijen in de waardeketen van kostenreducties. Als bijvoorbeeld een warmtepomp bij de bewoner thuis zit en de prijs ervan neemt af, dan profiteert de bewoner ervan. Maar, als je bijvoorbeeld kijkt naar het laag-temperatuur warmtenet in Hengelo, dan kan de warmtepomp ook eigendom zijn van de netbeheerder of van de energieleverancier en dan is het effect voor de bewoner kleiner.



Conclusies en aanbevelingen

In deze studie is onderzocht hoe verschillen in uitkomsten ontstaan wanneer verschillende energietransitie rekenmodellen verduurzamingsroutes uitrekenen voor hetzelfde gebied. In hoofdstuk 4.1 is daartoe eerst gekeken of de zes modellen op eenzelfde manier de gebouwde omgeving inventariseren en karakteriseren. Alle modellen gebruiken het BAG register om gebouwobjecten te inventariseren en het CBS om buurten te definiëren. Daarmee is, als het ware, het startpunt van de modellen vrijwel hetzelfde, zodat verschillen in andere aspecten van het model moeten ontstaan. In de studie is ingegaan op verschillende energiebesparingspakketten (hoofdstuk 4.1), verwarmingstechnieken (hoofdstuk 4.2), volgorde van bewerkingsschappen en modelfilosofie (hoofdstuk 5) en verschillende manieren van verrekenen (hoofdstuk 6.1.1) en het gebruik van een leercurve (hoofdstuk 6.1.2). In dit hoofdstuk worden de conclusies en aanbevelingen gepresenteerd voor energietransitie rekenmodellen (hoofdstuk 7.1), gemeenten (hoofdstuk 7.2) en de Leidraad van het Klimaat en Energie Akkoord (hoofdstuk 7.3).

7.1 Conclusies en aanbevelingen voor energietransitie rekenmodellen

Alle modellen delen de gebouwde omgeving in naar grondgebonden, gestapelde en utiliteitsbouw. Vervolgens worden er diverse subtypes gedefinieerd, waarbij in de meeste gevallen wordt uitgegaan van de RVO publicatie Voorbeeldwoningen uit 2010 en de informatie van objecten (zoals bouwjaar) in het BAG register.

Het basispakket isoleren is in alle modellen gebaseerd op dezelfde RVO Voorbeeldwoningen publicatie. De kosten zijn gebaseerd op een oud prijspeil. Bij het actualiseren van de kosten kunnen kleine verschillen ontstaan tussen de modellen. De verschillen blijven echter marginaal (conclusie 1a).

Grotere verschillen ontstaan bij de inzet van verregaande isolatiemaatregelen. Voor stappen verder dan energielabel A zijn nog geen standaarden zoals de RVO publicatie. Er worden nieuwe concepten ontwikkeld, zoals Nul-op-de-Meter, waarvoor nog weinig praktijkervaring is. Uit de analyse is gebleken dat er verschillende verregaande isolatie pakketten bestaan tussen de modellen waardoor er een bandbreedte ontstaat van tussen de €5000-37.812 afhankelijk van het gebouwtype en pakket. Dit is een probleem met name voor het all-electric concept, omdat daarvoor wordt gezegd dat verregaande isolatie nodig is om een woning comfortabel te verwarmen (conclusie 1b). Echter, de verschillen zijn ook een technische realiteit door verschillende gebouwtypes, technieken en beperkte praktijkervaring.

Het bovenstaande leidt tot de volgende aanbevelingen voor de modelbouwers en bouw en installatie bedrijven:

Conclusies isolatiepakketten gebouwde omgeving

Conclusie 1a: In het basispakket isoleren zijn op gebouwniveau marginale verschillen in kosten getallen.

Conclusie 1b: Voor verregaand isoleren (verder dan energielabel A) bestaan geen standaarden en ontstaan grote bandbreedtes in kosten op gebouwniveau. Dit heeft groot effect op het all-electric scenario, waarvoor vaak verregaand isoleren een vereiste is.

Aanbevelingen isolatiepakketten gebouwde omgeving

Aanbeveling 1a: Beschrijf goed welke maatregelen verder dan energielabel A in het model zitten.

Aanbeveling 1b: Stem met de opdrachtgever af welke maatregelen gewenst en mogelijk zijn om mee te nemen in de modelberekening.

Aanbeveling 1c: Het is aan te bevelen meer ervaring op doen voor isolatiemaatregelen verder dan energielabel A (bv door Rvo in samenwerking met bouwsector).

In hoofdstuk 4.2 is gekeken naar de waardeketens. In hoofdstuk 4.2 is gekeken naar de waardeketens voor hoog temperatuur warmtenetten (HT-warmte) en verwarmen met individuele elektrische warmtepompen (All-electric). Alle bureaus baseren getallen voor energie en kosten voor componenten bij beide technieken op basis van aangeleverde getallen van energieleveranciers, netbeheerders en installatiebedrijven (conclusie 2a).

Voor het HT-warmte scenario zijn er voor het modelleren een aantal keuzes voor de infrastructuur die gemaakt moeten worden, zoals de locatie van het Warmte Overdracht Station (WOS), de aanwezigheid van ketelhuizen om als warmtestation te dienen en de lengte aan leidingen die zowel in pandig als buiten pandig nodig zijn. Daarom wordt in de modellen gebruik gemaakt van kostenkengetallen per aansluiting die door energiebedrijven zijn aangeleverd (conclusie 2a). Het is aanbevolen om te checken of standaard uitgangspunten, zoals 15 meter pijpleiding van WOS naar aansluiting op gebouw, of de verhouding gebouwen met en zonder ketelhuis, kloppen met

de werkelijkheid van een buurt. Daarvoor kan het zijn dat gebouweigenaren of gemeente gegevens moeten aanleveren (aanbeveling 2a).

Voor het All-electric scenario blijkt een grote bandbreedte te bestaan in kosten voor de warmtepomp (€7500-18.500 per woning). Dit forse verschil ontstaat doordat er verschillende warmtepompen kunnen worden ingezet (conclusie 2b). Qua productiewijze van warmte gebruiken de goedkopere warmtepompen lucht en de duurdere warmtepompen water uit de bodem. Ook zijn er kleine en grote warmtepompen afhankelijk van de benodigde productiecapaciteit. Verder zijn de waardeketens van all-electric tussen de modellen niet 1-op-1 vergelijkbaar (conclusie 2c). Dat blijkt uit een analyse van de manier waarop netverzwaring wordt gemodelleerd. Een aantal modellen berekenen alleen netverzwarkosten door aan te nemen dat elke geëlektrificeerde woning eenzelfde bijdrage heeft aan de netverzwaring op het laagspanningsnet. Daarbij worden het midden-spanningsnet en het hoogspanningsnet niet meegenomen. Uitdaging voor netverzwaring, met name op middenspanningsnet en hoogspanningsnet, is dat niet alleen de gebouwde omgeving afnemer is van elektriciteit. De mobiliteitssector, bijvoorbeeld, gaat steeds meer elektrificeren. In een aantal modellen worden hier aannames voor gedaan om ook het middenspanningsnet en het hoogspanningsnet mee te rekenen.

In hoofdstuk 4.2.2 is ingegaan op hoe OPEX wordt gemodelleerd. Vaak worden onderhoudskosten relatief geschat op basis van de investeringskosten. Dat betekent dat verschillen in investeringskosten ook invloed hebben op verschillen in onderhouds-

Conclusies en aanbevelingen techniekpakketten gebouwde omgeving

Conclusie 2a: Voor het HT-warmte scenario zijn er voor het modelleren een aantal keuzes voor de infrastructuur die gemaakt moeten worden, zoals een indicatief punt voor een Warmte Overdracht Station (WOS), waar vandaan leidingenlengtes bepaald worden. Ook voor aanwezigheid van bestaande ketelhuizen om als warmtestation te dienen en de lengte aan leidingen die zowel in pandig als buiten pandig nodig zijn zouden kengetallen moeten zijn. Daarom wordt in de modellen gebruik gemaakt van kostenkengetallen per aansluiting die door energiebedrijven zijn aangeleverd

Conclusie 2b: Voor het All-electric scenario blijkt een

grote bandbreedte te bestaan in kosten voor de warmtepomp (€7500-18.500 per woning). Dit forse verschil ontstaat doordat er verschillende warmtepompen kunnen worden ingezet. Daarnaast zijn er verschillen in de manier waarop netverzwaring wordt berekend.

Conclusie 2c: Verschillen in netverzwaring ontstaan doordat de waardeketen voor elektriciteit verschillend wordt gemodelleerd. In het ene model wordt alleen uitgegaan van het Laagspanningsnet, in het andere model wordt ook uitgegaan van het Middenspanningsnet en Hoogspanningsnet.
(zie vervolg op volgende pagina)

Conclusies en aanbevelingen techniekpakketten gebouwde omgeving (vervolg)

Conclusie 2d: Onderhoudskosten, als onderdeel van OPEX, worden geschat aan de hand van de bijbehorende investeringskosten. Derhalve veroorzaken verschillen in investeringskosten tussen de modellen ook verschillen in onderhoudskosten.

Aanbeveling 2a: Het is aanbevolen om te checken of standaard uitgangspunten, zoals 15 meter pijpleiding van WOS naar aansluiting op gebouw, of de verhouding gebouwen met en zonder ketelhuis, kloppen met de werkelijkheid van een buurt. Daarvoor kan het zijn dat gebouw eigenaren of gemeente gegevens moeten aanleveren.

Aanbeveling 2b: Er ontstaan grote verschillen in uitkomsten door een verschil in definitie van waardeketens. Een voorbeeld is een verschil in implementatie van netverzwaring. Dergelijke verschillen kunnen gedeeltelijk worden weggenomen door een gedeelde definitie van waardeketens (welke componenten van een warmtenet en/of elektriciteitsnet moet iedereen meerekenen?) of anderszins worden opgelost door scenario's (netverzwaring beperkt – verregaand scenario's).

kosten (conclusie 2d).

In hoofdstuk 5 is ingegaan op verschillen in de bewerking van gegevens tussen de modellen. De modellen in deze studie kunnen optimaliserend ofwel beredenerend worden ingezet (conclusie 3a). In een optimaliserende aanpak rekent het model vanuit vooraf ingegeven rekenregels een uitkomst uit. Zo kan het model bijvoorbeeld sturen op laagste maatschappelijke kosten of op maximale besparing van CO₂. In een beredenerende aanpak is er maximale vrijheid om gegevens in het model aan te passen. Het model rekent dan uitkomsten uit en toont bijvoorbeeld maatschappelijke kosten zonder dat er sturing is ingebouwd om de oplossing te vinden voor laagste maatschappelijke kosten. Voor beide aanpakken is het belangrijk om vooraf de onderzoeksvraag en uitgangspunten te definiëren voordat er gerekend wordt.

Een tweede categorisering is binnen de optimaliserende modellen. Daarin kunnen modellen limitatie op voorhand of achteraf invoeren (conclusie 3b). Zo kan een model bijvoorbeeld de optimale energiemix uitrekenen bij een beperkt aanbod aan warmtebronnen waarbij de bronnen 'opgebruikt' worden. Of een model kan bronnen onbeperkt instellen, waarbij pas achteraf rekening gehouden met schaarste. Daarvoor wordt een lijst gemaakt van buurten waar warmtenetten het meest kosteneffectief zijn gebleken om vervolgens de inzet van de schaarse warmtebronnen daar prioriteit aan te geven. Beide aanpakken zouden in theorie hetzelfde eindbeeld moeten opleveren. In afstemming met de modelbouwer kan er gekozen worden of een scenario met beperkte energiebronnen wenselijk is. Er zijn verder in deze studie nog een aantal andere

scenario's gezien. Zo was er het scenario dat varieert in de volgorde van isoleren en inzet van energie. Hierdoor ontstaan diverse beslisbomen of verduurzamingsroutes die andere uitkomsten berekenen.

Een derde scenario brengt variaties aan in de groepering van gebouwen. Er kunnen andere clusters gemaakt worden in vorm of in schaal-grootte. Dergelijke scenario's leveren inherent verschillende eindbeelden op. Het uniformeren van kengetallen en formules lost die verschillen niet op. Voor opdrachtgevers is het nuttig als zij weten wat voor soorten onderzoeken met een model uitgevoerd kunnen worden. Daarvoor moeten scenario's een naam krijgen (zoals Trias Energetica of Warmte, tenzij).

In hoofdstuk 6.1 is gebleken dat de modellen fundamenteel verschillen in de manier waarop kosten worden verrekend. Kosten kunnen maatschappelijk verdisconteerd worden of per waardeketen of toepassing. De uitkomsten blijken hierdoor in absolute zin moeilijk met elkaar te vergelijken, maar de conclusies (welke verwarmingstechniek heeft de voorkeur) blijven wel vergelijkbaar (conclusie 4a). Aanbevolen voor alle modellen is om zowel maatschappelijke kosten als kosten per waardeketen uit te rekenen zodat onderscheid gemaakt kan worden tussen kosten voor de maatschappij (totale kosten benadering) of kosten per stakeholder (business case benadering) (aanbeveling 4a). Er kunnen afspraken gemaakt worden over te hanteren verdisconteringsvoet, op zijn minst voor de maatschappelijke verdisconteringsvoet, om uitkomsten in absolute zin aan elkaar vergelijkbaar te maken (aanbeveling 4b). Een bandbreedte aan verdisconteringsvoeten kan

Conclusies en aanbevelingen scenario's en modelfilosofie

Conclusie 3a: Modellen kunnen uitkomsten beredeneren of optimaliseren. Beredenerende modellen zijn het meest ingewikkeld in gebruik, maar geven maximale vrijheid aan de gebruiker om scenario's te maken. Optimaliserende modellen geven een beperkter aanbod aan scenario's en rekenen een uitkomst voor.

Conclusie 3b: Limitatie kan ingebouwd worden in het model of achteraf – met filters – worden uitgevoerd.

Conclusie 3c: We hebben een aantal verschillende scenario's gezien binnen optimaliserende modellen:

- Bronnen beperkt of onbeperkt instellen.
- Variëren in volgorde van isoleren en inzet van energie.
- Variëren in vorm en schaalgrootte van clustering van gebouwen (ruimtelijke optimalisatie).

Deze verschillen zijn niet op te lossen met het uniformeren van kengetallen en formules.

Aanbeveling 3a: Wees transparant over welke scenario's met het rekenmodel uitgerekend kunnen worden en geef ze een naam.

Aanbeveling 3b: Probeer een set scenario's te definiëren die voor gemeentes altijd nuttig zijn om voor te rekenen, zodat deze in het offerte traject al kunnen worden besproken. Modellen hebben een standaard reikwijdte waarvoor het gemaakt is; in gesprek moet je nagaan hoeveel daarvan afgeweken kan en moet worden voor de specifieke vraag en hoe deze inspanning verrekend wordt.

ook opgelost worden door gevoeligheidsanalyses uit te voeren (aanbeveling 4c).

Ten slotte is in hoofdstuk 6.2 gekeken naar de leercurve voor technieken. Er is gebleken dat de leercurve niet in alle modellen wordt toegepast (Conclusie 5a) en dat academici voor PV-panelen nog niet een eenduidig beeld hebben over hoe

groot de invloed van de leercurve is op kostprijs (Conclusie 5b). Dat komt enerzijds door verschil in definitie van de leercurve (voor welk deel van de kostprijs verantwoordelijk) en anderzijds door een verschil in zichtperiode (periodieke verschillen). Er blijkt ook voor de verwarmingstechnieken nog veel discussie te bestaan over of de kostprijs van componenten zoals een warmtepomp gaat afnemen. Aanbevolen is om te komen tot een gezamenlijk gedragen definitie van de leercurve en kosten uit te rekenen zonder leercurve als benchmark. In scenario's kan dan gekeken worden naar wat verschil in zichtjaren en leereffecten doet met de uitkomst van de benchmark.

Conclusies en aanbevelingen verdisconteringsvoet

Conclusie 4a: Kosten kunnen maatschappelijk verdisconteerd worden of per waardeketen of toepassing. Door verschillende gehanteerde verdisconteringsvoeten zijn uitkomsten in absolute zin moeilijk met elkaar te vergelijken, maar de conclusies (welke verwarmingstechniek heeft de voorkeur) blijven wel vergelijkbaar.

Aanbeveling 4a: Aanbevolen voor alle modellen is om zowel maatschappelijke kosten als kosten per waardeketen uit te rekenen zodat onderscheid gemaakt kan worden tussen kosten voor de maatschappij (totale kosten benadering) of kosten per stakeholder (business case benadering).

Aanbeveling 4b: Er kunnen afspraken gemaakt worden over de te hanteren verdisconteringsvoet, om uitkomsten in absolute zin aan elkaar vergelijkbaar te maken (als voorbeeld het kabinet heeft in 2015 een discontovoet van 4.5% afgesproken voor mkba energie infrastructuur).

Aanbeveling 4c: Wanneer er geen eenduidig beeld bestaat over de hoogte van een verdisconteringsvoet, dan kan dit probleem worden opgelost door een gevoeligheidsanalyse uit te voeren.

Conclusies en aanbevelingen leercurve

Conclusie 5a: Niet in alle modellen wordt een leercurve toegepast.

Conclusie 5b: Er is geen eenduidig beeld over hoe groot de invloed is van de leercurve op de kostprijs van verschillende technieken.

Aanbeveling 5a: Er moet een gezamenlijk gedragen definitie komen van de leercurve om het debat over kostprijsontwikkelingen juist te voeren en om de implementatie ervan in modellen eenduidig te doen.

Aanbeveling 5b: Reken altijd een benchmark uit waar de leercurve niet wordt gebruikt en ga in scenario's kijken naar de invloed van de leercurve en het zichtjaar.

Uit deze studie blijkt eigenlijk vooral dat verschillen in uitkomsten tussen de modellen kunnen ontstaan doordat er verschillende onderzoeksvragen worden gesteld en verschillende uitgangspunten worden gehanteerd. Modelbouwers kunnen een belangrijke rol spelen om gemeentes te helpen in het stellen van een juiste onderzoeksvraag of het interpreteren van onderzoeksresultaten. Dit doen zij vaak al door aan het eind van een studie een rapport te overhandigen met visualisaties van de uitkomsten. Ook is er voor hen een rol weggelegd in het standaardiseren en verbeteren van gegevens en berekeningen. Wij doen een aantal aanbevelingen:

- Duid in rapportage gegevens die standaard zijn en gegevens die afwijken van die standaard, bijvoorbeeld vanwege lokale omstandigheden;
- Maak inzichtelijk wat voor soorten onderzoek met het model gedaan kan worden en welke onderzoeken (nog) niet. De keuzehulp van [Netbeheer Nederland](#) zet daar een belangrijke eerste stap in;
- Een gedetailleerde beschrijving van hoe de modellen werken (hoe worden isolatiepakketten gedefinieerd, welke technieken worden gehanteerd, waar komen kostenkengetallen vandaan) helpt in de uitvraag om scherpere vragen te stellen;
- Voornaamste aanbeveling aan de modellen is meer uniformiteit van de gegevens. De adviesbureaus die in deze studie aan bod zijn gekomen zijn op eigen beweging al aan de slag gegaan om kostenkengetallen zoveel mogelijk te standaardiseren.

7.2 Conclusies en aanbevelingen voor gemeenten

Wanneer verschillende modellen worden ingezet om verduurzamingsroutes uit te rekenen voor eenzelfde gebouwvoorraad, kunnen verschillende uitkomsten ontstaan. In deze studie is in gegaan op

invoergegevens, bewerkingstappen en uitkomsten om te verklaren waardoor dit kan gebeuren.

Van een aantal invoergegevens zal meer uniformiteit nodig zijn. Een warmtepomp bijvoorbeeld kost nu nog in de modellen tussen de €7500-18500 per woning, wat nogal wat uitmaakt voor de betaalbaarheid voor de burger. De adviesbureaus die in deze studie aan bod zijn gekomen zijn op eigen beweging al aan de slag gegaan om kostenkengetallen zoveel mogelijk te standaardiseren. Dit gebeurt bijvoorbeeld in de Werkgroep Energietransitie Rekenmodellen (WG-ETRM) en voor de verwarmingstechnieken in gesprekken met netbeheerders en energieleveranciers.

Er zijn steeds meer samenwerkingen waarin bijvoorbeeld twee modellen parallel¹⁹ of achter elkaar²⁰ worden ingezet. Dit biedt de mogelijkheid om verschillende perspectieven (van gegevens en uitgangspunten) te onderzoeken.

Desalniettemin is het voor een gemeente belangrijk zich te realiseren dat de uitkomst van de rekenmodellen een eerste technisch-economische verkenning is. Daarin wordt geprobeerd vanuit een set uitgangspunten een richtinggevend advies uit te brengen voor één of meerdere scenario's die in aanvullende studies in detail nog uitgewerkt moeten worden. De uitkomst is een grove maatschappelijke kostenbatenanalyse en is géén business case. Een aantal conclusies kunnen op dit punt nog niet worden genomen en een aantal conclusies wel (zie kadertekst pagina 35).

In deze notitie vragen wij adviesbureaus om na te denken over welk soort studies of scenario's gemaakt zouden moeten worden om daarna de juiste vervolgvragen te kunnen stellen over betaalbaarheid, financiering en technische inpasbaarheid. Ook de stakeholders in een gemeente kunnen op voorhand nadenken over welke studies voor hen interessant zijn. Dat moet verder gaan dan alleen het uitrekenen van de goedkoop-

¹⁹ CEGOIA en ETM worden in Groningen parallel ingezet om een openingsbod te maken voor de top 25 buurten waar uit beide modellen de meest robuuste uitkomst is uitgerekend.

²⁰ Over Morgen is in 2017 gestart met de ontwikkeling van een vlekkenplan voor de regio Drechtsteden en PBL heeft in 2018 een verdiepingsslag uitgevoerd.

De krachten en grenzen van energietransitie rekenmodellen

Uitkomsten die níét uit energietransitie rekenmodellen komen

- De betaalbaarheid van een verduurzamingsscenario. Daarvoor mist nog informatie over de budgetten van gebouw eigenaren, de business case van de energiebedrijven en een beeld van wat betaalbaar is voor huurders.
- De technische inpasbaarheid van een verduurzamingsscenario. Er heeft nog géén engineering plaatsgevonden, dus er is nog niet bekend waar warmteleidingen en onderstations kunnen komen te liggen, of verregaand isoleren wel mogelijk is, of er ruimte is voor een warmtepomp, etc.

Wat levert het dan wel op?

- Modellen berekenen wel de kosten en baten voor de verschillende partijen in de keten.
- De voorbereidingen voor een uitvraag aan adviesbureaus en het bespreken van de uitkomsten van het onderzoek zijn kansen om verschillende belanghebbenden in het proces te betrekken.
- Met het onderzoek wordt een dataset opgebouwd en worden een aantal oplossingsrichtingen verkend. De uitkomst vormt de basis voor een gesprek over welke oplossingsrichtingen de moeite waard zijn om in een haalbaarheidsstudie nader uit te werken.
- Van de gegevens en uitkomsten worden visualisaties gemaakt, bijvoorbeeld in de vorm van kansenkaarten. Dat zijn essentiële bouwstenen voor de warmtetransitievisie.

ste techniek om te verwarmen. Hieronder een voorbeeld van een aantal scenario's die in gemeentes kunnen spelen en die gevraagd kunnen worden aan een adviesbureau:

- Scenario "Bronnen beperkt of onbeperkt instellen". Een gemeente heeft ruimte voor een aantal windmolens, heeft een bestaand zonnenveld en heeft nog de mogelijkheid om daken van gebouwen te bekleden met PV-panelen. Daarnaast is grijze elektriciteit beschikbaar uit het elektriciteitsnet. De gemeente vraagt het adviesbureau om voor diverse 'merit orders' (hiërarchische prioriteit van inzet van bronnen) te berekenen welke vormen van elektriciteit in welke buurten economisch (in geld en in CO₂ emissie uitgedrukt) de voorkeur heeft.
- Scenario "Variëren in volgorde van isoleren en inzet van energie". Een gemeente heeft de mogelijkheid om hoge temperatuur warmte (90 graden Celsius) op korte termijn in te zetten, maar heeft de ambitie om op de midden-lange termijn eventueel gebruik te gaan maken van aardwarmte op 70 graden Celsius of van aquathermie van <70 graden Celsius. Voor temperaturen lager dan 90 graden Celsius zullen gebouwen geïsoleerd moeten worden. De gemeente vraagt het adviesbureau om te onderzoeken welke temperatuur warmte in welke buurten de voorkeur heeft bij verschillende mate (alle gebouwen of een deel van de gebouwen) van isoleren. Ook wil de gemeente onderzoeken of er eerst aangesloten kan worden op 90 graden

om later te isoleren en lagere temperatuur warmtebronnen toe te voegen.

- Scenario "Variëren in vorm en schaalgrootte van clustering van gebouwen (ruimtelijke optimalisatie)". Een gemeente wil een analyse laten uitvoeren voor de economisch meest voordelige verduurzamingsroutes voor gebouwen in een wijk. De wijk bestaat uit een aantal grote appartementencomplexen geconcentreerd aan de rand van de wijk en een groot cluster aan rijtjeswoningen. Er wordt gevraagd om: de wijk als geheel over te laten stappen op één manier van verwarmen (100% warmtenet of 100% all-electric) of om het cluster appartementencomplexen op warmtenet en het cluster rijtjeswoningen op all-electric over te laten schakelen (gemengd scenario).

Dergelijke onderzoeksvragen kunnen met stakeholders bedacht worden voordat een adviesbureau wordt ingehuurd. Echter, zoals dat in elk advies-traject gaat, worden de onderzoeksvragen steeds scherper wanneer meer kennis wordt opgedaan van afhankelijkheden in het energiesysteem. Het kan dus voorkomen dat een eerste analyse van een adviesbureau nieuwe vragen geeft waarvoor eigenlijk een nieuwe berekeningen nodig zijn. In een ideale situatie kunnen de adviesbureaus een aantal scenario's voorschrijven en heeft een gemeente vooraf voldoende handreiking om de juiste vragen te stellen. Daarin kan de Leidraad voor gemeenten een belangrijke rol spelen.

We adviseren gemeentes om in ieder geval ter voorbereiding op een uitvraag aan adviesbureaus de belangrijkste stakeholders in beeld te krijgen en met die stakeholders ontwerpcriteria vast te stellen. Daarin kan een aanpak als volgt zijn:

Voorgestelde aanpak ten behoeve van uitvraag modelstudie:

- 1 Quicksan van relevante stakeholders.
- 2 Organiseer een projectteam met stuurgroep. Stakeholders kunnen lid zijn van het team of kunnen adviserend optreden.
- 3 Bespreek een aantal mogelijke scenario's en criteria voor.
- 4 Pas een model toe wat aansluit bij dit proces en lokale aspecten, zoals:
 - Aanwezigheid van lokale energiebronnen en initiatieven;
 - Ruimtelijke (on)mogelijkheden voor infrastructuur/bronnen.
- 5 Overweeg een gevoeligheidsanalyse om de kantelpunten van het model te bepalen.

7.3 Conclusies en aanbevelingen voor (de startanalyse van) de Leidraad

In het Klimaatakkoord voor de Gebouwde Omgeving is een zogeheten Leidraad opgenomen. Uit het Ontwerp van het Klimaatakkoord (21 december 2018):

Om tot een zorgvuldig afwegingsproces te komen voor zowel de transitievisie warmte als voor het uitvoeringsplan op wijkniveau, worden gemeenten en stakeholders ondersteund vanuit een leidraad. Hierin wordt objectieve informatie beschikbaar gesteld op basis van transparante, gevalideerde feitelijke data. Deze data worden digitaal en op uniforme en gestandaardiseerde wijze ontsloten en gedeeld. Hiermee krijgen alle stakeholders een eenduidige, openbare referentie die ondersteuning biedt voor de maatschappelijke en politieke discussie waarin de gemeenteraad een afgewogen besluit neemt. De leidraad bevat zelf geen afweging.

De leidraad is een instrument bestaande uit twee componenten: De eerste component van de leidraad, de technisch-economische analyse op basis van een open source model, geeft tot op wijkniveau de gevolgen van de verschillende (warmte)opties weer voor zowel de maatschappelijke kosten als de kosten voor verschillende eindgebruikers in de wijk. De tweede component bestaat uit een handreiking met richtlijnen (m.b.t. de data, aannames en rekenregels) waarmee gemeenten het open source model kunnen verrijken met eigen, lokale data waaronder met betrekking tot planning(en) ten behoeve van de besluitvorming (transitievisie warmte en uitvoeringsplannen op wijkniveau).

De eerste component van de Leidraad biedt vanuit één gestandaardiseerde, gevalideerde set van gegevens en uitgangspunten een berekening aan per buurt van de maatschappelijke kosten en baten en de lasten per gebruiker voor verschillende verwarmingstechnieken. Uitkomsten zijn dan op verschillende schaalgroottes (gebouw, buurt, wijk, gemeente) optelbaar en vergelijkbaar, omdat dezelfde uitgangspunten en gegevens zijn gehanteerd.

In deze studie hebben we gezien dat het opstellen van één set gestandaardiseerde gegevens uitdagend is; enerzijds omdat er aannames gedaan moeten worden om een toekomstbeeld te simuleren,

anderzijds omdat lokale aspecten soms vragen om af te wijken van een standaardgetal. De doorrekening van de startanalyse van de Leidraad zal hier en daar uitkomsten berekenen die tegenstrijdig zullen zijn aan andere studies. Gemeentes zullen te zijner tijd uitleg moeten kunnen krijgen waar de verschillen door ontstaan en hoe zij verder moeten. Dit rapport poogt daar een eerste stap in te zetten.

Een eerste aanbeveling is om helder te communiceren dat de eerste component van de Leidraad van eind september een eerste doorrekening is en dat in vervolgstappen verfijning zal moeten plaatsvinden met lokale gegevens en uitgangspunten en dat gemeentes alsnog de haalbaarheid van de uitkomsten nader zullen moeten gaan onderzoeken. Daarmee voorkom je dat gemeentes verwachten dat ze in september een finaal antwoord krijgen op de vraag wat zij per buurt zouden moeten doen. Ten tweede, en daar zouden het Expertise Centrum Warmte, energieloketten of overheden een rol in kunnen spelen, is een handreiking nodig om gemeentes te ondersteunen in het verzamelen van gegevens en het stellen van de juiste onderzoeksvragen na september. Dit rapport geeft in hoofdstuk 7.2 een grof voorstel van hoe een aanpak eruit zou kunnen zien en er zijn een aantal voorbeeld scenario's opgenomen die gemeentes kunnen onderzoeken.

Ten slotte zijn er een aantal gemeentes die reeds studies hebben laten uitvoeren of in het proces

van uitvraag zijn aan adviesbureaus. Voor deze gemeentes is nu niet duidelijk of die studies of uitvragen complementair zijn aan de Leidraad. In deze transitieperiode is het belangrijk dat er snel helderheid komt voor adviesbureaus en gemeenten over wat precies de berekening van september inhoudt en wat níet en wat de consequenties zijn van het gebruik van andere modellen in het verleden, nu of in de toekomst. De aanbevelingen zijn samengevat in onderstaande kader:

Aanbevelingen in de positionering van de Leidraad van het Ontwerp Klimaatakkoord

- 1 Communiceer aan gemeentes dat de startanalyse van eind september een eerste doorrekening is en dat in vervolgstappen verfijning zal moeten plaatsvinden met lokale gegevens en uitgangspunten alsmede een studie naar de haalbaarheid van de uitkomsten.
- 2 Maak een handreiking die gemeentes ondersteunt in het verzamelen van relevante lokale gegevens. Ook is ondersteuning nodig in het stellen van de juiste onderzoeksvragen. In dit rapport zijn een aantal voorbeelden opgenomen.
- 3 In deze transitieperiode - waarin de Leidraad nog in ontwikkeling is - is het belangrijk dat er helderheid komt voor adviesbureaus en gemeenten over wat precies het model in gaat houden en wat níet en wat de consequenties zijn van het gebruik van andere modellen in het verleden, nu of in de toekomst.

Appendix

Tabel 6. RVO Rijwoningen Tussenwoning p.p. 2010 (kosten in €).

Bouwjaar	Opp. GO [m²]	Vloer [m²K/W]	Dak [m²K/W]	Voorgevel [m²K/W]	Glas	Kier	Label	Kosten
t/m 1945	102	0,15	0,22	0,19	25/75 enkel/dubbel	-	G	0
1946-1964	87	0,32	0,39	0,36	44/56 enkel/dubbel	-	F	0
1965-1974	106	0,17	0,86	0,43	20/80 enkel/dubbel	-	E	0
1975-1991	106	0,52	1,30	1,30	19/81 enkel/dubbel	-	D	0
1992-2005	114	2,53	2,53	2,53	47/53 dubbel/HR++	-	C	0
2005-2010	-	-	-	-	-	-	-	-
2011-2020	-	-	-	-	-	-	-	-
		Vloer +	Dak+	Voorgevel+	Glas+	Kier+	Label +	Kosten
t/m 1945	102	2,53	2,53	2,53	HR++	-	B	11.480
1946-1964	87	2,53	2,53	2,53	HR++	-	B	7.880
1965-1974	106	2,53	2,53	2,53	HR++	-	B	8.980
1975-1991	106	2,53	2,53	2,53	HR++	-	B	8.240
1992-2005	114	2,53	2,53	2,53	HR++	-	B	1.000
2005-2010	-	-	-	-	-	-	-	-
2011-2020	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel 7. Caldomus Rijwoningen Tussenwoning p.p. 2016 (kosten in €).

Bouwjaar	Opp. GO [m²]	Vloer [m²K/W]	Dak [m²K/W]	Voorgevel [m²K/W]	Glas	Kier	Label	Kosten
t/m 1945	102	-	-	-	Enkel	Slecht	G	0
1946-1964	87	-	-	-	Enkel	Slecht	G	0
1965-1974	106	-	-	-	Enkel	Matig	F	0
1975-1991	106	1,30	1,30	1,30	50/50 enkel dubbel	Matig	D	0
1992-2005	114	2,50	2,50	2,50	50/50 dubbel/HR++	Redelijk	B	0
2005-2010	124	3,00	3,00	3,00	HR++	Goed	A	0
2011-2020	124	3,00	3,00	3,00	HR++	Goed	A	0
		Vloer +	Dak+	Voorgevel+	Glas+	Kier+	Label +	Kosten
t/m 1945	102	2,50	2,50	2,50	HR++	Goed	A	12.928
1946-1964	87	2,50	2,50	2,50	HR++	Goed	A	8.874
1965-1974	106	2,50	2,50	2,50	HR++	Goed	A	10.113
1975-1991	106	2,50	2,50	2,50	HR++	Goed	A	9.280
1992-2005	114	2,50	2,50	2,50	HR++	Goed	A	1.126
2005-2010	124	2,50	2,50	2,50	HR++	Goed	A	0
2011-2020	124	2,50	2,50	2,50	HR++	Goed	A	0

Tabel 8. Verdisconteringsvoeten in de verschillende energietransitie rekenmodellen.

Model	Beschrijving verdisconteringsvoet
Caldomus	Kapitaalrente 5% op alle onderdelen, afschrijvingsduur afhankelijk van bouwdeel
Vesta	Standaard instellingen zijn als volgt, maar kan van afgeweken worden: Indien gerekend met maatschappelijke kosten: 4%. Indien gerekend met kosten per stakeholder: ■ Opwekker: 6%. ■ Transporteur: 6%. ■ Distributeur: 6%. ■ Leverancier: 6%. ■ Eigenaar of gebruiker: - Huishouden: 5.5%. - Utiliteit: 8%. - Glastuinbouw: 8%
ETM (getallen uit scenario SER 2023)	Gemiddelde gewogen kostenvoet naar “groep” (Weighted Average Cost of Capital, WACC) wordt gebruikt. Alles heeft een eigen WACC (en is instelbaar), ongeveer geldt: ■ Componenten industrie en glastuinbouw: 10%. ■ Componenten individueel / huishoudens: 4%. ■ Componenten collectief / regionaal (bijvoorbeeld collectieve warmtepomp): 6%.
DWA	Rentepercentages allemaal op 5%: ■ Isolatiemaatregelen. ■ Ventilatie. ■ Opwekinstallaties ■ Inpandig distributie. ■ Transportnet. ■ Opwekker.
CEGOIA	Energie-infrastructuur e +g: 3% Warmtenet 6%. Woningen particulier: 5.5%. Woningen corporatie: 3.75%. Utiliteit: 8%. Glastuinbouw: 8%.
Over Morgen	1,5% (netto hypotheekrente)

Tabel 9. Beschrijving van een aantal componenten van een all-electric waardeketen in Vesta, Cegoia en Overmorgen. De lijst is niet compleet maar is ter illustratie van een aantal verschillen tussen modellen.

Categorie	Component	Vesta	Cegoia	Overmorgen
Gebouw	A+	B	Verder dan label B	Eigen keuze ²¹
Installatie	Bron van elektriciteit voor de warmtepomp	Elektriciteitsnet of zon-pv	Elektriciteitsnet en PV panelen	Elektriciteitsnet
	Productiewijze warmtepomp	Bodem of lucht warmtepomp	Lucht of bodem	Warmtepomp met als bron lucht, bodem of zonthermie
	Prijs warmtepomp	€10.591-15.149	€8000 (lucht) of €15.000 (bodem)	€11.600-16.500 voor rijwoning
	Type tapwatersysteem	Warmtepomp met buffervat of zonneboiler	Combiwarmtepomp	Combiwarmtepomp met boiler vat
Distributie / netverzwaring	Oorzaken van een verhoogde elektriciteitsvraag	Verwarmen	Verwarmen	Verwarmen en elektrisch koken
	Implementatie van netverzwaring in het model	Indien nodig, formule voor verzwaring afh. aantal aansluitingen en een warmtepomp-factor	Vaste prijs per kW, kengetal verzwaring per techniek afhankelijk van isolatiegraad	Opgenomen in bandbreedte van kosten all-electric
	Hoogspanning	Niet uitgesplitst	Niet meegenomen	Niet uitgesplitst
	Middenspanning	Niet uitgesplitst	Niet meegenomen	Niet uitgesplitst
	Laagspanning	Niet uitgesplitst	Meegenomen	Meegenomen
Opwek	Type opwek (individueel/collectief)	Beide mogelijk	Combinatie e-net + pv	Combinatie e-net + pv
	Prijs zonnepanelen	€350/m ² , leercurve mogelijk	€285/m ²	-

21 Resterende elektriciteitsvraag moet 20-40 kWh /m² voor appartement en 25-45 kWh/m² voor rijwoning zijn. Daarbij zijn streefwaarden van gevel bv. Rc>3,5 m²K/W, dak Rc>6,0 m²K/W en kozijnen U<1,4 W/m²K.

Colofon

Dit is een uitgave van provincie Zuid-Holland.
Mei 2019.

Auteur: Max Brouwer, Talent voor Transitie,
in opdracht voor provincie Zuid-Holland.
www.zuid-holland.nl



Foto omslag: Studio Kange, I Stock.

Vormgeving en productie: Vakteam Grafimedia,
provincie Zuid-Holland. 190401596

