



HET POTENTIEEL VAN GROENE WATERSTOF VOOR DE GEBOUWDE OMGEVING

Auteur: Sophie Pahud de Mortanges,
MSc student Chemical Engineering, TU Delft

Opdrachtgever: Squarewise

Inhoudsopgave

1	INTRODUCTIE EN PROBLEEMSTELLING	4
2	METHODE	5
2.1	DE POTENTIËLE BINNENLANDSE GROENE WATERSTOFPRODUCTIE IN 2050	5
2.1.1	<i>Scenario huidig tempo</i>	7
2.1.2	<i>Scenario versnelling</i>	8
2.1.3	<i>Scenario maximaal</i>	9
2.2	DE TOTALE NEDERLANDSE VRAAG NAAR WATERSTOF IN 2050	10
2.2.1	<i>De industrie</i>	11
2.2.2	<i>Land & Tuinbouw</i>	12
2.2.3	<i>Transport</i>	12
2.2.4	<i>De gebouwde omgeving</i>	12
2.3	VERDELING VAN DE POTENTIËLE GROENE WATERSTOFPRODUCTIE BINNEN NEDERLAND	13
3	RESULTATEN	15
3.1	RESULTATEN VAN DE POTENTIËLE GROENE WATERSTOFPRODUCTIE IN 2050	15
3.1.1	<i>Hernieuwbare Elektriciteitsproductie</i>	15
3.1.2	<i>Finaal Elektriciteitsverbruik</i>	15
3.1.3	<i>Netverliezen & Netbalancing</i>	16
3.1.4	<i>Potentiële groene waterstofproductie</i>	17
3.2	RESULTATEN VAN DE WATERSTOFVRAAG	17
3.2.1	<i>De industrie</i>	17
3.2.2	<i>Land & Tuinbouw</i>	18
3.2.3	<i>Transport</i>	18
3.2.4	<i>De Gebouwde Omgeving</i>	19
3.2.5	<i>De totale waterstofvraag</i>	20
3.3	VERDELING VAN DE POTENTIËLE GROENE WATERSTOFPRODUCTIE BINNEN NEDERLAND	20
		22
4	CONCLUSIE	24
5	DISCUSSIE	26
	INTERNATIONALE GROENE WATERSTOFHANDEL	26
	BESPARINGEN	26
6	BIJLAGEN	27
6.1	BIJLAGE A	28
6.2	BIJLAGE B	29
6.3	BIJLAGE C	30
7	FIGUREN EN TABELLEN	32
	BRONVERMELDING	33





1 INTRODUCTIE EN PROBLEEMSTELLING

Nederland staat aan het begin van de transitie naar een aardgasvrije gebouwde omgeving. In het Parijs akkoord is afgesproken dat we de CO₂-uitstoot drastisch gaan verminderen, in 2050 moet de uitstoot 95% lager dan die in 1990. We gaan dus stoppen met het verbranden van aardgas voor het verwarmen van huizen. Maar hoe gaat Nederland dat realiseren?

Een eerste logische stap van de transitie lijkt isolatie. Daar kan een grote duurzame slag geslagen worden. Toch zal ook de energiebron, nu aardgas, moeten verduurzamen. Verschillende mogelijkheden bieden zich aan als vervanging: hernieuwbare elektriciteit (in combinatie met een warmtepomp), restwarmte uit industrie of afvalverbranders, geothermie of andere warmtebronnen (met een warmtenet) of hernieuwbaar gas (biogas of groene waterstof). Elke mogelijkheid heeft zo zijn voor- en nadelen. Een warmtepomp heeft een enorm hoog rendement van 250% [1], maar vereist een relatief hoge isolatiegraad en met name bij oudere woningen is het aanbrengen van voldoende isolatie erg kostbaar. Met een warmtenet kan je verschillende warmtebronnen gebruiken om daar een hele wijk op aan te sluiten. Echter, die warmtebronnen zijn niet overal beschikbaar en bij de installatie moet een buizensysteem in de grond worden gegraven, wat niet overal mogelijk is. Daarnaast is bij een lage temperatuur warmtenet ook grondige woningisolatie nodig.

Bij al deze onzekerheid is het geen wonder dat duurzaam gas steeds meer aandacht begint te krijgen: met relatief kleine ingrepen is een overstap mogelijk. Het huidige aardgasnet kan biogas vervoeren, en met wat aanpassingen in potentie ook waterstof [2]. Daarnaast zijn er HR-ketels die op biogas, waterstof of zelfs een combinatie zouden kunnen werken. Wel blijft de vraag voor duurzaam gas: is er genoeg? Het Plan Bureau Leefomgeving (PBL) heeft recentelijk een onderzoek gepubliceerd waarin duidelijk werd dat er een beperkte hoeveelheid biomassa mondiaal beschikbaar zal zijn in 2050. Zij berekenen het potentieel vanuit Nederland op 200 PJ [3], terwijl in 2015 het aardgasverbruik van de gebouwde omgeving alleen al 416 PJ bedroeg [4]. Maar hoe zit het met groene waterstof gemaakt uit hernieuwbare elektriciteit? Kunnen we, als we een overschot van hernieuwbare elektriciteit gaan opwekken, daar wél genoeg van produceren? Hier is nog veel onduidelijkheid over.

Squarewise is een transitiebureau met een focus op het aardgasvrij maken van de gebouwde omgeving. In gemeenten waar Squarewise actief is wordt waterstof nu geopperd als alternatief voor warmtenetten of warmtepompen. Dit zorgt voor verwarring en potentieel voor vertraging. Het is een lonkend perspectief voor gemeenten en bewoners: als Nederland overstapt op een nationaal gasnet op groene waterstof, lost het probleem zich vanzelf op en is het niet meer nodig om woningen te renoveren. De verantwoordelijkheid ligt niet meer bij gemeenten en corporaties, en het gasnet zal zich vanzelf vullen met waterstof. Maar als blijkt dat dit nationale waterstofnet niet realistisch is, moeten gemeenten en corporaties nu actief aan de slag om de woningvoorraad aardgasvrij te maken. Daarom tracht dit rapport, in opdracht van Squarewise, antwoord te geven op het volgende vraagstuk:

Wat is het Nederlands productiepotentieel van groene waterstof in 2050, en is dit voldoende voor een nationaal waterstofnet voor de gebouwde omgeving?



2 METHODE

De aanpak om antwoord te geven op de vraag: "Wat is het Nederlands productiepotentieel van groene waterstof in 2050, en is dit voldoende voor een nationaal waterstofnet voor de gebouwde omgeving?" is opgedeeld in drie onderdelen:

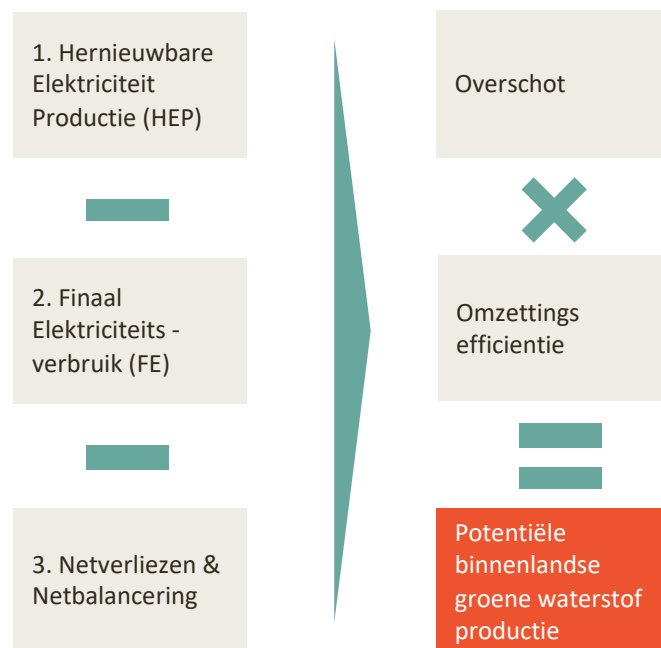
- *De aannames en de berekening van het Nederlands productiepotentieel van groene waterstof in 2050 (Hoofdstuk 2.1)*
- *De berekening en aannames van de totale Nederlandse vraag naar waterstof in 2050 (Hoofdstuk 2.2)*
- *De verdeling van de Nederlandse waterstof over de totale Nederlandse vraag, en het potentiële aandeel voor de gebouwde omgeving (GO) (Hoofdstuk 2.3)*

Dit onderzoek veronderstelt dat de waterstofproductie in 2050 volledig uit groene waterstof bestaat. In het rapport wordt met een nationaal waterstofnet een vervanging van aardgas door waterstof in het huidige aardgasnet bedoeld. Hierbij is aangenomen dat de Nederlandse lage temperatuur warmtevraag (LTW, <100°C) vanuit alle sectoren volledig wordt voorzien door waterstof, het huidige aardgasnet wordt ingezet voor de transport van waterstof en er verder geen ontwikkeling en overstap op warmtepompen of warmtenetten plaatsvindt voor de voorziening van LTW.

2.1 De potentiële binnenlandse groene waterstofproductie in 2050

Figuur 2.1 en tabel 2.1 laten de som en de aannames zien die in dit onderzoek gemaakt zijn om de potentiële groene waterstofproductie in 2050 te berekenen. Allereerst is bepaald hoeveel hernieuwbare elektriciteit in 2050 geproduceerd kan worden. Van die hernieuwbare elektriciteit moet een deel gereserveerd worden voor finaal elektriciteitsgebruik. Bij het transporteren van de elektriciteit voor het finale gebruik raakt een deel verloren aan het net, ook wel netverliezen. Daarnaast raakt een deel van de energie verloren aan netbalancing. Omdat het aanbod van hernieuwbare elektriciteit niet constant is, en ook de vraag naar elektriciteit varieert, ontstaan er tekorten en overschotten. Omgaan met deze variaties wordt netbalancing genoemd, een proces waarbij energie verloren gaat. Met de hoeveelheid hernieuwbare elektriciteit die over blijft na het finale elektriciteitsgebruik en de verliezen, het overschot, kan groene waterstof geproduceerd worden door middel van elektrolyse. Een deel van de energie gaat hierbij verloren aan omzettingsverlies.





Figuur 2.1 Berekening van de potentiële binnenlandse groene waterstofproductie

Tabel 2.1 Aannames voor de berekening van de Nederlandse potentiële groene waterstofproductie in 2050

Aannames	Toelichting
De waterstofproductie is volledig groen	Waterstof kan op twee manieren geproduceerd worden. Blauwe waterstof wordt geproduceerd uit aardgas, een proces waarbij CO ₂ vrijkomt, die permanent wordt opgeslagen. Groene waterstof wordt geproduceerd door water met hernieuwbare elektriciteit te splitsen tot waterstof (H ₂) en zuurstof (O ₂). Dit proces heet elektrolyse. Dit onderzoek neemt aan dat, om aan de klimaatdoelstelling te voldoen, de waterstofproductie in 2050 volledig groen is.
Hernieuwbare elektriciteit wordt opgewerkt door wind- en zonne-energie van Nederlandse installaties	Hernieuwbare elektriciteit kan opgewekt worden door energie uit zon, wind, water, of getijden. Doordat het totale binnenlandse potentieel van energie uit waterkracht en getijden relatief laag is [5] neemt dit onderzoek aan dat de hernieuwbare elektriciteitsproductie in 2050 volledig uit wind en zon afkomstig is. Daarnaast zijn handel en import van elektriciteit buiten beschouwing gelaten.
Het Finale Elektriciteitsgebruik (FE) is opgebouwd uit de vraag naar Kracht & Licht en een 100% elektrificatie van personenvervoer	Dit onderzoek neemt aan dat het Finale Elektriciteitsgebruik bestaat uit de basisvraag naar direct gebruik van elektriciteit voor Kracht & Licht. Daarnaast is de aanname gemaakt dat in 2050 personenauto's 100% op elektriciteit rijden. Er bestaat een mogelijkheid dat in de toekomst auto's ook op waterstof kunnen rijden. Echter, omdat dit onderzoek zich richt op waterstof voor de productie van LTW, is gekozen om waterstof voor personentransport buiten het toekomstbeeld te laten. In de Finale Elektriciteitsvraag is geen elektriciteit gereserveerd voor de productie van LTW door middel van warmtepompen, omdat aan is genomen dat de LTW vraag volledig door waterstof zal worden voorzien via een nationaal waterstofnet.

Netverliezen zijn 5% van de totale getransporteerde elektriciteit

In 2016 waren de gemiddelde netverliezen 4.6% [6]. In 2050 zal een toename zijn in elektrificatie, waarvoor een groter en verzwaard elektriciteitsnet nodig is. Dit onderzoek neemt aan dat de verzwarende van het net en de ontwikkeling van de techniek elkaar zullen opheffen en in een netverlies van 5% zullen resulteren.

Verlies van netbalancing is een gemiddelde van maximaal (3.23% buffercapaciteit van FE) en minimaal gebruik van een buffercapaciteit (0.09% buffercapaciteit en 7% overcapaciteit)

Momenteel worden de variaties in vraag en aanbod van elektriciteit opgevangen door gasturbines en gasmotoren. In de toekomst zal gebruik van fossiele bronnen uitgefaseerd worden en zal het aandeel hernieuwbare elektriciteit stijgen. Om de verschillen op te kunnen vangen zijn er twee mogelijkheden. Allereerst kan gebruik gemaakt worden van opslag. Overschotten van hernieuwbare elektriciteit kunnen opgeslagen worden om op de korte termijn of de lange termijn tekorten aan te vullen. Bij opslag gaat een deel van de elektriciteit verloren aan omzettingsverliezen. Voor korte termijn opslag wordt normaliter gebruik gemaakt van batterijen en voor de lange termijn opslag worden moleculen als waterstof en ammoniak voorgesteld. Voor deze opslag is ruimte nodig. Een alternatief voor netbalancing is het installeren van overcapaciteit. Door meer capaciteit voor de productie van hernieuwbare elektriciteit te installeren kan een groot deel van de verschillen in vraag en aanbod opgevangen worden door simpelweg windmolens en zonnepanelen aan en uit te schakelen. Hiervoor moet echter voldoende ruimte zijn om een overcapaciteit te kunnen installeren. Tabel 2.2 geeft netbalancing waarden voor twee extreme scenario's: volledig (Sinn 2017) en nauwelijks (Schill land Zerrahn 2018) gebruik van buffercapaciteit. Omdat het nog onduidelijk is hoe de techniek voor netbalancing zich zal ontwikkelen gebruikt dit rapport een gemiddeld verlies voor netbalancing van de twee extreme scenario's.

De omzetting-efficiëntie van elektriciteit naar waterstof is 75%

De huidige omzetting-efficiëntie van elektrolyzers ligt tussen de 70-80%. Een toename tot 80-85% is voorspeld voor de toekomst. Echter, omdat door het variabele aanbod van elektriciteit de elektrolyzers niet altijd op volle capaciteit kunnen lopen, is in dit onderzoek aangenomen dat de ontwikkeling in efficiëntie en verliezen van capaciteit elkaar opheffen. [1]

Tabel 2.2 Netbalancing waarden

Bron	Buffer capaciteit	Over capaciteit
Sinn 2017 ^[7]	3.23%	0%
Schill and Zerrahn 2018 ^[8]	0.09%	7%

De ontwikkeling van de hernieuwbare elektriciteitsproductie en het finale elektriciteitsgebruik zijn sterk afhankelijk van het opstellen van nieuwe- en daadwerkelijk uitvoeren van- beleidsplannen gedurende de komende jaren. Daarom heeft dit onderzoek voor drie scenario's de potentiële binnenlandse waterstofproductie doorgerekend: een scenario huidig tempo (2.1.1), versnelling (2.1.2) en maximaal (2.1.3).

2.1.1 Scenario huidig tempo

In dit scenario wordt de waterstofproductie berekend aan de hand van het huidige tempo van de verduurzaming van Nederland. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de Nationale Energie Verkenning van 2017 (NEV2017) [4]. Elk jaar wordt de NEV gepubliceerd door het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) en het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) waarin aan de hand van historische

data, vastgestelde beleidsplannen (V) en voorgestelde beleidsplannen (VV) een trend wordt opgesteld waarmee onder andere de Hernieuwbare Elektriciteit Productie (HEP) en het Finale Elektriciteitsverbruik (FE) worden voorspeld.

2.1.2 Scenario versnelling

Omdat met de huidige beleidsplannen de doelstellingen van het klimaatakkoord in 2050 niet gehaald worden [9], zal er een versnelling in de verduurzaming moeten plaatsvinden. De mate van deze versnelling hangt nauw samen met aannames van beschikbare ruimte voor duurzame energie, de technische ontwikkeling van turbines en zonnepanelen en van de mate van besparing van energiegebruik. Zo zal duurzame energie moeten concurreren met huidig gebruik van de ruimte; commerciële visserij en landbouw hebben ruimte nodig, maar ook de natuurbescherming zal meedoen in de strijd. Ook de bevolking heeft een vinger in de pap. Bewoners zullen moeten wennen aan een drastisch veranderend landschap en hun (financiële) gewoontes moeten veranderen om energiebesparingen te realiseren.

In het rapport *Klimaat Energie Ruimte* is door landschapsarchitecten en de universiteit Wageningen [5] onderzocht hoeveel elektriciteit met de beschikbare ruimte in Nederland kan worden geproduceerd. In het scenario versnelling is uitgegaan van een grondig gebruik van deze beschikbare ruimte, maar zijn ook restricties meegenomen. Dit om rekening te houden met de haalbaarheid van de installatie vóór 2050. Tabel 2.3 geeft een overzicht van het geïnstalleerde vermogen en de restricties van de hernieuwbare elektriciteitsproductie in 2050. In totaal zou er dus in het versnelde scenario 42 GW wind en 97 GW zon geïnstalleerd zijn. Ter vergelijking: momenteel is zo'n 4.2 GW aan wind en 2.9 GW zonne-energie geïnstalleerd [10]. Om de cijfers in perspectief te zetten vergelijkt dit onderzoek de hernieuwbare elektriciteitsproductie van *Klimaat Energie Ruimte* met voorspellingen van de Gasunie [11] en CE Delft (in opdracht van Netbeheer Nederland) [12].



Tabel 2.3 Geïnstalleerde hernieuwbare elektriciteitsproductie in 2050 volgens het Scenario versnelling

Hernieuwbare elektriciteitsproductie	Geïnstalleerd vermogen	Restricties
Wind op zee	36 GW	Maximaal rekening houdend met beschermd gebied en visserij
Wind op land	1 GW	Alle beschikbare ruimte op land, op 1000m van bebouwing
Repowering	5 GW	Vervangen van huidig opgestelde oudere, relatief kleine windturbines door grote, moderne windturbines met een groter opgesteld vermogen
Totaal wind 2050	42 GW	
Zonneweiden	20 GW	Alle beschikbare ruimte op land, op 1000m van bebouwing
Zon op daken	30 GW	75% bedekking van geschikte daken met zonnepanelen
Zon op binnenwateren	22 GW	Bezetting van 10% van de binnenwateren
Zon op infrastructuur overheid	9 GW	Benutting van alle gronden van RWS naast snelwegen en dijken
Zon op verzilte agrarische grond	16 GW	Bezetting van 10% van verzilte agrarische grond
Totaal zon 2050	97 GW	

Naast een versnelling in de productie van hernieuwbare elektriciteit, zal er ook een versnelling in de besparing van het elektriciteitsgebruik voor Kracht & Licht nodig zijn voor het halen van de doelstellingen. Deze besparingen en de overstap op elektrisch rijden zullen invloed hebben op het Nederlandse finale elektriciteitsgebruik in 2050. Om hier een inschatting van te maken heeft dit rapport voorspellingen van de Gasunie en CE Delft gebruikt [11, 12]. De toekomstbeelden van de Gasunie en CE Delft zijn in dit rapport echter wel aangepast: elektriciteit die gereserveerd was voor de productie van LTW is weggelaten om de onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden.

2.1.3 Scenario maximaal

In het scenario maximaal zijn de restricties van het scenario versnelling versoepeld. Dit scenario gaat dan ook uit van een maximale benutting van de potentie voor hernieuwbare elektriciteitsproductie. Hierbij is niet gekeken naar of deze installatie realistisch of haalbaar is vóór 2050. Tabel 2.3 geeft het overzicht van het geïnstalleerde vermogen en restricties volgens het maximale scenario in 2050. In totaal zal er dan 76 GW wind en 162 GW zon geïnstalleerd zijn. Het maximale scenario gaat uit van eenzelfde ontwikkeling van het finale elektriciteitsverbruik als het scenario versnelling.

Tabel 2.4 Geïnstalleerde hernieuwbare elektriciteitsproductie in 2050 volgens het Scenario maximaal

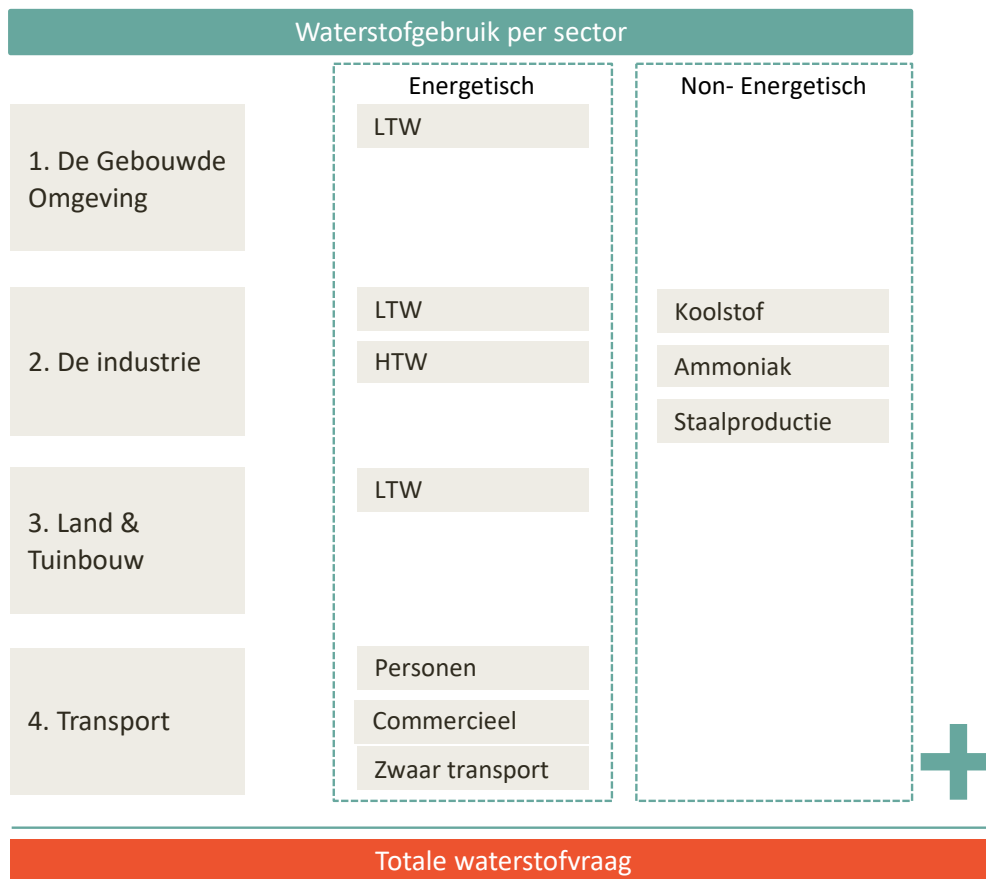
Hernieuwbare elektriciteitsproductie	Geïnstalleerd vermogen	Restricties
Wind op zee	54 GW	Minimaal rekening houdend met beschermde gebieden en visserij
Wind op land	17 GW	Alle beschikbare ruimte op land, op 500m van bebouwing
Repowering	5 GW	Vervangen van huidig opgestelde oudere, relatief kleine windturbines door grote, moderne windturbines met een groter opgesteld vermogen
Totaal wind 2050	76 GW	
Zonneweiden	45 GW	Alle beschikbare ruimte op land, op 500m van bebouwing
Zon op daken	50 GW	75% bedekking van geschikte daken met zonnepanelen, maximale efficiëntie
Zon op binnenwateren	22 GW	Bezetting van 10% van de binnenwateren
Zon op infrastructuur overheid	15 GW	Benutting van alle gronden van RWS naast snelwegen en dijken, maximale potentie
Zon op verzilte agrarische grond	30 GW	Bezetting van 10% van verzilte agrarische grond, maximale verzilting
Totaal zon 2050	162 GW	

2.2 De totale Nederlandse vraag naar waterstof in 2050

Om het klimaatdoel dat is vastgelegd in de Nederlandse klimaatwet, 95% reductie van broeikasgassen t.o.v. 1990, te halen, zal niet alleen de voorziening van lage temperatuur warmte moeten verduurzamen. Voor zowel de totale energetische als non-energetische vraag naar fossiele bronnen zal een alternatief moeten worden gevonden. Vandaar dat in dit onderzoek niet alleen de energetische waterstofvraag voor de sectoren industrie, land & tuinbouw, transport en de gebouwde omgeving wordt meegenomen, maar ook de non-energetische waterstofvraag vanuit de industrie. Binnen de transportsector wordt ook de vraag vanuit zwaar transport (internationale lucht- en scheepvaart) meegenomen. Ook al valt deze sector onder internationale wetgeving, er is wel een vaste hoeveelheid brandstof die in Nederland gebunkerd wordt. Daardoor maken zij ook aanspraak op de eventuele vraag naar waterstof op Nederlandse bodem.

Figuur 2.2 geeft een overzicht van de berekening van de totale waterstofvraag. In hoofdstukken 2.2.1 – 2.2.4 wordt per sector uitgelegd welke bronnen en aannames zijn gebruikt om de potentiële waterstofvraag in 2050 te berekenen.





Figuur 2.2 Berekening van de totale waterstofvraag

2.2.1 De industrie

Er is een energetische en non-energetische vraag naar waterstof vanuit de industrie.

Energetische waterstofvraag

De totale energievraag vanuit de industrie bestaat uit een aandeel kracht & licht (K&L) en warmte. De K&L vraag wordt, zoals uitgelegd in hoofdstuk 2.1, direct vervuld door hernieuwbare elektriciteitsproductie. De overblijvende warmtevraag van de industrie valt op te splitsen in een vraag naar lage temperatuur warmte (LTW, <100°C) en hoge temperatuur warmte (HTW, >100°C). Dit onderzoek gaat ervanuit dat de **LTW**-vraag voorzien blijft worden via het aardgasnet, om te kunnen bepalen of in de toekomst dat net gebruikt kan worden voor waterstof. De HTW vraag kan (nog) niet elektrisch worden geproduceerd. Vandaar dat dit onderzoek aanneemt dat ook de **HTW** vraag door waterstof zal worden voorzien. Om een inschatting te maken van de potentiële industriële waterstofvraag voor LTW en HTW gebruikt dit onderzoek aannames van het TKI [13]. De cijfers van het TKI worden vergeleken met de voorspellingen van de Gasunie [11] en CE Delft [12].

Non-energetische waterstofvraag

Naast energetisch gebruik van waterstof, is er ook een grote potentie voor non-energetisch gebruik van waterstof voor verduurzaming van de industrie. Fossiele bronnen worden niet alleen als energiebron, maar ook als grondstofbron gebruikt voor zowel koolstof als waterstof. Het Centraal Bureau Statistiek (CBS) houdt bij hoeveel PJ aan fossiele bronnen non-energetisch wordt gebruikt.

Met de fossiele **koolstof** worden verschillende koolstofmoleculen gemaakt waar weer materialen, zoals plastics, van worden geproduceerd. Wanneer deze materialen uiteindelijk worden verbrand in de vorm

van afval, komt CO₂ vrij. Omdat deze CO₂ uit fossiele bronnen komt zorgt het voor een verhoging van de uiteindelijke CO₂-concentratie in de atmosfeer. Alternatieve koolstofbronnen die gebruikt kunnen worden voor de verduurzaming van de fossiele koolstofchemie zijn *biomassa* en *CO₂ afvangen met waterstof*. Omdat biomassa bestaat uit producten die gewonnen zijn uit plantaardige grondstoffen en dierlijk (rest)materiaal zorgt de uiteindelijke verbranding van biomassa niet voor een netto verhoging van de CO₂ concentratie in de atmosfeer. Om biomassa voor chemie te gebruiken zal de biomassa wel nog bewerkt moeten worden om er de juiste moleculen uit te krijgen. Wanneer biomassa voor energie gebruikt wordt zullen er omzettingsverliezen optreden. Een alternatief voor de productie van duurzame koolstof is het afvangen van CO₂ met waterstof. De ontwikkeling van deze technologie is nog in de beginfase [14] en zal nog grote stappen moeten maken om realiteit te worden. Dit onderzoek gebruikt cijfers van het TKI [13] voor de voorspelling van de duurzame koolstofvraag. Omdat de ontwikkeling nog zo onzeker is, neemt dit onderzoek aan dat de duurzame koolstofproductie maximaal gebruik maakt van de beschikbare biomassa in Nederland. De beschikbare biomassa in 2050 is berekend door het Plan Bureau Leefomgeving (PBL) [3]. Het eventueel resterende aandeel kan zowel door import van waterstof als biomassa vervuld worden.

Fossiele waterstof wordt momenteel gebruikt om met stikstof **ammoniak** te produceren. Om de ammoniak productie te verduurzamen kan hier ook groene waterstof voor worden gebruikt. Dit onderzoek gebruikt de raming van het TKI om een inschatting te maken van de waterstofvraag voor de verduurzaming van ammoniakproductie in 2050 [15].

Een nieuwe non-energetische potentiële toepassing van groene waterstof voor de verduurzaming van de industrie is te vinden in de **staalproductie**. Momenteel wordt staal geproduceerd door de reductie van ijzer met syngas (koolstofrijk gas). Een alternatief proces reduceert ijzer met waterstof. Het TKI heeft een inschatting gemaakt voor de hoeveelheid waterstof nodig voor de verduurzaming van de staalproductie [13].

2.2.2 Land & Tuinbouw

Wederom wordt de elektriciteitsvraag voor Kracht & Licht van de sector land & tuinbouw vervuld door hernieuwbare elektriciteitsproductie, zoals weergegeven in hoofdstuk 2.2. Daarnaast gebruikt de land & tuinbouw sector aardgas voor lage temperatuurwarmte (LTW). Dit onderzoek gaat ervanuit dat de LTW vraag van de land & tuinbouwsector in 2050 volledig wordt voorzien door waterstof. Voorspellingen van het TKI [13] en de Gasunie [11] worden gebruikt om een inschatting te maken van de waterstofvraag.

2.2.3 Transport

De transportsector kan opgedeeld worden in personenvervoer, commercieel vervoer (bus en goederen) en zwaar transport (internationale lucht- en scheepvaart). Mogelijkheden voor het verduurzamen van transport zijn rijden op elektriciteit, waterstof of biomassa (LPG). Niet elk type vervoer is even geschikt voor elektrificatie of waterstof. Verbranden van biomassa is niet ideaal wegens het gelimiteerde aanbod en de vraag vanuit de chemie waar weinig alternatieven voor zijn. Dit onderzoek neemt aan dat in 2050 het personenvervoer volledig elektrisch is. De elektriciteitsvraag is opgenomen in hoofdstuk 2.2 bij het Finale Elektriciteitsgebruik. Het energie intensievere **commerciële transport** zal op waterstof rijden. Voorspellingen van het TKI [13] en CE Delft [12] zijn gebruikt om de waterstofvraag van commercieel transport. Voor **zwaar transport** is de potentiële waterstofvraagvoorspelling van het TKI gebruikt [13].

2.2.4 De gebouwde omgeving

De totale energievraag van de gebouwde omgeving bestaat uit een aandeel Kracht & Licht (K&L) voor gebruik van apparatuur en een aandeel lage temperatuur warmte (LTW) voor het verwarmen van huizen. Zoals uitgelegd in hoofdstuk 2.1 zal in dit onderzoek de K&L direct door hernieuwbare elektriciteit



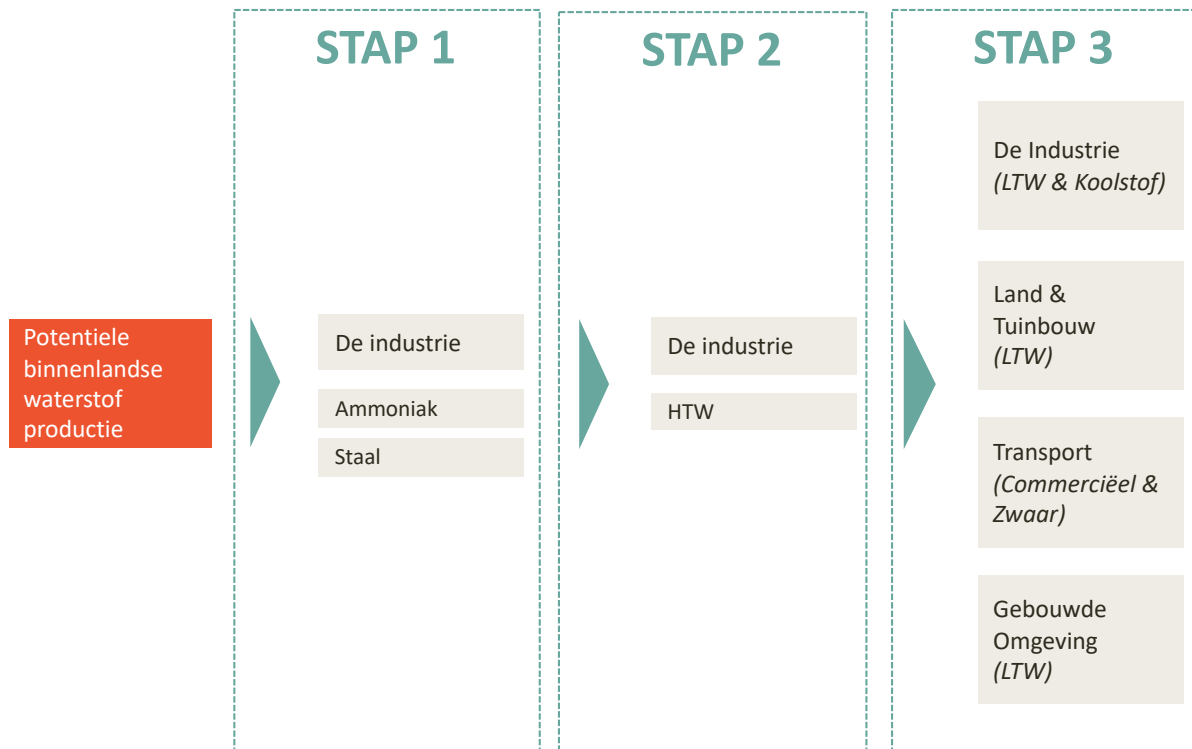
worden voorzien. De LTW vraag van de gebouwde omgeving wordt momenteel door aardgas via het aardgasnetwerk vervuld. Isolatie van huizen kan de LTW vraag van de gebouwde omgeving verlagen. In het rapport Klimaat Energie Ruimte [5] is een berekening gemaakt van de potentiële besparing in gasgebruik door isolatie. Dit onderzoek neemt aan dat in het versnelde scenario 75%, en in het maximale scenario 100% van de potentiële isolatiebesparingen voor woningen in 2050 uitgevoerd zijn. Vervolgens is aangenomen dat de overgebleven LTW vraag volledig door waterstof zal worden voorzien en niet (deels) door warmtepompen of warmtenetten. Bij de berekening van de overgebleven waterstofvraag van de gebouwde omgeving is aangenomen dat een HR-ketel op gas eenzelfde efficiëntie heeft als op waterstof [1]. Deze berekening is vergeleken met voorspellingen van de Gasunie [11], het TKI [13] en CE Delft [12].

2.3 Verdeling van de potentiële groene waterstofproductie binnen Nederland

Om antwoord te kunnen geven op de vraag of er voldoende waterstof geproduceerd wordt in Nederland om de gebouwde omgeving van lage temperatuurwarmte te voorzien in 2050, is een onderscheid gemaakt in urgentie binnen de waterstofvraag. Figuur 2.3 laat zien welke hiërarchie dit onderzoek gebruikt bij de verdeling van het potentiële waterstofaanbod.

Zo is aangenomen dat in de non-energetische industrie de ammoniak en staalproductie als eerste aanspraak zullen maken op de eventueel geproduceerde groene waterstof. Dit omdat er voor deze sectoren geen alternatief is voor verduurzaming. Vervolgens is aangenomen dat de hoge temperatuurwarmte (HTW) vraag van de industrie aanspraak kan maken op de overgebleven groene waterstof, omdat er nog geen alternatieve techniek voor HTW-productie is ontwikkeld. Tot slot heeft dit onderzoek geen onderscheid gemaakt in prioriteit van de overgebleven waterstofvraag. Indien voldoende groene waterstof geproduceerd wordt om de volledige waterstofvraag van stap 3 te voorzien, kan met zekerheid gezegd worden dat Nederland voldoende groene waterstof kan produceren voor de LTW-vraag van de Gebouwde Omgeving. Indien na stap 2 geen groene waterstof over is, kan met zekerheid gezegd worden dat Nederland onvoldoende groene waterstof kan produceren. In een ander scenario kan bediscussieerd worden of het voldoen van de waterstofvraag realistisch is.





Figuur 2.3 Verdeling van de binnenlandse groene waterstofproductie binnen de totale waterstofvraag op basis van prioriteit

Het volledige overzicht van de binnenlandse waterstofproductie en verdeling binnen de sectoren is vervolgens weergegeven in een Sankey diagram. De cijfers zijn berekend zoals aangegeven in de bovengenoemde methode. De vormgeving is uitbesteed aan Roben Gort.



3 RESULTATEN

3.1 Resultaten van de potentiële groene waterstofproductie in 2050

Voor de berekening van de potentie van binnenlandse waterstofproductie in 2050 (3.1.4) zijn de finale elektriciteitsvraag (hoofdstuk 3.1.2) en de netverliezen en netbalancering (3.1.3) afgetrokken van de hernieuwbare elektriciteitsproductie (3.1.1). De berekening laat zien dat er in totaal tussen de **107 PJ** (scenario Huidig Tempo) en **694 PJ** (scenario Maximaal) groene waterstof geproduceerd kan worden uit hernieuwbaar opgewekte elektriciteit. Het scenario Versnelling ligt dicht bij de waterstofproductie van het scenario Huidig Tempo, dan die van het scenario Maximaal, namelijk **254 PJ**.

3.1.1 Hernieuwbare Elektriciteitsproductie

Tabel 3.1 laat voor alle scenario's een forse toename van de hernieuwbare elektriciteitsproductie (HEP) zien ten opzichte van 2016. In het scenario huidig tempo, waarin de trend van de vastgestelde én voorgestelde beleidsplannen wordt doorgetrokken, is de HEP in 2050 toegenomen tot **530 PJ**. Het versnelde scenario op basis van het Energie Ruimte Klimaat (ERK) rapport laat een nog grotere toename zien tot **859 PJ**. De voorspelling van het Gasunie rapport ligt wat onder het versnelde scenario, en dat van CE Delft iets erboven. Wanneer de maximale potentie wordt benut in het scenario maximaal neemt de HEP toe tot **1445 PJ**. In BIJLAGE A wordt een totaaloverzicht van het opgestelde vermogen gegeven voor de verschillende bronnen.

Tabel 3.1 Prognose van de totale Nederlandse hernieuwbare elektriciteitsproductie in 2050

Bron	BASELINE 2016		2050			Gasunie	CE Delft ^{S2}
	MONITweb	Scenario Huidig tempo MONITweb ^{1 VV}	Scenario Versnelling ERK ^X	Scenario Maximaal ERK ^Y	Totale HEP (PJ)		
Totale HEP (PJ)	41	530	859	1445	789	1135	

¹ Prognose door het doortrekken van de lineaire trend op basis van MONITweb data tussen 2016 en 2035

VV = voorgenomen vastgesteld beleid

X = minimum bandbreedte, minimaal 1000m van bebouwing

Y = maximum bandbreedte, minimaal 500m van bebouwing

S2 = Scenario "regie nationaal" uit het CE Delft rapport Net van de toekomst [12]

3.1.2 Finaal Elektriciteitsverbruik

Tabel 3.2 geeft de voorspelling van het Finale Elektriciteitsgebruik (FE) in 2050. Wanneer in scenario Huidig Tempo de trend van de vastgestelde én voorgestelde beleidsplannen (VV) van de NEV wordt aangehouden, wordt een lichte daling in het FE ten opzichte van 2016 voorspeld naar **351 PJ**.

Zowel de Gasunie als CE Delft voorspellen een meer dan 100 PJ hoger Finaal Elektriciteitsgebruik (FE) van rond de 470 PJ. Het verschil kan worden verklaard wanneer de uitsplitsing van de NEV met die van de Gasunie wordt vergeleken: de Gasunie gaat uit van een grotere besparing voor de Gebouwde Omgeving, een sterkere elektrificatie van de industrie en een toename van de elektrificatie van personentransport. Dit rapport neemt aan dat het FE voor het scenario Versnelling en het scenario Maximaal **470 PJ** bedraagt.

Tabel 3.2 Prognose van het finale elektriciteitsverbruik per sector in 2050

Scenario	BASELINE	2050		
	2016 ^{1 V}	Scenario Huidig tempo	Scenario Versnelling & Maximaal	
		NEV2017 ²	GASUNIE ^B	CE Delft ^{S2.2}
Gebouwde omgeving	201	192	129	
Industrie	123	98	210	
Landbouw	33	35	34	
Verkeer	6	25	101	88
Totaal FE (PJ)	363	351	474	468

¹ NEV2017

² Prognose door het doortrekken van de lineaire trend op basis van NEV2017 data tussen 2016 en 2035

V = vastgesteld beleid

VV = voorgenomen vastgesteld beleid

B = De voorspelling van de Gasunie zonder de gereserveerde elektriciteitsvraag van het Gasunie rapport [11] voor LTW in de Gebouwde Omgeving

S2.2 = aangepast Scenario regie nationaal uit het CE Delft rapport Net voor de Toekomst [12] gebruik makend van de aannames: i.) Elektriciteit + groen gas zijn vervangen door H₂ voor LTW, ii.) Groen gas is vervangen door H₂ voor HTW, iii) Elektrificatie van personenauto's is vervangen door H₂ voor transport. Conversies komen uit het "De positie van waterstof in de energietransitie" van Overmorgen [1]

3.1.3 Netverliezen & Netbalancering

Voor de verschillende FE zijn de netbalancering en netverliezen berekend. Tabel 3.3 geeft voor het scenario Huidig Tempo en de scenario's Versnelling en Maximaal de berekening van de totale verliezen. In de verdere berekening van de potentiële waterstofproductie wordt het gemiddelde genomen van twee scenario's; 1.) Maximale buffering (S = Sinn 2017 [7]) en 2.) Maximale overcapaciteit (SZ = Schill and Zerrahn 2018 [8]). Dit betekent een verlies van **37 PJ** voor het scenario Huidig Tempo, en een verlies van **50 PJ** voor de scenario's Versnelling & Maximaal.

Voor elk FE zijn de totale verliezen het laagst voor maximale buffering, en het hoogst voor maximale overcapaciteit. Een toename in FE zorgt ook voor een hoger totaal verlies.

Tabel 3.3 Netverliezen & Netbalancering

FE (PJ)	Bron	Buffer capaciteit (%)	Verlies aan buffer omzetting (PJ)	Over capaciteit (%)	Verlies aan over capaciteit (PJ)	Netverliezen (%)	Netverliezen (PJ)	Totaal (PJ)
Scenario Huidig Tempo (FE = 351 PJ)								
351	S	3	8	0	0	5	19	26
351	SZ	0	0	7	28	5	20	48
							Gemiddeld	37
Scenario's Versneld & Maximaal (FE = 470 PJ)								
470	S	3	10	0	0	5	25	35
470	SZ	0	0	7	37	5	27	64
							Gemiddeld	50

3.1.4 Potentiële groene waterstofproductie

In het Vastgestelde beleid (V) van de NEV2017 wordt onvoldoende hernieuwbare elektriciteit geproduceerd om aan de Finale Elektriciteitsvraag te voldoen (zie BIJLAGE B). Tabel 3.4 laat zien dat met het scenario huidig tempo, op basis van de huidige versnelling in 2050 **107 PJ** waterstof geproduceerd kan worden. Het versnelde scenario voorspelt een hogere potentiële waterstofproductie van **254 PJ**. De grootste waterstofproductie wordt voorspeld door het scenario maximaal, wanneer alle potentie van hernieuwbare elektriciteitsproductie wordt benut, namelijk **694 PJ**. Keuzes en de bereidheid van de bevolking zullen beïnvloeden hoeveel ruimte daadwerkelijk opgeofferd zal worden voor HEP.

Tabel 3.4 De potentiële groene waterstofproductie in 2050

Scenario	2050		
	Scenario Huidig Tempo	Scenario Versnelling	Scenario Maximaal
1. Hernieuwbare Elektriciteitsproductie (PJ)	530	859	1445
2. Finaal Elektriciteitsverbruik (PJ)	351	470	
3. Netverliezen & Netbalancering (PJ)	37	50	
4. Overschot Hernieuwbare Elektriciteitsproductie (PJ)	142	339	925
5. Potentiële groene waterstofproductie (PJ)	107	254	694

3.2 Resultaten van de waterstofvraag

Per sector is de vraag naar groene waterstof berekend. Hoofdstuk 3.2.1 geeft de waterstofvraag van de Industrie, 3.2.2 van de Land & Tuinbouw, 3.2.3 van Transport en 3.2.4 van de Gebouwde Omgeving. De totale waterstofvraag wordt in hoofdstuk 3.2.5 behandeld.

3.2.1 De industrie

De waterstofvraag van de industrie kan opgedeeld worden in een energetisch en non-energetisch deel. Het energetische deel bevat voorziening van Lage en Hoge Temperatuur Warmte (LTW en HTW). Het non-energetische deel bevat waterstof voor de productie van koolstofmoleculen, ammoniak en voor de verduurzaming van de staalindustrie.

Energetisch (LTW en HTW)

Tabel 3.7 laat zien dat volgens het TKI **140 PJ** voor LTW en **100 PJ** voor HTW nodig is. CE Delft reserveert een vergelijkbaar aandeel voor HTW, en de Gasunie reserveert een vergelijkbaar deel voor het totaal (204 PJ versus 240 PJ). In de berekeningen is daarom uitgegaan van de verdeling van het TKI.

Tabel 3.5 Waterstof voor warmte

Bron	2050		
	GASUNIE	TKI	CE Delft
Scenario	B		S2.2
LTW - industrie (PJ)		140	
HTW - industrie (PJ)		100	123
Totaal - industrie (PJ)	204	240	

B = De voorspelling van de Gasunie zonder de gereserveerde elektriciteitsvraag van het Gasunie rapport [11] voor LTW in de Gebouwde Omgeving

S2.2 = aangepast Scenario regie nationaal uit het CE Delft rapport Net voor de Toekomst [12] gebruik makend van de aannames: i.) Elektriciteit + groen gas zijn vervangen door H₂ voor LTW, ii.) Groen gas is vervangen door H₂ voor HTW, iii) Elektrificatie van personenauto's is vervangen door H₂ voor transport. Conversies komen uit het "De positie van waterstof in de energietransitie" van Overmorgen [1]

Non-energetisch

Grondstof voor Koolstofproducten

Volgens het TKI is de afgelopen jaren zo'n 480 PJ aardgas non-energetisch ingezet. Wanneer de volledige hoeveelheid beschikbare biomassa in Nederland (200 PJ, berekend door het PBL [3]) non-energetisch wordt ingezet onder de veronderstelling dat een 100% conversie mogelijk is, blijft de resterende koolstofvraag 280 PJ. Wanneer dit aandeel koolstof voor chemie wordt vervangen door moleculen uit het afvangen van CO₂ komt alle energie van waterstof. Aangenomen dat de vraag hetzelfde blijft zal de waterstofvraag dan **280 PJ** zijn. In werkelijkheid zal de vraag hoger liggen door verliezen in de productie van koolstofmoleculen met CO₂ afvangen. Deze techniek staat echter nog in de kinderschoenen.

Ammoniak

Jaarlijks wordt 9.2 miljard m³ waterstof gebruikt voor de industrie. Hiervan is 60% (60PJ) nodig voor Ammoniak productie. Verduurzamen van de ammoniakproductie zal dus tot een vraag naar **60 PJ** groene waterstof leiden. [15]

Staal

De staalproductie kan verduurzaamd worden door tijdens het proces ijzer te reduceren met waterstof. Een 50% verduurzaming leidt tot een jaarlijkse waterstofvraag van **20 PJ**. [13]

Totaal

Het EBN en het CBS geven een totaal non-energetisch energieverbruik van 550 – 560 PJ ([16], [17] respectievelijk). Met een biomassa gebruik van 200 PJ blijft hier 350-360 PJ van over. Wanneer de waterstof vraag voor koolstof, ammoniak en staal wordt opgeteld komt dit rapport uit op **360 PJ**. Dit komt overeen met de cijfers van het CBS.

3.2.2 Land & Tuinbouw

De sector Land & Tuinbouw heeft een vraag naar LTW. In de toekomstscenario's van de Gasunie en CE Delft vult geothermie (aardwarmte) een grote rol in de vervulling van deze warmtevraag. De Gasunie reserveert in de totale warmte vraag van 119 PJ een aandeel van 57 PJ voor geothermie. [11] De waterstof potentie voor de LTW vraag voor kassen is volgens het TKI 100 PJ. [13] Indien de LTW vraag volledig door waterstof wordt vervuld zal dus zo'n **100 PJ** waterstof nodig zijn.

3.2.3 Transport

Commercieel transport

De transportsector kan opgedeeld worden in personentransport, commercieel transport en zwaar transport. Dit rapport neemt aan dat personentransport in 2050 volledig elektrisch is. Commercieel transport heeft grote potentie om op waterstof te rijden. Volgens het TKI en CE Delft ligt de waterstofvraag voor commercieel transport tussen de 125 – 138 PJ respectievelijk. Dit onderzoek gaat uit van het gemiddelde: **130 PJ**.

Zwaar transport

Onder zwaar transport valt de Nederlandse brandstofvraag voor lucht- en scheepvaart. Volgens het TKI is deze vraag **700 PJ** per jaar. Het TKI gaat uit van een even grote vraag naar waterstof voor de zware transportsector in 2050.



3.2.4 De Gebouwde Omgeving

De Gebouwde Omgeving heeft een vraag naar LTW die momenteel grotendeels door aardgas wordt voorzien. Aangenomen dat een HR-ketel op gas eenzelfde efficiëntie heeft als op waterstof [1], laat tabel 3.6 zien dat voor een volledige overstap op waterstof voor de vervanging van aardgas tussen de **289 PJ** (scenario maximaal) en **318 PJ** (scenario's huidig tempo en versnelling) waterstof nodig zal zijn. BIJLAGE C bevat de totale berekening van het gebruikte besparingspotentieel voor de gebouwde omgeving.

Tabel 3.6 Gasverbruik gebouwde omgeving ^[5]

	Gasverbruik 2015	Besparingspotentie gas (PJ)	100% besparing	75% besparing
Utiliteit ¹	127	37	90	99
Woningen ²	279	80	199	219
TOTAAL	406	117	289	318

¹ Op basis van de NEV2017

² Op basis van ERK

Tabel 3.7 Waterstofgebruik gebouwde omgeving 2050

	2050		
Bron	GASUNIE	TKI	CE Delft
Scenario	B		S2.2
Gebouwde omgeving (PJ)	309	100	LTW 438

B = De voorspelling van de Gasunie zonder de gereserveerde elektriciteitsvraag van het Gasunie rapport [11] voor LTW in de Gebouwde Omgeving

S2.2 = aangepast Scenario regie nationaal uit het CE Delft rapport Net voor de Toekomst [12] gebruik makend van de aannames: i.) Elektriciteit + groen gas zijn vervangen door H₂ voor LTW, ii.) Groen gas is vervangen door H₂ voor HTW, iii) Elektrificatie van personenauto's is vervangen door H₂ voor transport. Conversies komen uit het "De positie van waterstof in de energietransitie" van Overmorgen [1]

Tabel 3.7 laat zien dat de Gasunie een waterstofgebruik voorspelt van 309 PJ. Bovenop deze voorspelling is echter nog een deel geothermie (92 PJ) gereserveerd in de warmtevraag. Wanneer ook de geothermie wordt vervangen, zoals in dit onderzoek wordt aangenomen, ligt de voorspelde waterstofvraag boven het 75% besparings-scenario van tabel 3.6. Het is mogelijk dat de berekening in het Gasunie uitgaat van een isolatie besparing die lager is dan 75%.

Het TKI reserveert een veel lagere hoeveelheid waterstof, 100 PJ, voor LTW in de gebouwde omgeving. Het TKI heeft deze vraag echter berekend door de daling in de gasvraag vanuit de NEV door te trekken tot 2050, en nog een extra "50% besparing voor de gedachtevorm" toe te passen. Hiertegenover staat het onderzoek van Energie Klimaat Ruimte, dat volledig heeft onderzocht wat de maximaal toepasbare besparingstechnieken zijn voor de huidige woningvoorraad en utiliteiten. Wegens de sterke onderbouwing van EKR gebruik dit onderzoek voor de verdere berekeningen de resultaten van Tabel 3.6.

CE Delft voorspelt een waterstofgebruik van 438 PJ voor de totale LTW vraag. Hieronder valt naast de LTW vraag van de Gebouwde Omgeving ook de vraag van de Industrie en Land & Tuinbouw. De totale warmtevraag volgens CE Delft, voor zowel LTW als HTW, is 561 PJ. Deze waarde komt overeen met de totale warmtevraag volgens de Gasunie, die 575 PJ bedraagt.

3.2.5 De totale waterstofvraag

Tabel 3.8 geeft de optelsom van de waterstofvraag uit alle sectoren. Dit onderzoek heeft voor alle scenario's eenzelfde waterstofvraag voor de sectoren industrie, landbouw & Tuinbouw en transport berekend. De scenario's Huidig Tempo en Versnelling gaan uit van een uitvoering van 75% van de besparingspotentie binnen de gebouwde omgeving, terwijl het maximale scenario uitgaat van een 100% besparingspotentie, wat resulteert in een lagere waterstofvraag. Optellen geeft een totale waterstofvraag van **1819 PJ** (scenario Maximaal) en **1848 PJ** (scenario Huidig Tempo en Versnelling).

Tabel 3.8 Berekening van de totale waterstofvraag

Industrie (PJ)			
Warmte (LTW + HTW)		240	
Koolstof		280	
Ammoniak		60	
Staal		20	
Land & Tuinbouw (PJ)			
		100	
Transport (PJ)			
Commercieel		130	
Zwaar		700	
Scenario	Scenario Huidig Tempo	Scenario Versnelling	Scenario Maximaal
Gebouwde omgeving (PJ)	318	318	289
Totale waterstofvraag (PJ)	1848	1848	1819

3.3 Verdeling van de potentiële groene waterstofproductie binnen Nederland

Wanneer de vraag naar waterstof in 2050 met de potentiële binnenlandse groene waterstofproductie wordt vergeleken, laat tabel 3.9 zien dat er voor elk scenario een waterstoftekort is voor de totale lage temperatuurwarmte (LTW) vraag.

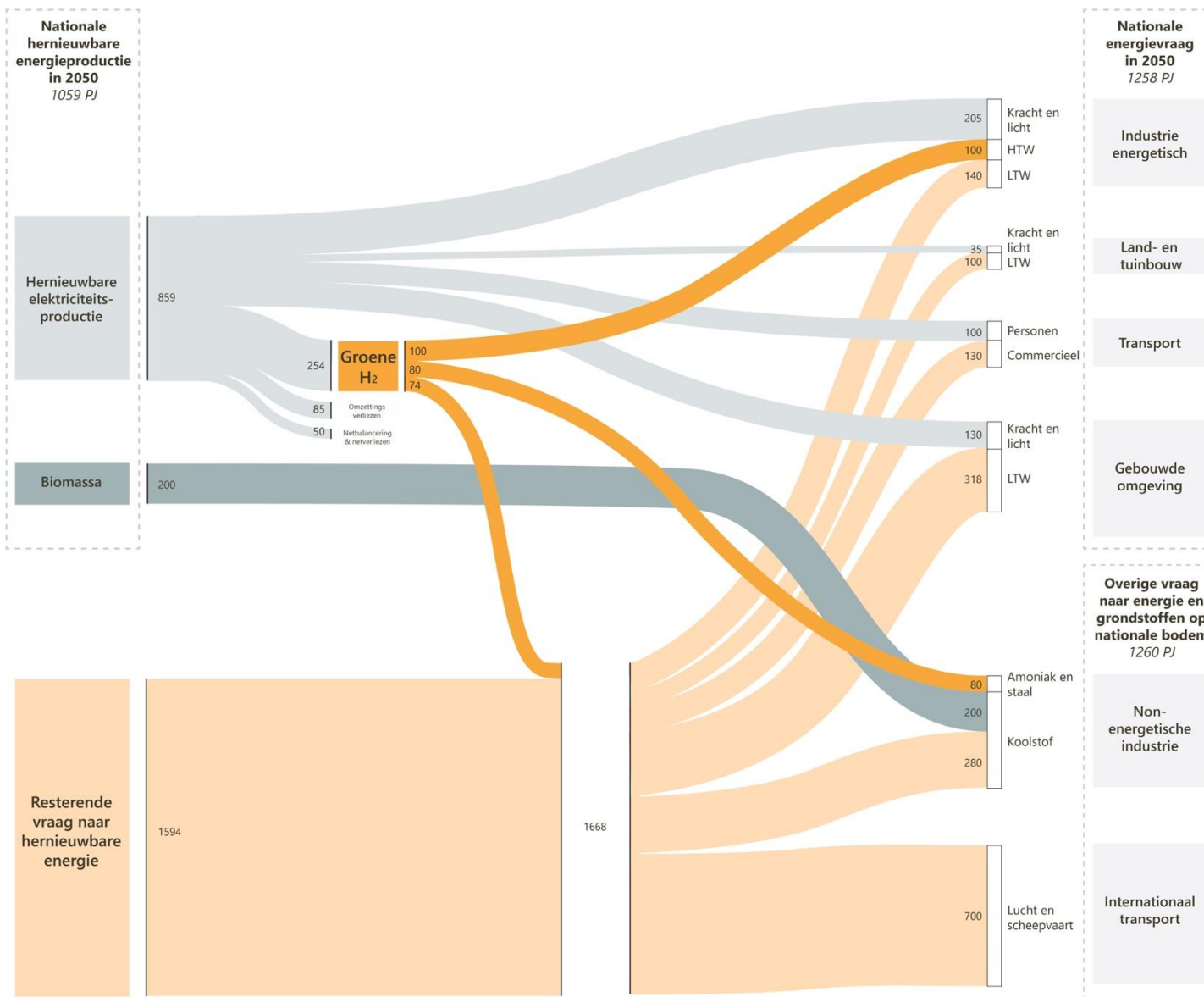
In het *scenario Huidig Tempo* wordt voldoende waterstof geproduceerd om aan de directe waterstofvraag vanuit de industrie voor ammoniak en staalproductie te voldoen, maar onvoldoende om aan de HTW vraag in de industrie te voldoen. In het *scenario Versnelling* kan wel voldoende waterstof geproduceerd worden voor de directe industrievraag en de HTW-vraag vanuit de industrie. Daarna is er echter onvoldoende waterstof over om aan de LTW vraag vanuit de gebouwde omgeving te voldoen, zowel als de overige LTW vraag vanuit land & tuinbouw en de industrie en zeker voor de vraag vanuit commercieel en internationaal transport. Alleen in *scenario Maximaal* kan wel voldoende groene waterstof geproduceerd worden voor de LTW vraag vanuit de gebouwde omgeving. Voor de overige LTW vraag is er echter onvoldoende potentieel, evenals voor de grote vraag vanuit zwaar en internationaal transport.

Tabel 3.9 Vergelijking van vraag en aanbod: berekening van het waterstof tekort

Scenario	Scenario Huidig Tempo	Scenario Versnelling	Scenario Maximaal
Waterstofpotentieel (PJ)	107	254	694
Na verbruik voor staal en ammoniak (PJ)	27	174	614
Na verbruik voor HTW industrie (PJ)	tekort	74	514
Na verbruik voor LTW in de Gebouwde omgeving (PJ)	tekort	tekort	225
Na verbruik voor de overige LTW vraag (PJ)	tekort	tekort	tekort
Resterende waterstofvraag non-energetisch en transport (PJ)	1742	1594	1226

Voor elk scenario is een Sankey diagram gemaakt om een beter inzicht te krijgen in de verdeling van de binnenlandse Hernieuwbare Elektriciteitsproductie, biomassaproductie en de resterende waterstofvraag. Figuur 4.1 geeft het Sankey diagram van het scenario Versnelling.





Figuur 4.1 Sankey diagram van het scenario Versnelling



4 CONCLUSIE

Wat is het Nederlands productiepotentieel van groene waterstof in 2050?

De onderzoeksvraag van dit rapport is tweeledig. Allereerst is antwoord gegeven op de vraag “wat is het Nederlandse productiepotentieel van groene waterstof in 2050?”.

De conclusie is dat op basis van de trend weergegeven door vastgestelde beleidsplannen van de NEV in 2017 er onvoldoende hernieuwbare elektriciteit wordt geproduceerd om aan de Finale Elektriciteitsvraag te voldoen.

Wanneer in de trend voorgestelde beleidsplannen (*scenario Huidig Tempo*) en potentieel nieuwe beleidsplannen (scenario's *Versnelling* en *Maximaal*) mee worden genomen in de raming van de hernieuwbare elektriciteitsproductie, is sprake van een overschot waarmee groene waterstof kan worden geproduceerd.

Het scenario *Huidig Tempo* gaat uit van een trend in hernieuwbare elektriciteitsproductie en energiebesparing die gebaseerd is op vastgestelde én voorgestelde beleidsplannen uit de NEV2017. In dit scenario zal er een overschot in hernieuwbare elektriciteit geproduceerd worden, waarmee 107 PJ waterstof kan worden gemaakt.

Nog meer waterstof kan worden geproduceerd wanneer wordt uitgegaan van een versnelling van de trend uit *scenario Huidig Tempo*. In dit scenario wordt gekeken naar een realistische benutting van het potentieel aan hernieuwbare elektriciteitsproductie, en kan 254 PJ worden geproduceerd in 2050.

De bovengrens van de berekende waterstofproductie wordt gegeven door het maximale scenario. Hierbij wordt maximaal gebruik gemaakt van het potentieel aan hernieuwbare elektriciteitsproductie, wat resulteert in een waterstofproductie van 694 PJ.

Het Nederlands productiepotentieel van waterstof in 2050 is dus **107 – 694 PJ**.

Is dit voldoende voor een nationaal waterstofnet voor de gebouwde omgeving?

Aangezien geen groene waterstof geproduceerd kan worden wanneer uitgegaan wordt van de trend op basis van vastgestelde beleidsplannen (NEV2017), kan daarbij de gebouwde omgeving ook niet van binnenlandse waterstof worden voorzien.

In het *scenario Huidig Tempo* zal alle geproduceerde waterstof naar de verduurzaming van de industrie gaan (ammoniakproductie, staalindustrie en hoge temperatuurwarmte). Wederom is onvoldoende waterstof over voor de gebouwde omgeving.

Het *scenario Versnelling* heeft, nadat de primaire vraag vanuit de industrie is voorzien (ammoniakproductie, staalproductie en hoge temperatuurwarmte), 74 PJ over. De totale warmtevraag vanuit de gebouwde omgeving, op basis van 75% besparing, is in dit scenario 450 PJ. In het scenario *versnelling* kan dus onvoldoende waterstof geproduceerd worden voor de gebouwde omgeving.

Tot slot is er het *scenario Maximaal*. Na de primaire vraag vanuit de industrie blijft 514 PJ over, voldoende om de warmtevraag van de gebouwde omgeving (390 PJ uitgaande van 100% besparing) te voorzien. Wel zal er een tekort zijn van 15 PJ om ook de lage temperatuurwarmte (LTW) vraag vanuit de industrie en land & tuinbouw te beantwoorden. Ook zal de overgebleven vraag van de non-energetische industrie (280 PJ) en commerciële (130 PJ) als zware transport (700 PJ) volledig afhankelijk zijn van import

Wat is het Nederlands productiepotentieel van groene waterstof in 2050, en is dit voldoende voor een nationaal waterstofnet voor de gebouwde omgeving?

Uit dit onderzoek kan worden geconcludeerd dat er geen realistisch scenario is waarin Nederland in 2050 voldoende groene waterstof kan produceren voor een nationaal waterstofnet voor de gebouwde omgeving. Alleen wanneer alle beschikbare ruimte wordt ingezet voor de productie van hernieuwbare elektriciteit (scenario Maximaal) én inzet van waterstof in de gebouwde omgeving voorkeur krijgt boven inzet voor lage temperatuurwarmte in de industrie, land- en tuinbouw, inzet voor non-energetische toepassingen in de chemie en inzet voor commercieel en internationaal transport, is een nationaal waterstofnet mogelijk.



5 DISCUSSIE

Internationale groene waterstofhandel

Dat Nederland onvoldoende groene waterstof kan produceren, betekent niet noodzakelijkerwijs dat een nationaal waterstofnet niet mogelijk is. In toekomstbeelden van onderzoekers wordt ingezet op een internationale groene waterstofmarkt. Landen met een groter oppervlak en gunstigere positie (de Sahara, Noorwegen aan zee) kunnen in theorie grootschalig hernieuwbare elektriciteit opwekken en waterstof produceren. Dit overschot van waterstof kan een internationale handel tot gevolg hebben, waardoor Nederland niet meer afhankelijk is van binnenlandse waterstofproductie. Niet gek, vooral aangezien Nederland ook op dit moment energie importeert. Olie komt binnen via schepen en aardgas wordt verhandeld via gasleidingen die over de grens gaan.

Toch is het grootschalig importeren van waterstof niet zo voor de hand liggend als het lijkt. Zoals de Sankey diagram laat zien, ligt de benodigde waterstofimport tussen de 1226-1874 PJ. Momenteel worden zo'n 1100 PJ olie en 400 PJ kolen netto geïmporteerd [16]. Omdat waterstof een lagere energetische dichtheid heeft dan fossiele brandstoffen, zal het onder hoge druk vervoerd moeten worden. Om met deze risico's om te gaan zal de huidige import infrastructuur dus geheel omgezet en aangepast moeten worden naar een infrastructuur die is ingesteld op waterstof. Hiervoor zullen grote investeringen nodig zijn, bovenop de investeringen van het omzetten van het gasnet en de binnenlandse hernieuwbare elektriciteitsproductie. Deze investeringen, gecombineerd met de verwachting dat vóór 2050 de internationale waterstofmarkt op gang is gekomen, maken de inzet op een volledig waterstofnet voor de gebouwde omgeving een risicovolle keuze. Vooral omdat bij een dergelijke keuze de ontwikkeling en uitrol van bestaande technologie in de gebouwde omgeving, zoals warmtepompen warmtenetten ernstig vertraagd kan worden of stil kan komen te liggen.

Het lijkt dus onverantwoord om volledig in te zetten op één oplossing om de volledige Nederlandse energievraag in de gebouwde omgeving te voorzien. Logischer is een lokale aanpak waar op wijkniveau wordt gekeken naar de beste verduurzamingsstrategie. Waterstof kan dan lokaal worden ingezet waar andere mogelijkheden tekort schieten. Te denken valt aan het platteland en oude dorps- en stadskernen. Bijvoorbeeld voor het oude stadscentrum van Amsterdam zou waterstof een oplossing kunnen bieden.

Besparingen

De non-energetische industrie eist een groot deel van de energie op. Alle beschikbare biomassa wordt voor de non-energetische industrie gereserveerd, waarbij nog een waterstofvraag van 280 PJ overblijft na het voorzien van de ammoniak en staalindustrie. In een duurzaam toekomstbeeld wordt ook uitgegaan van een circulaire samenleving: met intensiever recyclen en het beter ontwerpen van koolstofrijke producten kan de vraag naar biomassa en waterstof sterk worden verlaagd. Dit vraagt wel grove veranderingen. Voor intensiever recyclen zijn grootschalige aanpassingen nodig van de huidige infrastructuur, industrie en de gewoontes van consumenten. Naast dat deze besparingen uitgevoerd moeten worden, zal ook de vraag naar koolstofrijke moleculen stijgen met een groeiende wereldeconomie. Wel is zeker dat er op dit moment nog weinig alternatieven voor de non-energetische industrie zijn naast biomassa, en dat zelfs die overstap nog een grote uitdaging vormt. Processen om van biomassa de juiste koolstofmoleculen te maken voor de industrie moeten nog ontwikkeld worden en zullen niet een rendement van 100% opleveren, wat tot een hogere uiteindelijke vraag naar biomassa zal leiden. Het andere alternatief, CO₂ opvangen met waterstof, moet nog vanuit de lab-schaal doorontwikkeld worden.

6 BIJLAGEN

Dit hoofdstuk bevat de bijlagen van het onderzoek



6.1 BIJLAGE A

Tabel 6.1 Totaaloverzicht hernieuwbare elektriciteitsproductie Nederland

Bron	BASELINE 2016		2050*											
	MonitWeb		MonitWeb ¹				GASUNIE		ERK				CE Delft	
	V		V		VV		A		D		E		S2	
Eenheid	GW	PJ	GW	PJ	GW	PJ	GW	PJ	GW	PJ	GW	PJ	GW	PJ
Wind	4	35	19	224	31	414	65	545	42	564	76	960	67	1014
Op zee							55		36	500	54	750	53	
Op land							10		1	14	17	160	14	
Repowering									5	50	5	50		
Zon (PV)	2	6	26	80	35	113	66	244	97	295	162	485	34	121
Daken									30	90	50	150		
Zonneweiden									20	60	45	135		
Verzilde agrarische grond									16	50	30	85		
Langs infrastructuur overheid									9	25	15	45		
Binnenwateren									22	70	22	70		
Totaal hernieuwbare elektriciteitsproductie	6	41	45	305	66	530	131	789	139	859	238	1445	101	1135

¹ Prognose door lineaire trend door te trekken van MONITweb data 2017 - 2035

* Zowel het vermogen (GW) als jaarlijkse elektriciteit opbrengst (PJ) zijn overgenomen uit de genoemde bronnen

V = vastgesteld beleid

VV = voorgenomen vastgesteld beleid

X = minimum bandbreedte, minimaal 1000m van bebouwing

Y = maximum bandbreedte, minimaal 500m van bebouwing

S2 = Scenario 2, nationaal

6.2 BIJLAGE B

Tabel 6.2 Totaaloverzicht potentiële groene waterstofproductie in 2050

Scenario	2016	2050			
		NEV2017 V	Scenario huidig tempo	Scenario versnelling	Scenario maximaal
1. Hernieuwbare Elektriciteitsproductie (PJ)	41	305	530	859	1445
2. Finaal Elektriciteitsverbruik (PJ)	363	361	351	470	470
3. Netverliezen & Netbalancing (PJ)	38	38	37	50	50
4. Overschot Hernieuwbare Elektriciteitsproductie (PJ)	-360	-94	142	339	925
5. Potentiele groene waterstofproductie (PJ)	0	0	107	254	694

6.3 BIJLAGE C

Deze bijlage bevat de berekening van de waterstofvraag voor Lage Temperatuur Warmte (LTW) in de gebouwde omgeving in 2050.

Allereerst is gekeken naar de besparingspotentie door middel van het rapport Energie Klimaat Ruimte [5]. Tabel 6.3 geeft de besparingspotentie voor woningen. Dit rapport heeft het besparingspotentie gebruikt *zonder* warmtepomp. Tabel 6.4 geeft het gasgebruik en de besparingen van woningen bij 75% en 100% uitvoering van besparingen. Het totaal berekende gasgebruik van woningen in 2015 (Tabel 6.4) komt overeen met de berekeningen van de NEV2017, namelijk 289 PJ aardgas in 2015 [4].

Tabel 6.3 Besparingspotentie woningvoorraad Nederland (%)

	Besparings potentie op gasverbruik	Besparingspotentie zonder warmtepomp ¹
Woningen voor 1964	20%	20%
Woningen 1946 tot 1991 (<65 m2)	44%	44%
Woningen 1946 tot 1991 (>65 m2)	70%	44%
Woningen vanaf 1991	0%	0%
TOTAAL	41%	29%

¹In het rapport EKR is aangenomen dat woningen van 1946-1991 met een oppervlak van > 65 m2 geschikt zijn voor een warmtepomp. Dit rapport neemt aan dat eenzelfde besparing door middel van isolatie bewerkstelligd kan worden zonder warmtepomp als de besparingspotentie van woningen uit 1946 tot 1991 met een oppervlak van <65 m2

Tabel 6.4 Besparingspotentie woningvoorraad Nederland (PJ)

	Gebruik 2015 Gas (PJ)	Gebruik na besparing gas (PJ)	Besparings potentie op gasgebruik (PJ)
Woningen voor 1964	61.9	49.6	12.3
Woningen 1946 tot 1991 (<65 m2)	11.7	6.5	5.2
Woningen 1946 tot 1991 (>65 m2)	140.5	42.7	61.8
Woningen vanaf 1991	64.8	64.4	0.4
TOTAAL	278.9	199.18	79.72

Het rapport EKR heeft een aparte berekening gemaakt voor het aardgasgebruik door utiliteiten. Deze berekening komt uit op een totaal gasgebruik van **351.6 PJ**. Dit is aanzienlijk hoger dan wat de NEV2017 heeft gepubliceerd, namelijk **127 PJ**. Omdat deze waarden zo verschillen, namelijk meer dan 200 PJ, heeft dit rapport niet de berekening voor utiliteitsbesparingen van het ERK meegenomen. Om toch een inschatting van de besparingspotentie te maken, heeft het rapport aangenomen dat de gemiddelde besparing van **29%** van woningen door isolatie ook gerealiseerd kan worden voor utiliteiten. Tabel 6.5 geeft een overzicht van de besparingspotentie voor utiliteiten voor 75% en 100% realisatie van de besparingspotentie.

Tabel 6.5 Besparingspotentie Nederlandse utiliteiten

	Gasverbruik 2015	Besparingspotentie gas (PJ)	100% besparing	75% besparing
Utiliteit ¹	127	37	90	99

¹ Op basis van de NEV2017



7 FIGUREN EN TABELLEN

Figuur 2.1 Berekening van de potentiële binnenlandse groene waterstofproductie	6
Figuur 2.2 Berekening van de totale waterstofvraag	11
Figuur 2.3 Verdeling van de binnenlandse groene waterstofproductie binnen de totale waterstofvraag op basis van prioriteit.....	14
Figuur 4.1 Sankey diagram van het scenario Versnelling	23

Tabel 2.1 Aannames voor de berekening van de Nederlandse potentiële groene waterstofproductie in 2050.....	6
Tabel 2.2 Netbalancerings waarden.....	7
Tabel 2.3 Geïnstalleerde hernieuwbare elektriciteitsproductie in 2050 volgens het Scenario versnelling	9
Tabel 2.4 Geïnstalleerde hernieuwbare elektriciteitsproductie in 2050 volgens het Scenario maximaal	10
Tabel 3.1 Prognose van de totale Nederlandse hernieuwbare elektriciteitsproductie in 2050.....	15
Tabel 3.2 Prognose van het finale elektriciteitsverbruik per sector in 2050.....	16
Tabel 3.3 Netverliezen & Netbalancerings	16
Tabel 3.4 De potentiële groene waterstofproductie in 2050.....	17
Tabel 3.5 Waterstof voor warmte	17
Tabel 3.6 Gasverbruik gebouwde omgeving ^[5]	19
Tabel 3.7 Waterstofgebruik gebouwde omgeving 2050.....	19
Tabel 3.8 Berekening van de totale waterstofvraag	20
Tabel 3.9 Vergelijking van vraag en aanbod: berekening van het waterstof tekort.....	21
Tabel 6.1 Totaaloverzicht hernieuwbare elektriciteitsproductie Nederland.....	28
Tabel 6.2 Totaaloverzicht potentiële groene waterstofproductie in 2050	29
Tabel 6.3 Besparingspotentie woningvoorraad Nederland (%).....	30
Tabel 6.4 Besparingspotentie woningvoorraad Nederland (PJ)	30
Tabel 6.5 Besparingspotentie Nederlandse utiliteiten	31



BRONVERMELDING

1. T. Mathijssen, I.G., P-S. Smoor, *De positie van waterstof in de energietransitie*. 2018, OverMorgen.
2. Hermkens, R.J., S.; Laan, van der M.; Laat, de H.; Pilzer, B.; Pulles, K., *Toekomstbestendige gasdistributienetten*, E.M. Polman, T., Editor. 2018, In opdracht van Netbeheer Nederland.
3. *Hoeveel biomassa kan er voor Nederland zijn in 2050?* 2018 [cited 2019 15-01-2019].
4. (ECN), E.C.N., *Nationale Energieverkenning 2017*. 2017.
5. *Ruimtelijke Verkenning Energie en Klimaat*. 2018, Posad spatial strategies, General Energy, H+N+S landschapsarchitecten, FABRICations, Studio Marco Vermeulen, NRG LAB, RUIIMTEVOLK, Universiteit Wageningen.
6. *Factsheet Kwaliteit 2016*, in *Regionale Netbeheerders Elektriciteitsnetten & Gastransportnetten*. Autoriteit Consument & Markt (ACM).
7. Sinn, H.W., *Buffering volatility: A study on the limits of Germany's energy revolution*. European Economic Review, 2017. **99**: p. 130-150.
8. Zerrahn, A., W.P. Schill, and C. Kemfert, *On the economics of electrical storage for variable renewable energy sources*. European Economic Review, 2018. **108**: p. 259-279.
9. Koster, R., *Nederland haalt CO2-doelstelling bij lange na niet*, in NOS. 2018: Nederland.
10. *Hernieuwbare elektriciteit; productie en vermogen*. 2018, Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS).
11. Gasunie, *Verkenning 2050*. 2018.
12. Maarten Afman, F.R., *Net voor de Toekomst*. 2017, CE Delft: Delft.
13. Jörg Gigler, M.W., *Contouren van een Routekaart Waterstof*. 2018, TKI NIEUW GAS.
14. Roelofsen, O.P., A.; Speelman, E.; Witteveen, M., in *Energy transition: mission (im)possible for industry?* 2017, McKinsey&Company.
15. Hoogma, R.J.F., *Overzicht van Nederlandse waterstofinitiatieven, - plannen en - toepassingen*. 2017, Dwarsverband, TKI GAS.
16. (EBN), E.B.N., *EBN infographic 2018*. 2018.
17. CBS. *Energieverbruik door de industrie, 2011-2016*. 2018 [cited 2018; Available from: <https://www.clo.nl/indicatoren/nl0017-energieverbruik-door-de-industrie>].