



Nederlandse samenvatting van een master scriptie
Integrating the gain, hedonic and normative aspects
in a cost-benefit analysis and decision support tool
for transition to natural gas-free neighbourhoods

Eindhoven University of Technology
Architecture, Building and Planning/Urban Systems and Real Estate (USRE)
& Construction Management Engineering (CME)
Combined Graduation Project 7CZ60M0 – 60 ECTS
This thesis is open to the public and has been carried out in accordance with the rules of the TU/e Code of Scientific Integrity

Diane Nelissen - 0949072

Thesis committee: Prof.dr. Theo Arentze, Dr. Ioulia V. Ossokina,
Prof.dr.ir. Bauke de Vries, and Dr.ir.-arch. Pieter Pauwels

Colophon

Title	Integrating the financial, technical and social aspects in a Cost-Benefit Analysis and decision support for transition to natural gas-free neighbourhoods
Date	18/10/2022
Author	D.C.S. Nelissen
ID Number	0949072
TUE email	d.c.s.nelissen@student.tue.nl
Institute	Eindhoven University of Technology
Faculty	Department of the Built Environment
Master program	Construction Management and Engineering (CME) & Urban Systems and Real Estate (USRE)
Adress	Den Dolech 2 5612 AZ Eindhoven
USRE: Chairman	Prof.dr. Theo Arentze
Graduation supervisor	Dr. Ioulia V. Ossokina
CME : Chairman	Prof.dr.ir. Bauke de Vries
Graduation supervisor	Dr.ir.-arch. Pieter Pauwels

In collaboration with the municipality of Eindhoven (Supervisor Ir. Eva van Enk)

This project has been carried out with support from the MMIP 3 & 4 grant of the Dutch Ministry of Economic Affairs & Climate and the Dutch Ministry of the Interior & Kingdom Relations.

This thesis is open to the public and has been carried out in accordance with the rules of the TU/e Code of Scientific Integrity

Motivatie en onderzoeksdoelstelling

Bestaande gebouwen zijn verantwoordelijk voor 30% van de CO₂-uitstoot wereldwijd en 16% in Nederland (CBS, 2020). Dit moet de komende jaren drastisch omlaag, om een geplande omslag te maken naar een klimaatneutrale energiehuishouding in 2050. Een van de grote uitdagingen hierbij is het verbeteren van de verwarmingssystemen van koopwoningen. Immers, 84% van de Nederlandse woningvoorraad wordt nog steeds verwarmd met aardgas en 57,4% van de Nederlandse woningen zijn koopwoningen (CBS, 2021¹; CLO, 2020²). De beslissing om te upgraden moet door de huiseigenaren worden genomen. De aanzienlijke kosten van de alternatieve verwarmingssystemen samen met het gebrek aan goed inzicht in de voordelen verminderen vaak de bereidheid om te upgraden.

Deze studie wil een holistisch inzicht geven in de financiële, technische en sociale effecten van upgrades van verwarmingssystemen voor individuele huiseigenaren en clusters van huiseigenaren. De studie is uitgevoerd voor twee belangrijke alternatieven voor aardgasverwarming: *all-electric* en warmtenet. Meer specifiek wordt in dit onderzoek een *decision support tool* ontwikkeld om huiseigenaren in woonclusters te faciliteren in hun overstap van aardgas naar een duurzamere verwarmingstechniek. De tool optimaliseert de uitvoering en houdt rekening met de financiële, hedonische (comfortgerelateerde) en normatieve (milieu) aspecten van de besluitvorming.

1) Methodologie

Het onderzoeksdoel wordt in drie stappen bereikt.

2.1 Eerst wordt een beperkte kosten-batenanalyse (LCBA – *limited cost-benefit analysis*) uitgevoerd die de kosten en baten van de alternatieve verwarmingstechnieken voor een individuele huiseigenaar over de tijdshorizon 2020-2050 evalueert en vergelijkt. De LCBA volgt de algemeen geaccepteerde methodiek van de kosten-batenanalyse, maar dan alleen toegepast op de kosten en baten van de individuele woningeigenaar. We onderscheiden financiële, hedonische (comfortgerelateerde) en normatieve (milieu-gerelateerde) effecten. Het nulalternatief houdt in: verwarming met aardgas en een overschakeling op een hybride

warmtepomp in 2036. Twee beleidsalternatieven zijn: een warmtenet op midden temperatuur (70°C warmte en omschakeling in 2023) en *all-electric* met een lucht/water-warmtepomp (overschakeling in 2023), zie Figuur 1. De LCBA wordt uitgevoerd onder twee scenario's - hoge en lage groei van de energieprijzen. De scenario's zijn ontleend aan een studie van het Planbureau voor de Leefomgeving. In het lage scenario stijgt de variabele aardgasprijs met 40% en daalt de variabele elektriciteitsprijs met 34%. In het hoge scenario stijgen beide, de variabele aardgasprijs (met 103%) en de variabele elektriciteitsprijs (met 17%). De netto contante waarde wordt berekend aan de hand van een discontovoet van 2,25%. De LCBA is uitgevoerd voor een cluster bestaande uit 5 woningen, geïnspireerd op de woningen in wijk 't Ven in de stad Eindhoven. De belangrijkste woningeigenschappen die in het LCBA-model zijn opgenomen zijn woninggrootte, bouwjaar, woningtype, energielabel en de afstand tot het warmtenet.

	<i>Nulalternatief</i>	Warmtenet 1	All-electric 1
Verwarmen	NG	DH	AHP
Koken	NG	ID	ID
Hybride warmtepomp	X		
Lucht warmtepomp			X
Aansluiten aan warmtenet		X	
Isolatie	D->B	B	B
Mechanische ventilatie	X	X	
Mechanische ventilatie WTW			X
Zonnepanelen		X	X
Vervangen meterkast	X	X	X
Verbetering naar 3x 25 elektriciteit aansluiting	X	X	X
Verwijderen aardgas aansluiting		X	X
Elektrisch koken		X	X
LT radiatoren			X

Figuur 1: Technische eigenschappen van het nulalternatief en beleidsalternatieven (NG: aardgas, DH: stadsverwarming, ID: inductie, E: elektriciteit, AHP: luchtwarmtepomp, D: isolatielabel D, B: isolatielabel B).

2.2 Ten tweede wordt een multicriteria (*multiobjective*) optimalisatiemodel ontwikkeld dat niet alleen optimaliseert tussen vooraf gedefinieerde

¹ <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2021/07/92-procent-woningen-op-aardgas-begin-2019>

² <https://www.clo.nl/indicatoren/nl2164-woningvoorraad-naar-eigendom>

beleidsalternatieven en het nulalternatief zoals de LCBA doet, maar ook aanvullende beslissingsondersteunende opties biedt. Het kan advies geven over (i) het meest geschikte moment van overschakeling naar een andere techniek, (ii) of aanvullende woningverbeteringen (zonnepanelen, isolatie) moeten worden uitgevoerd. Verder kan de gebruiker individuele voorkeuren aangeven voor comfort-, milieu- en financiële effecten. Technieken van Mixed-Integer Linear Programming worden gebruikt om de optimalisatieoplossing te modelleren, gecodeerd in Python (pakketten PULP en PYOMO).

2.3 Ten derde worden zowel de LCBA als de optimalisatie verwerkt in een

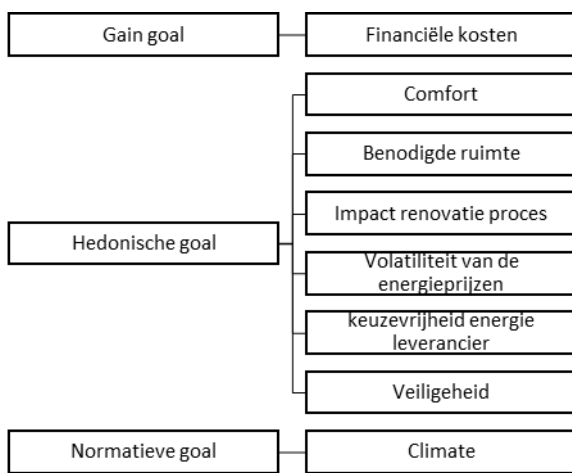


Figure 2: Overzicht van de effecten

beslissingsondersteunend dashboard. Dit kan worden gebruikt door zowel huiseigenaren als gemeenten en andere partijen die verantwoordelijk zijn voor het stimuleren van de energietransitie in woningen. Het dashboard is gemaakt in software R Shiny, terwijl de interactie met het Python-model tot stand is gebracht met Reticulate.

2) Bevindingen

3.1 Op basis van de resultaten van de LCBA kan het volgende worden geconcludeerd:

Baten/ Financiële effecten voor huiseigenaren

1. In het scenario met hoge groei van de energieprijzen, is het op basis van de Netto Contante Waarde (NCW) van de *financiële* effecten gunstig om over te stappen op een warmtenet of *all-electric*. Overschakelen levert een kostenbesparing (in NCW) op van 7% voor een warmtenet en 12% voor *all-electric*, vergeleken met het nulalternatief.
2. Bij lage groei levert *all-electric* een kleine kostenbesparing op van 2% ten opzichte van het nulalternatief. Een warmtenet brengt echter 7% hogere kosten met zich mee dan het nulalternatief.

3. De verdeling van de kosten en baten in de tijd verschilt voor *all-electric* en een warmtenet. Een warmtenet vergt een lagere initiële investering (er is onder meer geen aanpassing van de radiatoren of ventilatie met warmteterugwinning nodig) en levert een lagere jaarlijkse besparing op. *All-electric* bereikt hogere jaarlijkse besparingen ten koste van hogere initiële uitgaven.
4. De eigenschappen van de woningen hebben een beperkte invloed op de haalbaarheid van het warmtenet alternatief. In het hoge scenario variëren de kostenbesparingen voor verschillende bestudeerde huizen van 5% tot 8%. Voor *all-electric* maken de eigenschappen van de woningen meer verschil. Afhankelijk van het woningtype kan de kostenbesparing zo laag als 8% en zo hoog als 18% uitvallen.
5. Een grotere afstand tot het warmtenet maakt verwarmen met een warmtenet minder aantrekkelijk. In een hoog scenario is overschakeling op een warmtenet financieel rendabel voor huizen die op een afstand van maximaal 50-60 meter tot het netwerk liggen.
6. Een groter aantal woningen die samen overstapt op het warmtenet (15 in plaats van 5) heeft een beperkt positief effect op de kosten van het warmtenet alternatief. De kostenbesparing ten opzichte van het nulalternatief wordt dan 8%.

Hedonische/comfort- en normatieve/milieu-effecten voor huiseigenaren

1. Het totaal van de hedonische/comforteffecten is vergelijkbaar voor zowel een warmtenet als *all electric* en verschilt niet veel van het nulalternatief. De specifieke effecten verschillen echter wel.
 - a. Beide alternatieve technieken bieden een verbetering van de veiligheid in vergelijking met aardgas (kleiner risico op en minder ongevallen met de verwarmingstechniek).
 - b. *All-electric* levert extra comfort op dankzij de warmteterugwinning. Dit gaat ten koste van langere renovatiewerkzaamheden en een grotere benodigde ruimte.
 - c. Een warmtenet heeft een negatief effect in verband met het risico van monopolistisch gedrag van warmteleveranciers.
2. Beide beleidsalternatieven leiden tot een belangrijke daling van de CO₂-uitstoot in vergelijking met het nulalternatief. Een warmtenet bespaart 58% en *all-electric* 73%.

3.2 Multi-objective dynamische optimalisatie

De aannames van LCBA over de concrete invulling van alternatieve technieken (jaar van omschakeling,

omvang woningcluster, aanvullende maatregelen zoals zonnepanelen) hoeven niet optimaal te zijn. Met behulp van het optimalisatiemodel kunnen hierin verbeteringen worden aangebracht:

1. Veel verschillende implementaties van technieken kunnen snel en efficiënt met elkaar vergeleken worden, op zoek naar de beste oplossing.
2. Woningtypen en kenmerken, de grootte van het cluster, en de locatie ten opzichte van het warmtenet kunnen eenvoudig worden aangepast.
3. Gebruikersinput is mogelijk. In de huidige versie kan de gebruiker bijvoorbeeld technieken vergelijken op basis van haar individu-specifieke relatieve voorkeuren voor financiële, hedonische en normatieve effecten. Zo kan het voor mensen die zich vooral zorgen maken over kosten (financiële effecten), aantrekkelijk zijn om het warmtenet in het hoge scenario uit te stellen tot het moment dat renovatie in het nulalternatief (2036) nodig is. Dit resultaat gaat echter niet op als milieueffecten een belangrijke rol spelen.

3.3) Het dashboard

Het dashboard biedt de huiseigenaar de mogelijkheid om de optimalisatiemodellen te gebruiken. De gemeente Eindhoven gaf aan dat het dashboard kan bijdragen aan het informeren van de huiseigenaren over de verwarmingstechnieken.

4) Beperkingen van het onderzoek

Tijdens het onderzoek werd een aantal aannames gemaakt. Sommige hiervan staan hieronder.

- a. In de LCBA zijn investeringssubsidies meegenomen in de berekening van de investeringskosten zoals deze in 2022 in Nederland golden (isolatie, warmtepompen, zonnepanelen en de aansluiting van stadsverwarming). . Afschaffen of verlagen van subsidies zal de technieken financieel minder aantrekkelijk maken.
- b. In de LCBA is geen rekening gehouden met de beperkingen van het elektriciteitsnet. Voorts is voor de aansluitingskosten aan het warmtenet rekening gehouden met een bestaand netwerk op een afstand van 30 meter van de woning.
- c. De in het optimalisatiemodel gebruikte aanname over de relatieve voorkeuren tussen financiële, comfortgerelateerde en milieu effecten zijn gebaseerd op één onderzoek onder huurders van sociale woningen.
- d. Per extra woning opgenomen in het cluster wordt de aansluitprijs verlaagd met 5% (met een maximum van 50%).
- e. De warmteprijs wordt in 2024 losgekoppeld van de aardgasprijs.

5) Conclusies

In het algemeen zijn er meerdere factoren die de beslissing van huiseigenaren beïnvloeden om aardgasvrije renovaties uit te voeren. Wanneer een alternatieve verwarmingstechniek wordt toegepast, heeft dit meerdere directe effecten voor de huiseigenaar. Dit onderzoek heeft een *decision support* tool ontwikkeld die deze effecten inzichtelijk maakt voor twee alternatieve verwarmingstechnieken (warmtenet en *all-electric*), rekening houdende met de specifieke eigenschappen van de individuele woningen en de grootte van de woningcluster. De tool informeert huiseigenaren en ondersteunt de keuze tussen de technieken, gebaseerd op het belang die mensen hechten aan, respectievelijk, financiële, comfortgerelateerde en milieueffecten. De tool is toegankelijk gemaakt door middel van een dashboard.

Het onderzoek draagt bij aan meerdere onderzoeksgebieden. Op het gebied van de kosten-baten analyses voor duurzame verwarmingstechnieken wordt een bijdrage geleverd aan het verkrijgen van een beter inzicht in de effecten op de belangrijkste stakeholder, de huiseigenaar. Op het gebied van optimalisatiemodellen voor duurzame verwarmingstechnieken wordt een poging gedaan om voorkeuren en doelen van individuele huiseigenaren mee te laten wegen bij het vinden van de meest geschikte uitvoering. Via het dashboard kan snel per cluster inzicht worden verkregen in de effecten van de verschillende verwarmingsalternatieven. Dit maakt de tool beter bruikbaar voor bijvoorbeeld huiseigenaren en gemeente.

In termen van verder onderzoek kunnen de volgende aanbevelingen gedaan worden:

1. Nader onderzoek naar de voorkeuren van huiseigenaren voor aardgasvrije verwarmingstechnieken.
2. Uitbreiding van het onderzoek naar de effecten van de implementatie van verwarmingstechnieken op grootschalige woningclusters.
3. Verder onderzoek naar het comfortniveau van huiseigenaren en hun comfortvoorkeuren.
4. Verder kosten-baten onderzoek waarin de indirecte maatschappelijke effecten van de verwarmingstechnieken worden meegenomen.
5. Het uitbreiden van de optimalisatiemodellen en het gemaakte dashboard om de bruikbaarheid te vergroten. Door het dashboard voor de gebruikers te verbeteren kan de bruikbaarheid worden vergroot.