

2020



Waterstof, van ambitie naar praktijk

ONDERZOEKSRAPPORT LIVING LAB ASSET MANAGEMENT: DECISION MAKING UNDER
UNCERTAINTY AT THE PORT OF ROTTERDAM

10-12-2020



Waterstof, van ambitie naar praktijk

DIGITALE PUBLICATIE:

[Klik hier voor het bekijken van de online story map over het project](#)

(<https://arcg.is/1GL4mv>)

Opdrachtgever: Martine van den Boomen
m.van.den.boomen@hr.nl
Hogeschool Rotterdam

Peter Blommaart
p.j.l.blommaart@hr.nl
Hogeschool Rotterdam

Auteurs: Jonathan van Ekris
ekri0001@hz.nl
Hogeschool Zeeland

Sjoerd van der Meulen
meul0081@hz.nl
Hogeschool Zeeland

Janwim Mulder
muld0052@hz.nl
Hogeschool Zeeland

Roel Spanjers
span0004@hz.nl
Hogeschool Zeeland

Olle ten Voorde
voor0052@hz.nl
Hogeschool Zeeland

Begeleiders: Martine van den Boomen
m.van.den.boomen@hr.nl
Hogeschool Rotterdam

Peter Blommaart
p.j.l.blommaart@hr.nl
Hogeschool Rotterdam

DATUM: 10-12-2020
VERSIE: Definitief

Voorwoord

Voor u ligt het rapport “Waterstof, van ambitie naar praktijk”. In dit rapport heeft de projectgroep onderzoek gedaan naar hoe de waterstoftransitie kabels en leidingen in de Rotterdamse haven beïnvloed. De projectgroep bestaat uit studenten van de master River Delta Development, een joint degree tussen de hogescholen Zeeland, Van Hall Larenstein en Rotterdam. De studenten hebben verschillende bachelor studies gevolgd en hebben daardoor verschillende achtergronden.

De projectgroep wil graag Martine van den Boomen en Peter Blommaart bedanken voor de begeleiding tijdens dit project. Ook willen wij graag de volgende geïnterviewde personen bedanken voor hun input:

- Sjaak Verburg (Havenbedrijf Rotterdam)
- Sjaak Poppe (Porthos)
- Diederik Kuipers (Deltalinqs)
- Hans Warmenhoven (Energie Beheer Nederland)
- Anouk Van den Berg (Gasunie)
- Jan van Pijkeren (Waterstof ambassadeur)
- Thomas Lensvelt (Shell)

Wij wensen u veel leesplezier toe.

Janwim Mulder, Jonathan van Ekris, Olle ten Voorde, Sjoerd van der Meulen en Roel Spanjers

Samenvatting

Voor u ligt het rapport “Waterstof, van ambitie naar praktijk” dat namens het living lab Asset Management in the Port of Rotterdam vanuit de Hogeschool Rotterdam is uitgevoerd. De titel van de opdracht luidt “Decision making under uncertainties” en gaat in op de onzekerheid binnen de Rotterdamse haven over het beheer van de fysieke assets met het oog op de transitie welke momenteel plaats vinden. In dit rapport is onderzocht hoe buisleidingen in de haven van Rotterdam geoptimaliseerd kunnen worden om te kunnen voldoen aan de ambitie van de haven op het gebied van waterstof in 2050. De hoofdvraag die dit project beoogd te beantwoorden is:

Volgens welke adaptieve strategie kan een distributienetwerk gerealiseerd worden om de ambities voor 2050 op het gebied van waterstof van de haven van Rotterdam te faciliteren?

Allereerst is onderzocht welke trends impact hebben op de waterstoftransitie. Afgevraagd kan worden wanneer waterstof als volwaardig energiealternatief kan dienen. Dit is afhankelijk van de prijs van waterstof en het concurrentievermogen met bestaande energiebronnen. Perspectief voor het toepassen van waterstof is momenteel vooral in de industrie te vinden maar ook op andere domeinen liggen grote kansen voor waterstof. Schattingen van de toekomstige waterstofvraag zijn zeer onzeker en afhankelijk van het succes van technologische innovaties.

Om te achterhalen hoeveel waterstof door een distributienetwerk in de Rotterdamse haven moet worden getransporteerd zijn scenario's opgesteld aan de hand van de kruis-impact analyse. Hierbij zijn bestaande scenario's voor de benodigde waterstof in de Rotterdamse haven gekoppeld aan hoeveelheden waterstof welke door de haven getransporteerd moeten worden. Uiteindelijk zijn vier scenario's tot stand gekomen: het minimale scenario A0 (0,5 Mt/jaar wordt in 2050 door Rotterdam vervoerd), het minimale scenario A1 (4,761 Mt/jaar wordt in 2050 door Rotterdam vervoerd), het middelste scenario B2 (11,716 Mt/jaar wordt in 2050 door Rotterdam vervoerd) en het maximale scenario C3 (21,05 Mt/jaar wordt in 2050 door Rotterdam vervoerd).

Om tot een adaptieve strategie te komen, is het nodig om het huidige netwerk te analyseren en te kijken naar mogelijkheden waarmee dit netwerk de waterstoftransitie kan faciliteren. Na een analyse van het netwerk blijkt dat twee netwerken al aanwezig zijn in de haven: (1) het Air liquide netwerk welke vanuit Rotterdam naar Frankrijk loopt en een relatieve kleine transportcapaciteit heeft en (2) het Air Products netwerk wat een kleinere omvang heeft. Beide blijken niet geschikt om de hoeveelheid waterstof in de toekomst te gaan vervoeren en de focus is verlegd naar het aanpassen van het huidige aardgasnetwerk of het aanleggen van een nieuw netwerk.

Als vervolg hierop is onderzocht hoe het bestaande gasnetwerk kan worden omgevormd voor gebruik binnen de waterstoftransitie of hoe een nieuw netwerk dient te worden aangelegd. Om te achterhalen wat de meest haalbare wijze is voor het realiseren van een waterstofdistributienetwerk, is gebruik gemaakt van een beslisboom. Het meest rendabele pad gaat over het realiseren van twee pijpleidingen van 70 kilometer lang waarvan één pijpleiding een inwendige diameter heeft van 16 inch en één pijpleiding een inwendige diameter heeft van 36 inch met een bijbehorende compressor capaciteit van 281 MW. Voor het aanpassen van het bestaand netwerk kan na 2030 eventueel gebruik gemaakt worden van de 36 inch aardgaspijpleiding. Voor beide situaties is hetzelfde pad het meest economisch rendabel en dus de meest haalbare wijze voor het realiseren van een waterstofdistributienetwerk. Verder biedt het de mogelijkheid om gebruik te maken van een

bestaande aardgaspijpleiding wat gunstig kan zijn in de praktijk. Dit meest rendabele pad is getrokken vanuit de huidige beschikbare informatie en geeft daarom geen inzicht in mogelijke veranderingen gedurende de transitie, hiervoor is een adaptieve strategie opgesteld.

Als laatste is de adaptieve strategie uitgewerkt. Dit is gedaan door het uitvoeren van een sensitiviteitsanalyse op de beslisboom waardoor alternatieve routes in kaart werden gebracht. Hierna zijn mogelijke toekomstige ontwikkelingen (contingency planning) geschetst die van grote invloed kunnen zijn op de uitrol van het waterstofnetwerk. De sensitiviteitsanalyse tezamen met de contingency planning vormden de input voor het dynamische adaptieve plan. Er is een route met stapsgewijze acties per tijdshorizon gecreëerd rekening houdend met de onomkeerbaarheid van het aanleggen van de waterstofinfrastructuur. Tot slot is er advies gegeven over de vorming van een H₂-consortium waarin de Gasunie de lead heeft en wordt ondersteund door publieke, private en financiële instanties om de kans op een voorspoedige uitrol te vergewissen.

Summary

In front of you lays the report “Waterstof, van ambitie naar praktijk” (English: Hydrogen, from ambition to practise) which is being made in behalf of the living lab Asset Management in the Port of Rotterdam. The title of the assignment is “Decision making under uncertainties” and is regarding uncertainties within the Port of Rotterdam concerning the management of physical assets in the context of the hydrogen transition. In this report, research is conducted on how pipelines in the Port of Rotterdam can be optimised to meet the ambition of the port for the hydrogen transition in 2050. The main research question this project intends to answer is:

According to which adaptive strategy can a distribution network be realised to meet the ambitions for the hydrogen transition in the Port of Rotterdam in 2050?

The first research question is addressing hydrogen trends that are impacting the hydrogen transition. It is uncertain when hydrogen can serve as a full-fledged energy alternative. This depends on the price of hydrogen and its competitiveness with existing energy sources. The main emphasis for the use of hydrogen is currently in industrial applications. Estimates of future hydrogen demand are very uncertain and are depended upon the success of technological innovations. Besides the industry, hydrogen has a lot of potential to contribute to decarbonisation due to its versatility throughout the energy system.

To find out how much hydrogen must be transported through a distribution network in the Port of Rotterdam, scenarios have been drawn up based on the cross-impact analysis. Existing scenarios for the required hydrogen in the Port of Rotterdam are linked to quantities of hydrogen that must be transported through the port. Four scenarios were developed: the minimum scenario A0 (0,5 Mt/year will be transported through Rotterdam in 2050), the minimum scenario A1 (4,671 Mt/year will be transported through Rotterdam in 2050), the middle scenario B2 (11,716 Mt/year will be transported through Rotterdam in 2050) and the maximum scenario C3 (21,05 Mt/year will be transported through Rotterdam in 2050).

To come up with an adaptive strategy, it is necessary to analyse the current network and look for possibilities in which the current network can offer assistance in transporting the required capacities. After an analysis of the network, it appears that two networks are already present in the port: (1) the Air liquid network which goes from Rotterdam to France and has a relatively small transport capacity and (2) the Air Products network which is smaller in size. Both are deemed unsuitable to transport the amount of hydrogen. The focus has shifted from adapting the current natural gas network to constructing a new hydrogen network from scratch.

As a follow-up to this, it was researched how a new hydrogen grid could be deployed or how the existing natural gas grid can be converted to accommodate the transportation of hydrogen. To find out what the most feasible way is to realise a hydrogen distribution network, a decision tree was used. The most cost-effective path involves the realisation of two pipelines of 70 kilometres in length, one of which has a diameter of 16 inches and one pipeline has a diameter of 36 inches with a viable way to realize a hydrogen distribution network. However, the most economically viable way doesn't align with practicalities and optionality therefore a sensitivity analysis was carried out to generate multiple paths that cope with possible future developments.

Finally, the adaptive strategy has been worked out. This was done by performing a sensitivity analysis on the decision tree through which alternative routes were mapped. Possible future developments (contingency planning) are outlined below that could have a major impact on the roll-out of the hydrogen network. The sensitivity analysis together with the contingency planning formed the input for the dynamic adaptive plan. A route with step-by-step actions per time horizon has been created, taking into account the irreversibility of the construction of the hydrogen infrastructure. Finally, the advice was given on the formation of an H2 consortium in which Gasunie has the lead and is supported by public, private and financial bodies to ascertain the likelihood of a successful rollout.

Afkortingen

Afkorting	Betekenis
CCU	Carbon Capture and Utilisation
CCS	Carbon Capture and Storage
CCSU	Carbon Capture Storage and Utilisation
DAPP	Dynamic Adaptive Policy Pathways
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicles
G-Gas	Groningen Gas
HTL	Hoofdtransport Leidingennet
H-Gas	Hoog Calorisch Gas
IRENA	International Renewable Energy Agency
L-GAS	Laag Calorisch Gas
LNG	Liquified Natural Gas
PE	Polyetheen
PV	Photovoltaic
PVC	Polyvinylchloride
RTL	Regionaal Transport Leidingennet
SNN	Samenwerkingsverband Noord-Nederland
SMR	Steam Methane Reforming

Inhoud

1	Inleiding.....	11
1.1	Achtergrond & scope.....	11
1.2	Probleembeschrijving.....	11
1.3	Onderzoeksdoel.....	12
1.4	Onderzoeksvragen.....	12
1.5	Leeswijzer.....	12
2	Theoretisch kader en onderzoeksmethoden.....	13
2.1	Theoretisch kader.....	13
2.1.1	Vormen van onzekerheid.....	13
2.1.2	Onzekerheidstheorieën.....	14
2.1.3	Gebruik van de reële opties theorie.....	15
2.2	Onderzoeksmethoden.....	16
3	Waterstoftrends.....	23
3.1	Kapitaal influx.....	23
3.2	Productie.....	23
3.2.1	Blauwe waterstof.....	24
3.2.2	Groene waterstof.....	24
3.2.3	Import van waterstof.....	26
3.3	Toepassingen.....	27
3.3.1	Waterstof in industriële processen.....	27
3.3.2	Waterstof in mobiliteit.....	27
3.3.3	Waterstof in de gebouwde omgeving.....	28
3.4	Beantwoording deelvraag 1.....	28
4	Scenario's.....	29
4.1	Waterstof benodigd voor industrie in de Rotterdamse haven.....	29
4.1.1	Keuze rapport.....	29
4.1.2	Keuze scenario's.....	31
4.2	Waterstof vervoerd door de Rotterdamse haven.....	33
4.3	Samenvoeging scenario's en verdere uitwerking.....	33
4.4	Beantwoording deelvraag 2.....	36
5	Bestaand distributienetwerk.....	37
5.1	Huidig waterstofnetwerk.....	37
5.2	Huidig aardgasnetwerk.....	38
5.2.1	Aardgasnetwerk Rotterdam.....	38

5.2.2	Hoofdtransportleidingnet.....	38
5.3	Beantwoording deelvraag 3.....	40
6	Waterstof in het energienetwerk.....	41
6.1	Transport van waterstof.....	41
6.1.1	Aanpassen bestaand aardgas netwerk.....	41
6.1.2	Aanleggen nieuw waterstofnetwerk.....	42
6.1.3	Compressie.....	42
6.1.4	Opslag.....	43
6.2	Parameters voor het ontwerp.....	44
6.2.1	Benodigde diameter pijpleiding.....	44
6.2.2	Benodigde compressor capaciteit.....	45
6.2.3	Implicaties voor het ontwerp.....	45
6.3	Voorkeursroute 2050.....	46
6.3.1	Definiëren van probabilityscores.....	47
6.3.2	Doorrekenen beslisboom nieuw waterstoftransportnetwerk.....	49
6.3.3	Doorrekenen beslisboom gebruik aardgasleiding.....	50
6.4	Beantwoording deelvraag 4.....	51
7	Implementatiestrategie.....	53
7.1	Mogelijke geprefereerde paden.....	53
7.2	Contingency planning.....	55
7.3	Het dynamisch adaptieve plan.....	57
7.4	Implementatie en monitoring van het dynamische adaptieve plan.....	59
7.5	Beantwoording deelvraag 5.....	60
8	Discussie.....	61
8.1	Validatie.....	61
8.2	Beperkingen.....	62
8.3	Implicatie.....	64
9	Conclusie.....	65
10	Aanbevelingen.....	68
	Bibliografie.....	69
	Bijlagen.....	76
	Bijlage 1 Netwerkanalyse.....	77
	Bijlage 2 Theorie opstellen scenario's.....	83
	Bijlage 3 Indicatoren toepasbaarheid scenario's "waterstof benodigd voor industrie in de Rotterdamse haven".....	85
	Bijlage 4 Inventarisatie rapporten "waterstof benodigd voor industrie in de Rotterdamse haven".....	86

Bijlage 5 Berekening benodigde hoeveelheid waterstof	88
Bijlage 6 Onderbouwing transport waterstof door de Rotterdamse haven in 2050.....	89
Bijlage 7 Berekeningen buisdiameter en compressor capaciteit.....	90
Bijlage 8 Afweging ontwerpparameters scenario's	91
Bijlage 9 Kostenoverzicht beslisboom	92
Bijlage 10 Uitwerking beslisboommethode.....	96
Bijlage 11 Schematische weergave alternatieven	126

1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de achtergrond & context, de probleembeschrijving, het onderzoeksdoel en de hoofd- en deelvragen besproken. Hiernaast is in dit hoofdstuk ook de leeswijzer opgenomen.

1.1 Achtergrond & scope

Nederland is in transitie. Uitdagingen zoals het veranderende klimaat en economisch zwaardere tijden vragen om fundamentele veranderingen van de wijze waarop Nederland leeft. Nederland geniet momenteel een hoge brede welvaart. Om dit niveau te kunnen behouden en vergroten zijn drie transitie van belang 1) de energietransitie, 2) de industriële transitie en 3) de transitie van de landbouw (biobased & circulair). Deze transities bieden kansen voor duurzame groei van de Nederlandse welvaart (Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, 2019). De drie transities tezamen vragen om herziening van de corresponderende infrastructurele netwerken.

Door de Rotterdamse haven is het potentieel niet bruikbaar zijn van infrastructuur geïdentificeerd als een van de grootste risico's voor de haven. Vanuit de opdrachtgever, voor dit onderzoek de Hogeschool Rotterdam, is daarom gevraagd een adaptieve lange termijnstrategie te ontwikkelen over hoe de infrastructuur in de Rotterdamse haven gemanaged en ontwikkeld kan worden. Vanwege de beperkte tijd en capaciteit die de projectgroep tot zijn beschikking heeft, is besloten om te focussen op één grote transitie en één type infrastructuur.

Als transitie is de energietransitie gekozen en dan in het bijzonder de waterstoftransitie. In het Klimaatakkoord is de afspraak gemaakt om de CO₂-uitstoot in 2030 met 49% en in 2050 met 95% te hebben gereduceerd t.o.v. 1990. De havenvisie van het Havenbedrijf Rotterdam volgt de doelen vanuit dit akkoord (Klimaatakkoord, 2019; Port of Rotterdam, 2019) en probeert hierdoor zijn CO₂-uitstoot te verminderen. Vanuit de haven wordt hierbij vooral op de waterstoftransitie ingezet. Deze transitie helpt de CO₂-uitstoot te verminderen en zorgt dat Rotterdam met de ontwikkeling van een waterstofnetwerk ook in de toekomst een belangrijke energiehaven blijft.

Als type infrastructuur is gekozen om binnen dit project te kijken naar buisleidingen. Hiervoor is gekozen omdat de Rotterdamse haven het transport binnen de haven en naar de rest van Noordwest-Europa vooral via buisleidingen in een distributienetwerk zal organiseren. Daarnaast heeft het vervoer van waterstof met buisleidingen duidelijk voordelen ten opzichte van het vervoer door middel van schepen (hogere leveringszekerheid en goedkoper). Hiermee blijken leidingen de meest essentiële infrastructuur voor de waterstoftransitie en wordt dit daarom uitgewerkt binnen dit onderzoek.

1.2 Probleembeschrijving

Het Rotterdamse Havenbedrijf werkt aan het realiseren van een grootschalig waterstofnetwerk in de Rotterdamse haven. Het streven is om van Rotterdam een internationaal knooppunt te maken voor gebruik, productie en import van waterstof. Gesteld wordt dat toekomstige waterstof producenten gekoppeld kunnen worden met afnemers binnen de haven (Port of Rotterdam, 2020). Het probleem is echter dat deze ingrepen zelf en de termijn voor deze ingrepen in de infrastructuur niet concreet vastgelegd zijn. Deze nieuw aan te leggen infrastructuur in de haven van Rotterdam zal naast de activiteiten in het havengebied ook van belang zijn om industrieclusters in het achterland te bedienen.

Er ontbreekt een concreet holistisch plan om de leidinginfrastructuur zo aan te passen dat er kan worden voldaan aan de gestelde waterstofambities. Hoewel ambities concreet en gedetailleerd uitgewerkt zijn missen, binnen de literatuur, in zijn algemeenheid concrete acties en verkenningen wat deze waterstoftransitie kwantitatief voor de haven kan betekenen. Vanuit het oogpunt van

assetmanagement is een leemte binnen de literatuur te ontdekken waar concreet wordt gesteld welke leidingen geoptimaliseerd moeten worden, op welke schaal dit moet en binnen welk tijdsbestek dit dient te gebeuren.

1.3 Onderzoeksdoel

Het doel van dit project is om te onderzoeken hoe buisleidingen in de haven van Rotterdam geoptimaliseerd kunnen worden om te kunnen voldoen aan de ambitie van de haven op het gebied van waterstof in 2050. Het streven is om dit samen te brengen in een adaptieve strategie.

1.4 Onderzoeksvragen

Dit onderzoek focust zich op het creëren van een adaptieve strategie omtrent de inpassing van de waterstoftransitie binnen de Rotterdamse haven. Het gaat binnen deze transitie over het toekomstbestendig maken van infrastructurele assets gerelateerd aan waterstof en op welke wijze dit mogelijk is. Met een tijdshorizon die vooruitkijkt naar 2050 is een adaptieve aanpak noodzakelijk zodat ingespeeld kan worden op veranderingen door de tijd heen. Om deze reden luidt de hoofdvraag die dit onderzoek beoogt te beantwoorden als volgt:

Volgens welke adaptieve strategie kan een distributienetwerk gerealiseerd worden om de ambities voor 2050 op het gebied van waterstof van de haven van Rotterdam te faciliteren?

Om deze hoofdvraag te beantwoorden moet onderzoek worden uitgevoerd naar verschillende aspecten. Hiervoor zijn deelvragen opgesteld om sturing te geven aan het onderzoeksproces voor het vergaren van informatie en inzichten. De deelvragen die beantwoord moeten worden om een antwoord te kunnen formuleren op de hoofdvraag luiden als volgt:

1. Welke trends hebben impact op de waterstoftransitie in de haven?
2. Welke scenario's met betrekking tot de waterstofambities in 2050 zijn toepasbaar op de haven?
3. Wat is de invloed van de waterstoftransitie op het bestaande distributienetwerk?
4. Op welke haalbare wijze kan een waterstofdistributienetwerk gerealiseerd worden?
5. Hoe kan de haven van Rotterdam op een adaptieve wijze een robuust waterstofdistributienetwerk realiseren?

1.5 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 worden allereerst het theoretische kader en onderzoeksmethoden geschetst waarop dit onderzoek berust. Hierna wordt in hoofdstuk 3 onderzocht welke trends invloed hebben op de waterstoftransitie en aan de hand hiervan zijn in hoofdstuk 4 scenario's voor de Rotterdamse haven geschetst.

In het daaropvolgende hoofdstuk 5 is gekeken naar bestaande infrastructuur in de haven. Hoofdstuk 6 geeft de technische mogelijkheden omtrent het aanpassen van het bestaande netwerk en het aanleggen van een nieuw transportnetwerk en wordt er bepaald welke opties er economische het meest voordelig zijn. Als eindresultaat is in hoofdstuk 7 een adaptatiestrategie beschreven.

2 Theoretisch kader en onderzoeksmethoden

In dit hoofdstuk wordt het theoretische kader weergegeven die als basis voor dit onderzoek dient. Verder worden er in dit hoofdstuk de onderzoeksmethoden beschreven.

2.1 Theoretisch kader

Het living lab assetmanagement: decision making under uncertainty in the port of Rotterdam focust op de omgang met een onzekere toekomst. In dit hoofdstuk is de theoretische verankering van het onderzoek beschreven. Ten eerste wordt onzekerheid gedefinieerd en onderverdeeld in twee categorieën van onzekerheid. Ten tweede worden drie theorieën beknopt toegelicht waaruit er één wordt gekozen als theoretische basis van het onderzoek. Tot slot wordt deze onzekerheidsmanagementtheorie toegespitst op de waterstofinfrastructuur in de Rotterdamse haven.

2.1.1 Vormen van onzekerheid

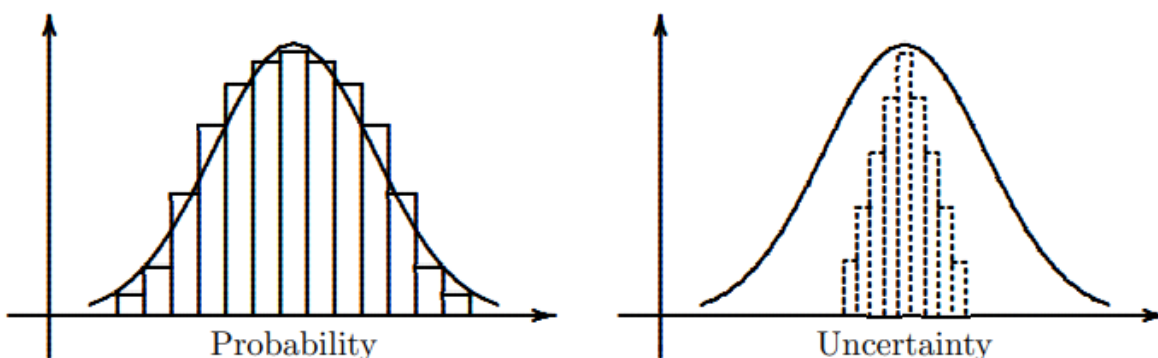
Onzekerheden waar de haven van Rotterdam mee te maken heeft zijn bijvoorbeeld: politiek, markt, bedrijvigheid en technologische innovaties (Taneja, Van Schuylenburg, & Ligteringen, 2008). Deze onzekerheden kunnen grote consequenties hebben op het assetmanagement in haven. Zo kunnen assets overbodig worden door laagconjunctuur of technologische innovaties.

Onzekerheid lijkt een evident begrip waar eenieder voeling mee heeft. Onzekerheid wordt als volgt gedefinieerd door Liu (i), en Taneja, Van Schuylenburg en Ligteringen (ii):

i) “Onzekerheid is alles wat kan worden gekwantificeerd door een onzekere meting (Liu, 2011)”.

ii) “Onzekerheden zijn gebeurtenissen die onbekend zijn, of onnauwkeurig bekend zijn (Taneja, Van Schuylenburg, & Ligteringen, 2008)”.

Onzekerheid dient niet verward te worden met probabiliteit (kans). Zie Figuur 1. Probabiliteit is gelinkt aan frequentie. Frequentie is het percentage van alle gebeurtenissen in een experiment. De frequentie verandert niet naarmate meer kennis over de gebeurtenissen wordt verworven. Met andere woorden frequentie is nagenoeg constant. Als er sprake is van onzekerheid, is er niet voldoende geobserveerde data beschikbaar om de frequentie te voorspellen. Deze onzekerheden zijn veelvoorkomend in de economie en techniek. Het managen van deze onzekerheden wordt vaak gedaan door beroep te doen op expert-judgements.

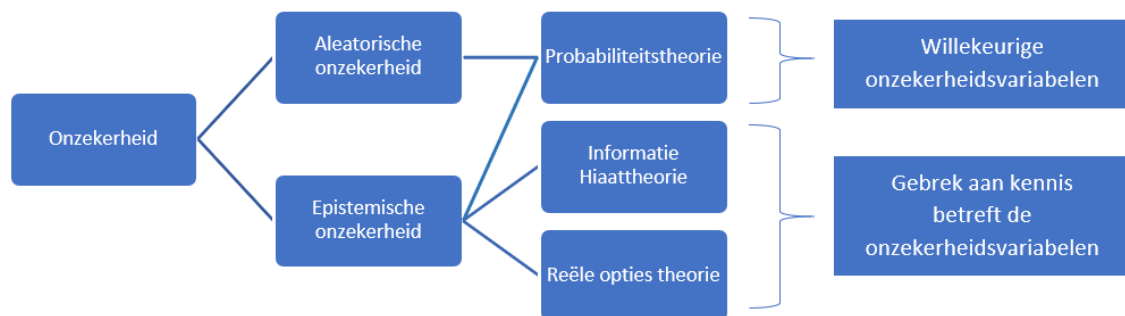


Figuur 1: Probabiliteit en onzekerheid geplot (Liu, 2011)

Onzekerheid kan worden uitgesplitst op aleatorische en epistemische onzekerheid. Aleatorische onzekerheid is onzekerheid ten gevolge van de evidente willekeur van de natuur (Li, Chen, & Feng, 2012), in andere woorden de onzekerheidsparameters zijn aselekt (van den Boomen, Spaan, Yue, & Wolfert, 2020). In de literatuur wordt deze vorm van onzekerheid ook wel aangeduid met natuurlijke variatie (National Research Council, 2000), objectieve onzekerheid (Natke & Ben-Haim, 1996), externe onzekerheid (Kahneman & Tversky, 1982) of willekeurige onzekerheid (Henrion & Fischhoff, 1986). Epistemische onzekerheid komt voort uit menselijke onwetendheid om de fysieke leefomgeving te begrijpen. Voorbeelden hiervan zijn het niet accuraat kunnen meten en modeleren van factoren die de fysieke leefomgeving beïnvloeden (Li, Chen, & Feng, 2012). In contradictie met aleatorische onzekerheid kan epistemische onzekerheid worden gereduceerd door het hanteren van de juiste methoden. Epistemische onzekerheid wordt in de literatuur ook wel: kennis onzekerheid (National Research Council, 2000), subjectieve onzekerheid (Helton, 1994), interne onzekerheid (Kahneman & Tversky, 1982) of secundaire onzekerheid (Koopmans, 1957) genoemd. De grenzen tussen aleatorische en epistemische onzekerheid zijn niet altijd even scherp en kunnen in elkaar overlopen.

2.1.2 Onzekerheidstheorieën

Onzekerheid compliceert het speelveld en beïnvloedt het proces van besluitvorming in negatieve zin. Ook kan het managen van onzekerheid gepaard gaan met onzekerheden. Om weloverwogen beslissingen te maken is het benoemen van onzekerheden cruciaal. Het managen van onzekerheden wordt in veel wetenschappelijke disciplines gepraktiseerd (Bammer & Smithson, 2008). In deze paragraaf worden drie theorieën beschreven die soelaas kunnen bieden in de omgang met onzekerheid. Zie onderstaande stroomdiagram (Figuur 2).



Figuur 2: Stroomdiagram onzekerheid

Probabiliteitstheorie

Probabiliteitstheorie gaat nader in op het optreden van willekeurige fenomenen zoals het tossen van een munt. De theorie beschrijft dat een gebeurtenis optreedt of is opgetreden door kans. De kans dat een gebeurtenis optreedt kan worden verkregen door statistische analyses van mogelijke uitkomsten (Marquis de Laplace, 1814) (Kolmogorov, 1956). Echter, dienen experimenten herhaalbaar te zijn en zekere uitkomsten te bevatten waardoor toepassing van deze theorie voor assetmanagement in de Rotterdamse haven niet probaat houvast biedt.

Informatie Hiaattheorie

De informatie hiaat theorie modelleert onzekerheid die gepaard gaat met besluitvorming. Modellen gebaseerd op deze theorie zijn onvolledig in de zin van dat het los staat van probabiliteit. Niet alle mogelijke uitkomsten zijn voorzien en geacommodeerd in het model. Vandaar de naamgeving informatie hiaat theorie. De mate van onzekerheid is epistemisch van aard en is onmeetbaar/onbepaald. Deze theorie wordt gebruikt wanneer er sprake is van het managen van onvolledig begrip van het in te opereren systeem. De informatie hiaattheorie wijkt af van de probabiliteitstheorie door het niet toepassen van probabiliteit maar van bandbreedtes waardoor de theorie geschikter is wanneer niet alle uitkomsten bij voorbaat zijn te constateren (Ben-Haim, 2001). Voor het project is deze theorie geschikter dan de probabiliteitstheorie gezien het handvatten biedt om geschatte bandbreedtes in te bedden in het onderzoek.

Reële opties theorie

De reële opties theorie is een raamwerk dat nader ingaat op investeringsbeslissingen. De theorie is holistischer dan enkel de foci op netto contante waarde en het rendement op investeringen. Deze twee methoden negeren onzekere uitkomsten, het tijdstip waarop een investering wordt gedaan en de onomkeerbaarheid van de inzet van middelen (Moreira Silva & Dom Cabral, 2014). Het maken van scenario's en beslisbomen zijn veel gebruikte methoden om besluitvorming op te baseren. Bekeken vanuit het perspectief van de reële opties theorie zijn interacties tussen onomkeerbaarheid, flexibiliteit en onzekerheid meegenomen. Deze methode kan gebruikt worden om risico's afkomstig van toekomstige onzekerheden te mitigeren (Schwartz & Trigeorgis, 2001). De theorie houdt rekening met onzekerheid en bouwt flexibiliteit in. Hierdoor kan een manager betere besluiten nemen naarmate meer informatie beschikbaar komt (van den Boomen, Spaan, Schoenmaker, & Wolfert, 2019).

Uit de drie samengevatte theorieën is de reële opties theorie het meest bruikbaar voor het vraagstuk van Living Lab Asset Management: Decision Making Under Uncertainty in the Port of Rotterdam. Aangezien er gewerkt wordt met geschatte waarden, het moment van investeren en onzekere uitkomsten. Hierdoor biedt het voldoende handvatten voor strategische besluitvorming en kan de theorie assisteren bij adaptieve besluitvorming betreft de te treffen interventies uitgezet in de tijd.

2.1.3 Gebruik van de reële opties theorie

In het onderzoek wordt gekeken naar de aanleg van waterstoftransportinfrastructuur ten behoeve van de decarbonisatie doelstellingen. De assets (buisleidingen) hebben een levensduur van 50+ jaar (Lancaster Pipeline, 2020). Daarnaast zijn de ingrepen kapitaalintensief en veroorzaken hinder voor de omgeving. Dit zorgt ervoor dat bij het hanteren van een aanlegstrategie varianten waarbij de spade minder vaak de grond in hoeft voorkeur geniet op sociale en pragmatische gronden. Als buisleidingen eenmaal gelegd zijn wordt ervan uitgegaan dat deze buisleiding ook voor de gehele levensduur op de plek blijft liggen en operationeel blijft (onomkeerbaarheid). Verder is de waterstofvraag in de toekomst onzeker. Hier is in de scenario's rekening mee gehouden maar welke vraag in de toekomst werkelijkheid wordt is op voorhand niet te bepalen (onzekerheid). De op te stellen aanlegstrategie dient voldoende mogelijkheden open te houden voor toekomstige opschalingen of hierop vooraf te anticiperen door overdimensionering (flexibiliteit). Deze wijze staat haaks op de traditionele aanpak om onzekerheid het hoofd te kunnen bieden. Traditioneel werd een oplossing geboden voor een waarschijnlijke toekomst (Andrea, 2016). Voor verschillende toekomstmogelijkheden zijn andere interventies nodig in het waterstoftransportsysteem. Om voor een onzekere toekomst goede besluiten te nemen is een flexibele aanpak betreft aanleg, diameter keus en werking nodig. Om een dergelijke strategie te kunnen ontwikkelen kan de reële opties theorie helpen. Aansluitende methodieken volgende uit de gedachte van reële opties zijn de

Dynamic Adaptive Policy Pathways (DAPP) en de beslisboombenadering. De methodiek wordt nader uiteengezet in de paragraaf onderzoeksmethoden.

2.2 Onderzoeksmethoden

In deze paragraaf worden de onderzoeksmethoden beschreven die gebruikt zijn om de vijf deelonderzoeksvragen en de hoofdonderzoeksvraag te beantwoorden.

Primaire datacollectie

Primaire datacollectie is in dit onderzoek toegepast in de vorm van het houden van semigestructureerde interviews en is toegepast in het beantwoorden van deelvraag 1 om de trends op het gebied van waterstof te specificeren en nieuwe inzichten te vergaren. Daarnaast zijn interviews gebruikt in het beantwoorden van deelvraag 2 om de scenario's verder te specificeren. In het beantwoorden van deelvraag 3 zijn de interviews gebruikt voor het verder uitwerken van de huidige buisleidingeninfrastructuur. Bij het beantwoorden van deelvraag 4 zijn interviews gebruikt om achterliggende berekeningen en cijfers te achterhalen. Ook zijn de interviews gebruikt om de geïnventariseerde gegevens te valideren en verifiëren.

Primaire datacollectie, zoals toegepast in dit onderzoek via semigestructureerde interviews, is het verzamelen van originele data voor het onderzoeksdoel door de onderzoekers (Hox & Boeije, 2005) (Kumar, 2019). Er is gekozen om semigestructureerde interviews toe te passen vanwege de flexibiliteit van vraagstelling en doorvragen van ongestructureerde interviews te kunnen gebruiken, maar ook om de vastigheid van gestructureerde interviews om bepaalde onderwerpen te behandelen. Voorafgaand aan de interviews is er een topiclijst opgesteld waarin de te behandelen onderwerpen zijn beschreven aan de hand van voorbeeldvragen. Deze topiclijst dient ook als een houvast voor de interviewer. De gehouden interviews zijn vervolgens verwerkt in een narratief. In dit narratief zijn de acties, vragen en antwoorden van het interview samenvattend beschreven, al dan niet in eigen woorden (Kumar, 2019). De keuze om de interviews te verwerken in een narratief en niet in bijvoorbeeld een transcriptie is omdat de strekking van de antwoorden voor dit onderzoek belangrijker is dan de exacte verwoording.

Secundaire datacollectie

Naast het toepassen van primaire datacollectie, is in dit onderzoek ook secundaire datacollectie toegepast. Het toepassen van secundaire datacollectie is in het gehele onderzoeksrapport gebeurd. Secundaire datacollectie is het verzamelen van data vanuit andere bronnen zoals rapporten en wetenschappelijke artikelen wat gebruikt wordt voor dit onderzoek (Hox & Boeije, 2005) (Kumar, 2019). Doordat er gebruik is gemaakt van secundaire bronnen, is het belangrijk om te kijken naar de kwaliteit van de bron. Hierbij is er gekeken naar de volgende aspecten:

- Validiteit en betrouwbaarheid van de bron: Hierbij wordt nagegaan of de te gebruiken bron nog overeenkomt met de laatste inzichten. Wanneer een secundaire bron wordt gebruikt die niet meer overeenkomt met de laatste inzichten, komt de relevantie van het onderzoek in gevaar. Daarnaast wordt ook gekeken naar wat voor een soort bron het is: is het een krantenartikel of een wetenschappelijk artikel? Er kan bijvoorbeeld worden aangenomen dat een wetenschappelijk artikel betrouwbaarder is dan een krantenartikel of een (persoonlijke) blog (Kumar, 2019).
- Bias van de auteur: Bij het gebruik van kranten- en tijdschriftartikelen of een (persoonlijke) blog is er een vrij grote kans op een persoonlijke bias van de schrijver (Kumar, 2019). Bij een wetenschappelijk artikel of rapport is de kans op een bias van de auteur aannemelijk kleiner. Hierbij is gekeken naar de auteur van de bron, is het een wetenschapper of een werknemer van een bedrijf of een lobbyist. Daarnaast is er gekeken of de auteur een belang heeft in het onderwerp waarover hij of zij schrijft.

Literatuurstudie

In de literatuurstudie wordt de verzamelde data, zoals beschreven bij ‘secundaire datacollectie’, bestudeerd en verwerkt in de verschillende werkpakketen en is gebruikt om onzekerheden te kwantificeren en kengetallen te achterhalen.

Literatuurstudie is toegepast om deelvraag 1 te beantwoorden door het bestuderen en verwerken van trends op het gebied van waterstof. Literatuurstudie is ook toegepast om deelvraag 2 te beantwoorden door het bestuderen en uitwerken van de scenario’s. Literatuurstudie is ook toegepast om alles op het gebied van haalbare aanpassingen te bestuderen en verwerken om deelvraag 4 te beantwoorden.

Factor-C methode

Om een beeld te krijgen welke partijen in de haven van Rotterdam de belangrijke spelers zijn op het gebied van waterstof en welke partijen benaderd moesten worden voor het houden van een interview is er een stakeholder- en netwerkanalyse uitgevoerd. Hierbij is de keuze gevallen om de ‘Factor-C methode’ te gebruiken omdat deze methode stapsgewijs in kaart brengt wat de machtige partijen zijn alsmede de knelpunten en kansen binnen een gebiedsgericht project. De ‘Factor-C methode’ is een methode die ontwikkeld is door de Rijksoverheid en kent de volgende vier stappen die als leidraad gelden en zodoende zijn uitgevoerd:

1. Actoreninventarisatie: Als eerste zijn de actoren in kaart gebracht door vanuit verschillende invalshoeken te kijken naar waterstof en de waterstoftransitie in de haven van Rotterdam (Rijksoverheid, sd). Dit is gedaan door eerst een ‘quick and dirty’ inventarisatie te doen en vervolgens een groepssessie. De resultaten van de inventarisatie zijn vervolgens overzichtelijk verwerkt in een stakeholderlijst.
2. Krachtenveldanalyse: In de tweede stap van de ‘Factor-C methode’ is in kaart gebracht wat de macht is van de actoren op het gebied van waterstof en de waterstoftransitie in de haven van Rotterdam. Dit is gedaan door één van de volgende lettercodes toe te kennen aan de desbetreffende actor, waarbij A zeer machtig is, B is redelijke machtig en C is niet machtig. Vervolgens is er in kaart gebracht hoe de actoren tegenover waterstof en de waterstoftransitie in de haven staan. Dit is gedaan door één van de volgende kleurcodes toe te kennen aan de actoren: Groen voor positief tegenover waterstof en de waterstoftransitie, oranje voor neutraal tegenover waterstof en de waterstoftransitie, rood voor negatief tegenover waterstof en de waterstoftransitie en zwart wordt gebruikt wanneer het standpunt van de actor onbekend is (Rijksoverheid, sd). Uit deze stap kan bijvoorbeeld geconcludeerd worden of er veel machtige actoren zijn die positief zijn (veel groene A’s) of dat er veel machtige partijen zijn die negatief tegenover de waterstoftransitie staan (veel rode A’s).
3. Sociogram: In deze stap van de ‘Factor-C methode’ worden de onderlinge relaties en belangen tussen de actoren in kaart gebracht door het maken van een sociogram of netwerkanalyse (Rijksoverheid, sd). Uit deze sociogram of netwerkanalyse blijkt waar mogelijke knelpunten zitten en waar actoren elkaar versterken qua onderlinge belangen en relaties op het gebied van waterstof en de waterstoftransitie.
4. Ringen van invloed: In de vierde en laatste stap van de ‘Factor-C methode’ is in kaart gebracht wat de rollen zijn van de in kaart gebrachte actoren: willen ze beslissen of alleen op de hoogte gesteld worden? In deze stap wordt er onderscheid gemaakt tussen de partijen op basis van de rollen (beslissers, gebruikers/afnemers, uitvoerders/leveranciers en beïnvloeders) en mate van het uitoefenen van invloed (meebepalen, meewerken, meedenken en meeweten) (Rijksoverheid, sd). Het uitvoeren van deze stap is gebeurd met de informatie en resultaten die zijn verkregen in de stappen 1 tot en met 3.

Het uitvoeren van deze methode heeft een stakeholder- en netwerkanalyse geleverd (Bijlage 1 Netwerkanalyse) die de belangrijke partijen in de haven van Rotterdam in kaart heeft gebracht. Een aantal van deze partijen zijn vervolgens benaderd voor interviews.

Kruis-impactanalyse

Om deelvraag 2 te beantwoorden en dus te bepalen welke scenario's met betrekking tot de waterstofambities in 2050 toepasbaar zijn voor de haven van Rotterdam, is er een kruis-impactanalyse uitgevoerd. In een kruis-impactanalyse worden de potentiële impacts van geïnventariseerde evenementen of scenario's op de andere geïnventariseerde evenementen of scenario's onderzocht en tegen elkaar uitgezet in een matrix (Banuls & Turoff, 2011) (Pillkahn, 2008). Om deze methode te kunnen toepassen zullen, door primaire- en secundaire datacollectie, diverse scenario's worden gezocht en worden afgewogen op bruikbaarheid voor dit onderzoek middels indicatoren. Nadat verschillende toekomstscenario's zijn verzameld, moeten deze toekomstscenario's worden verwerkt in de kruis-impact analyse (zie Figuur 3). De verzamelde scenario's zullen op beide assen van de tabel tegen elkaar worden uitgezet, Vervolgens wordt op basis van een gradatie gekeken hoeveel impact het ene scenario heeft op de uitkomst van het volgende scenario. De gradatie vindt plaats op een schaal van 0 tot en met 3 waarbij een score van 0 betekend dat beide scenario's geen impact op elkaar hebben en waarbij een score van 3 betekend dat het ene scenario een grote aandrijving heeft op het andere scenario.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Score
T1		3	3	3	2	3	3	2	1	2	22
T2	0		3	0	3	0	2	0	1	2	11
T3	1	1		0	0	0	2	1	0	0	5
T4	2	2	3		3	2	3	1	1	2	19
T5	0	2	3	0		0	2	1	1	3	12
T6	2	1	3	1	1		1	0	1	2	12
T7	1	2	2	2	2	1		3	2	3	18
T8	2	3	3	1	1	0	3		1	2	16
T9	2	1	0	2	1	2	2	2		1	13
T10	3	3	3	3	3	0	2	2	1		20

Highest Score:	T1, T4, T7, and T10	0 Independent	1 Dependent
		2 Slight Impact	3 Strong Driver

Figuur 3: Voorbeelduitwerking van een kruis-impactanalyse (Pillkahn, 2008)

Er is gekozen om de kruis-impactanalyse toe te passen om te bepalen welke scenario's toepasbaar zijn voor de haven van Rotterdam, doordat er met deze methode veel scenario's met elkaar vergeleken kunnen worden en mogelijke links hiertussen uitgelicht kunnen worden (zie ook Bijlage 2 Theorie opstellen scenario's). De kruis-impact analyse is uitgevoerd in hoofdstuk 4: Scenario's. Door het gebruiken van deze methode, zijn er scenario's gekozen die een waterstofvraag schetsen waarmee de beslisboom getekend kan worden. Daarnaast is deze waterstofvraag uit de scenario's ook gebruikt voor de dimensionering van de pijpleidingen.

Haalbaarheidsstudie

Om deelvraag 4 'Op welke haalbare wijze kan een waterstofdistributienetwerk gerealiseerd worden?' te beantwoorden, is een haalbaarheidsstudie uitgevoerd. Bij het uitvoeren van deze haalbaarheidsstudie is het 'FOETSJE-model' als uitgangspunt gebruikt. Het 'FOETSJE-model' toets de haalbaarheid op 7 punten (Knoot, sd), die binnen dit rapport als volgt zijn ingevuld:

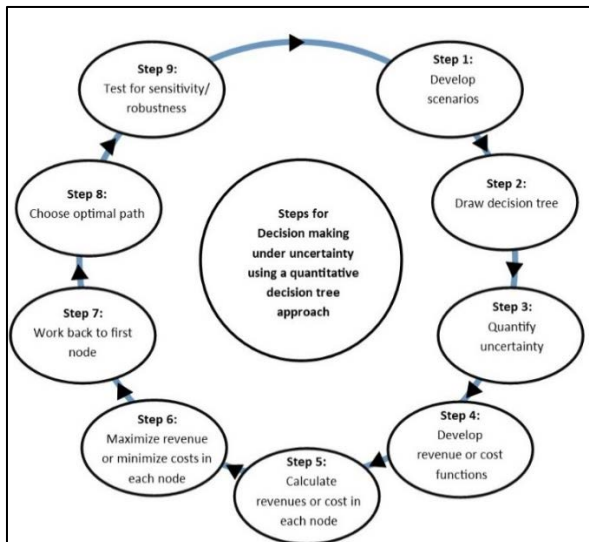
1. **Financieel:** Zijn de kosten van het realiseren van een waterstofdistributienetwerk in de haven van Rotterdam betaalbaar voor de aanwezige industrie? Bij deze indicator is er gekeken of de kosten van het realiseren van een waterstofdistributienetwerk te betalen is voor de bedrijven die dit netwerk willen realiseren.

2. **Organisatorisch:** Is het realiseren van een waterstof distributienetwerk in de haven van Rotterdam organisatorisch haalbaar en wanneer moeten welke stappen worden ondernomen? Hier is gekeken of het realiseren van een waterstof distributienetwerk haalbaar is met de aanwezig organisaties in de haven van Rotterdam. Daarnaast is er ook gekeken wanneer welke optimalisatie stappen moeten worden ondernomen in het realiseren van een waterstof distributienetwerk.
3. **Economisch:** Wat is het meest rendabel adaptieve pad om een waterstof distributienetwerk te realiseren in de haven van Rotterdam? Bij deze haalbaarheidsindicator wordt er gekeken wat economisch het meest rendabele adaptieve pad is in de beslisboom.
4. **Technologisch:** Is het realiseren van een waterstof distributienetwerk in de haven van Rotterdam technologisch haalbaar? Hier is gekeken of er met de beschikbare techniek een waterstof distributienetwerk gerealiseerd kan worden die voldoet aan de waterstofvraag geschetst in de scenario's.
5. **Sociaal:** Is er sociaal draagvlak voor het realiseren van een waterstof distributienetwerk in de haven van Rotterdam? Deze haalbaarheidsindicator is in dit onderzoek niet getoetst vanwege de scope van het onderzoek en de beschikbare tijd.
6. **Juridisch:** Is het realiseren van een waterstof distributienetwerk in de haven van Rotterdam juridisch haalbaar? Deze haalbaarheidsindicator is binnen dit onderzoek niet getoetst, vanwege de scope en de beschikbare tijd van het onderzoek.
7. **Ethisch:** Is het realiseren van een waterstof distributienetwerk in de haven van Rotterdam ecologisch verantwoord? Deze haalbaarheidsindicator is in dit onderzoek niet getoetst vanwege de scope van het onderzoek en de beschikbare tijd.

Er is gekozen om het 'FOETSJE-model' te gebruiken als uitgangspunt van de haalbaarheidsstudie, doordat er met deze methode de haalbaarheid van het realiseren van een distributienetwerk gestructureerd en overzichtelijk wordt getoetst en weergegeven. Na het uitvoeren van deze methode, is het inzichtelijk hoe haalbaar de voorgestelde wijze van het realiseren van een waterstof distributienetwerk is.

Beslisboom

Om deelvraag 4 te beantwoorden en input te geven voor het beantwoorden van deelvraag 5 wordt door middel van het maken van een beslisboom adaptieve paden ontwikkeld. In deze beslisboom, zoals beschreven in (van den Boomen, Spaan, Schoenmaker, & Wolfert, 2019), wordt kwantitatief het meest optimale pad afgewogen voor het realiseren van een waterstof distributienetwerk. De beslisboom methode kent negen stappen (Figuur 4) die zodanig zijn uitgevoerd binnen dit onderzoek.



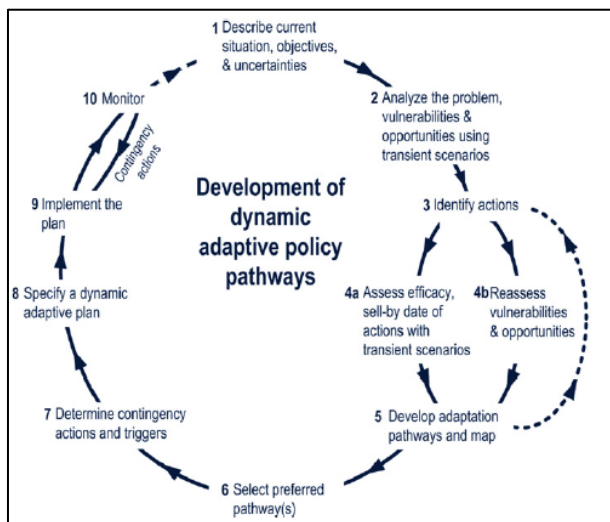
Figuur 4: Stappenplan beslisboom methode

1. Develop scenarios: In de eerste stap worden de scenario's ontwikkeld die gebruikt worden in de beslisboom. Binnen dit onderzoek zijn de scenario's opgesteld in hoofdstuk 4 en zijn in de beslisboom overgenomen. Deze scenario's geven een getal voor de waterstofvraag.
2. Draw decision tree: In deze stap is de beslisboom getekend op basis van de tijdsintervallen tot en met 2050 en de waterstofvraagscenario's.
3. Quantify uncertainty: In de derde stap is de probabilliteit van het uitkomen van de scenario's gekwantificeerd. Hierin worden probabilliteitscijfers toegekend aan de scenario's, waarbij de som van deze probabilliteitscijfers 100% is. De probabilliteitscijfers zijn toegekend op basis van de trends en worden per tijdsinterval bepaald.
4. Develop revenue or cost functions: In de vierde stap is berekend hoeveel het kost om innovaties uit te voeren in het waterstofdistributienetwerk. Hierin zijn de kosten achterhaald en berekend van optimalisatiekosten, vervangingskosten, onderhoudskosten en verloren inkomsten.
5. Calculate revenues or cost in each node: In de vijfde stap is de contante waarde van alle acties naar een volgende bereikbare node berekend. Hierbij is vanaf de toekomst teruggerekend naar het heden, waarbij voor elke node de te maken kosten, de verwachte inkomsten en mogelijke verliezen zijn berekend
6. Maximimize revenue or minimize costs in each node: Nadat in stap 5 de contante waardes zijn berekend voor elke node, is in deze stap de maximale te behalen contante waarde vanuit de andere bereikbare nodes bepaald.
7. Work back to first node: De zevende stap bestaat uit het proces van het berekenen en maximaliseren van de contante waardes. Hierbij is vanuit de toekomst teruggerekend tot aan het heden, oftewel de eerste node.
8. Choose optimal path: In de achtste stap is bepaald wat het optimale pad is voor het realiseren van een waterstofdistributienetwerk in de haven van Rotterdam. Hierbij is gekeken vanaf het beginpunt naar welke node per tijdsinterval de hoogste contante waarde heeft. Hierin is het echter niet mogelijk om terug te gaan naar een lager scenario.
9. Test for sensitivity or robustness: In de negende en laatste stap is de sensitiviteit en robuustheid van de beslisboom getest. Het testen van de sensitiviteit is uitgevoerd doordat de beslisboom bestaat uit vele variabelen en dus gevoeliger is voor fouten. Hierbij is geverifieerd of alle inputgegevens goed zijn doorgerekend, tevens is hiermee het optimale pad gevalideerd.

Er is gekozen om de beslisboom methode toe te passen doordat met de beslisboom het meest optimale adaptieve pad kwantitatief kan worden afgewogen voor het realiseren van een waterstofdistributienetwerk.

Dynamic Adaptive Policy Pathways methode

Het opzetten van de adaptatiestrategie in hoofdstuk 7 wordt uitgevoerd volgens de 'Dynamic Adaptive Policy Pathways' methode (DAPP-methode) zoals beschreven in (Haasnoot, Walker, Kwakkel, & ter Maat, 2013). In de DAPP-methode zijn de sterke punten van de 'Adaptive policymaking' en 'Adaptation pathways' methodes gecombineerd. De DAPP-methode bestaat uit 10 stappen (Figuur 5) (Haasnoot, Walker, Kwakkel, & ter Maat, 2013). Er is gekozen om de DAPP-methode toe te passen omdat er met deze methode een dynamische en adaptieve strategie ontwikkeld kan worden voor een onzekere toekomst op basis van adaptieve paden.



Figuur 5: Stappenplan DAPP methode (Haasnoot, Walker, Kwakkel, & ter Maat, 2013)

De tien stappen van de DAPP-methode (Figuur 5) zijn in dit onderzoek op de volgende manieren vormgegeven:

1. Als eerste is de huidige situatie beschreven, de doelen en de onzekerheden die spelen in de haven van Rotterdam.
2. In de tweede stap zijn de scenario's opgesteld die beschrijven in welke mate waterstof een rol gaat spelen in de haven van Rotterdam. Ook zijn in deze stap de trends met betrekking tot waterstof en de waterstofvraag geïnventariseerd. Ook is in deze stap bepaald wat de invloed van de waterstoftransitie is op het bestaande distributienetwerk.
3. In de derde stap is geïnventariseerd op welke manier(en) een distributienetwerk gerealiseerd kan worden die voldoet aan de toekomstige waterstofvraag.
4. In de vierde stap zijn de manieren om een distributienetwerk te realiseren die voldoet aan de toekomstige watervraag geanalyseerd op haalbaarheid, werkbaarheid en houdbaarheid.
5. In de vijfde stap van de DAPP-methode zijn de paden geïdentificeerd die kunnen worden uitgerold in de tijd op basis van haalbare acties. Deze stap is uitgevoerd middels de beslisboom en niet via de 'Adaptation pathways' methode zoals beschreven in (Haasnoot, Middelkoop, Offermans, van Beek, & van Duersen, 2012) en (Haasnoot, Walker, Kwakkel, & ter Maat, 2013). Deze keuze is gemaakt doordat de adaptieve paden in dit onderzoek kwantitatief worden benaderd, terwijl dit in de DAPP-methode kwalitatief wordt benaderd.
6. De zesde stap wordt het geprefereerde pad geselecteerd. Dit geprefereerde pad komt binnen dit onderzoek voort uit de beslisboom, zoals beschreven in stap 5.

7. In de zevende stap zijn acties in kaart gebracht waarmee signalen en/of triggers opgevangen worden die voorbereiden op gebeurtenissen die invloed kunnen hebben op het geprefereerde pad.
8. In de achtste stap zijn de resultaten van de voorgaande stappen vertaald naar een adaptief plan.
9. In de negende stap wordt het adaptieve plan, dat is opgezet in stap 8, geïmplementeerd. Deze stap wordt echter binnen dit onderzoek niet uitgevoerd van weg de scope van het onderzoek en de beschikbare tijd.
10. De tiende en laatste stap bestaat uit het monitoren van de uitvoering van het adaptieve plan en vormt een basis voor het starten van acties, uitvoeren van aanpassingen en het stoppen van acties. Deze stap wordt ook niet uitgevoerd in dit onderzoek vanwege de scope en beschikbare tijd.

3 Waterstoftrends

Dit hoofdstuk gaat in op deelvraag 1: “Welke trends hebben impact op de waterstoftransitie in de haven?”. Waterstof is een zeer actueel thema en wordt door velen gezien als de energie van de toekomst. Binnen de wetenschappelijke literatuur wordt er al gesproken over de opkomende waterstof economie (da Silva Veras, Simonato Mozer, da Costa Rubim Messeder dos Santos, & da Silva César, 2016). Waterstof is toepasbaar in bijna alle sectoren van mobiliteit tot gebouwde omgeving. Ook kan waterstof de rol vervullen van stabilisator van het energienet, door overtollige energie te gebruiken voor de productie van waterstof. Dit is nodig aangezien grote hoeveelheden hernieuwbare energie (zon, wind e.d.) de betrouwbaarheid van het elektriciteitsnet onder druk zetten (Linowes, 2018). Gezien de vele mogelijke toepassingen van waterstof zal in dit hoofdstuk worden ingegaan op trends die de waterstofvraag en transitie beïnvloeden zoals financiering, productie, soorten waterstof, import en toepassingen.

3.1 Kapitaal influx

Waterstof staat aan de vooravond van grote publieke en private kapitaalinjecties. Waterstof is ook opgenomen als onderdeel van de economische coronaherstelplannen. Tabel 1 geeft een overzicht van recente grootschalige waterstofinvesteringen:

Tabel 1: Investerings in waterstof

Ontwikkeling	Budget	Bron
Europese Waterstof Strategie	430 Miljard tot 2030	(S&P Global, 2020)
Duits Covid Economisch Herstelprogramma	9 Miljard	(European Sting, 2020)
Frans Covid Economisch Herstelprogramma	7 Miljard tot 2030	(New Mobility News, 2020)
BP-investering in duurzame energie	5 Miljard jaarlijks	(New York Times, 2020)
Investeringsagenda Waterstof Noord-Nederland	2,8 Miljard tot 2030	(Provincie Groningen, 2019)
Europees Regionaal Ontwikkelingsfonds (SNN)	438 Miljoen	(Sparidaens, 2020)

Naast deze Europese initiatieven wordt er ook actie ondernomen op andere continenten. De Verenigde Staten, Australië en Oost-Azië zetten ook grootschalig in op de ontwikkeling van waterstoftechnologie en de uitrol van hun waterstof gerelateerde infrastructuur. Daarnaast werkt de Europese Unie samen met de Europese periferie (voornamelijk Oekraïne en Algerije (Van Wijk & Chatzimarkakis, 2020) voor waterstofproductie in deze landen. Gezien de magnitude van deze bedragen en de vrij recente globale focus op waterstof zijn trends moeilijk in te schatten. Technologische doorbraken kunnen het speelveld radicaal veranderen, zeker als een termijn tot 2050 wordt gehanteerd. Veelbelovende technologische ontwikkelingen zijn ondergrondse steam methane reforming (productie), Fuel Cell Electric Vehicles (mobiliteit) en hybride warmtepompen (gebouwde omgeving). Het potentieel van waterstof voor vervanging van fossiele brandstoffen is enorm. De grote van de investeringen in nieuwe waterstoftechnologieën onderschrijven de erkenning van publieke en private entiteiten in het potentieel van waterstof.

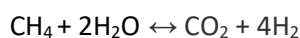
3.2 Productie

Er zijn verschillende vormen van waterstof. Chemisch gezien zijn ze hetzelfde, echter zit het verschil hem in het feit hoe de waterstof is vervaardigd. Deze typen waterstof worden aangeduid met de kleuren grijs, blauw en groen (Lindsey, 2020). Grijs waterstof is waterstof dat is gemaakt met behulp van fossiele brandstoffen. Grijs waterstof valt buiten de scope van dit onderzoek gezien het niet bijdraagt aan de decarbonisatie doelstellingen van de haven. Blauw waterstof is vervaardigd uit

fossiele brandstoffen of kernenergie maar het koolstofdioxide is afgevangen en opgeslagen. Blauw waterstof is daardoor gekenmerkt door lage CO₂-emissies. Groen waterstof is gemaakt met behulp van hernieuwbare energie zoals zon, wind of waterkracht. Waterstof gemaakt uit groen gas van vergisters kwalificeert ook voor het label groen waterstof. Deze paragraaf gaat in op de typen waterstof, productie en import.

3.2.1 Blauwe waterstof

In de haven van Rotterdam wordt er gewerkt aan de infrastructuur om grijs waterstof blauw te maken. Dit plan leunt vooral op de open access infrastructuur van de haven van Rotterdam voor transport van koolstofdioxide. Dit project wordt ook wel Porthos genoemd waarbij koolstofdioxide in voormalige gasvelden permanent wordt opgeslagen voor de Hollandse kust (Havenbedrijf Rotterdam, 2020). De geproduceerde waterstof zal worden ontsloten middels het landelijk waterstofnetwerk dat momenteel door de Gasunie wordt ontwikkeld. Blauw waterstof wordt gezien als de voorganger van groen waterstof en wordt gebruikt om investeringen in waterstof infrastructuur economisch rendabeler te maken gezien blauw waterstof goedkoper is dan groen waterstof. Blauw waterstof wordt in Nederland vooral gemaakt door middel van Steam Methane Reforming (SMR) (Hers, et al., 2018). Dit is een proces waarbij d.m.v. stoom de waterstofatomen worden gescheiden van de koolstofatomen. Zie de onderstaande chemische vergelijking:



Dit proces wordt veel toegepast om waterstof te produceren aangezien het goedkoper is dan elektrolyse van water (wat veelal wordt gebruikt om groen waterstof mee te maken). Echter, kan het ondergronds uitvoeren van SMR de opkomst van de waterstofeconomie substantieel versnellen. In januari 2020 is het petrochemische engineers gelukt om in het Superb olieveld in Saskatchewan Canada in te zetten voor de productie van waterstof door SMR op 700 meter diepte uit te voeren (Hand, 2020). De broeikasgassen blijven ondergronds terwijl de waterstof kan worden gewonnen. In Canada wordt deze vorm van waterstof productie geschaard onder groen waterstof gezien de zero-emissions bovengronds. Adoptie van ondergrondse SMR-technologie zou van Nederland een van 's werelds grootste waterstofexporteurs kunnen maken. Fossiele bronnen in Nederland kunnen door gebruik van deze techniek waterstof leveren zonder broeikasgassen aan de atmosfeer toe te voegen. Ook claimt het bedrijf dat deze experimenten uitvoert (Proton Technologies) dat ze waterstof kunnen produceren voor 0,10 – 0,50 dollar per kilogram. Dit is goedkoper dan grijs waterstof wat volgens de Internationale Energie Agentschap voor 1\$ per kilogram kan worden geproduceerd.

3.2.2 Groene waterstof

Groen waterstof zal naar verwachting vanaf de jaren dertig van deze eeuw een grotere rol vervullen. Momenteel is blauw waterstof 2 á 5 keer zo goedkoop. Vanaf 2030 zullen de prijzen van de twee typen waterstof meer elkaar naderen. Dit is te danken aan het online komen van grote offshore windparken in het Nederlandse deel van de Noordzee. De geproduceerde energie zal vervoerd worden naar de Rotterdamse haven waar conversie naar H₂ zal plaatsvinden door elektrolyse van water. Zie onderstaande chemische vergelijking:

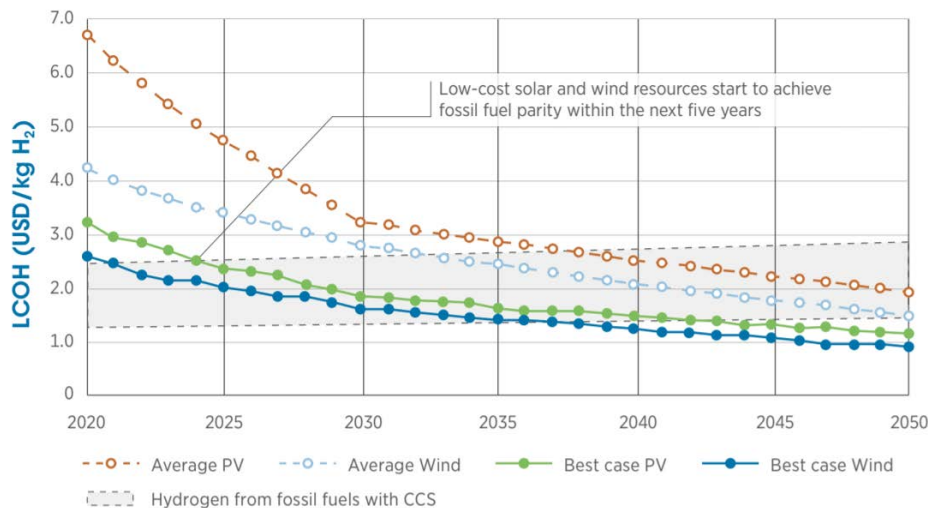


Tabel 2 geeft de prognose van de prijsontwikkeling weer van de verschillende typen waterstof.

Tabel 2: Waterstofprijzen

Type waterstof	Productie kosten (PK) €/kg	Bron (PK):
Grijs 2020	1,3	Havenbedrijf Rotterdam
Blaauw 2020	2	Havenbedrijf Rotterdam
Groen 2020	6	Havenbedrijf Rotterdam
Blaauw 2030	2 tot 3	Havenbedrijf Rotterdam
Groen 2030	2 tot 3	Havenbedrijf Rotterdam
Groen 2030	1,2	BloombergNEF
Groen 2050	0,68	BloombergNEF
Ondergronds SMR (B/G) 2030	0,08 – 0,42	Proton Technologies

Prijzen in de toekomst zijn lastig te voorspellen gezien de volatiliteit van energiemarkten. Er zijn verschillende productie kosten voor waterstof, deze zijn afhankelijk van: productiemethode, situering, investeringskosten etc. De prijs voor waterstof per kilogram is gehaald uit literatuur (Position Paper Waterstof Havenbedrijf Rotterdam, BloombergNEF & ScienceMag). Wat uit de tabel kan worden geconcludeerd is dat de prijzen zeer uitlopen en gepaard gaan met veel onzekerheden. De verwachting is dat naarmate er meer blauw waterstof wordt geproduceerd de prijs per kilogram duurder gaat worden gezien de CCS-aardgasvelden (Carbon Capture and Storage) volraken en er nieuwe velden geschikt moeten worden gemaakt voor de opslag van CO₂. Daarnaast is er een aanname gemaakt in het brondocument dat de prijzen van fossiele energie in de toekomst gaan stijgen. Deze aanname is gezien technologische innovaties in de petrochemie onwaarschijnlijk. De schalierevolutie heeft de VS zelfvoorzienend gemaakt en zelfs een exporteur van energie. Ook worden nieuwe fossiele voorraden ontdekt op locaties die voorheen niet toegankelijk waren (bijv. het poolgebied). Ook is de competitiviteit van waterstof afhankelijk van het beprijzen van de CO₂-uitstoot. In het hoofdstuk scenario's zal verder in worden gegaan op het beprijzen van koolstofdioxide. De prijzen voor waterstof differentiëren afhankelijk van de bron die wordt gebruikt. Onderstaande figuur is afkomstig van het Internationale Hernieuwbare Energie Agentschap (International Renewable Energy Agency, 2019) waarin de levelized costs (levenscyclusanalyse voor de kosten per opwekkingsmethode) per kilogram waterstof zijn geplot. In de grafiek worden de kosten voor waterstofgeneratie uit PV (fotovoltaïsche energie) en windenergie vergeleken met fossiel.



Figuur 6: Levelized Costs van waterstof tot 2050

In de grafiek (zie Figuur 6) zijn de productiekosten (PK) weergegeven, om te komen tot consumentenprijzen (CP) moeten transmissiekosten, belastingen, winstmarges ed. worden opgeteld. Hiervoor is een factor gebruikt die afneemt na verloop van tijd ervan uitgaande dat economies of scale zorgen voor reductie van kosten. Voor de prijs van groene waterstof is de lijn van average wind gevolgd gezien in Nederland vooral wind wordt ingezet voor de productie van waterstof. Voor blauw is de hoogste prijs van waterstof productie met Carbon Capture and Storage genomen. Dit resulteert in Tabel 3.

Tabel 3: Consumentenprijzen Waterstof tot 2050

Type en jaar	PK per Kg	Kosten factor	CP per Kg
Blauw 2020	2,03	4	8,13
Groen 2020	3,56	4	14,23
Blauw 2030	2,29	3	6,86
Groen 2030	2,46	3	7,37
Blauw 2040	2,37	2,5	5,93
Groen 2040	1,78	2,5	4,45
Blauw 2050	2,46	1,5	3,68
Groen 2050	1,10	1,5	1,65

(PK productiekosten, CP consumentenprijzen)

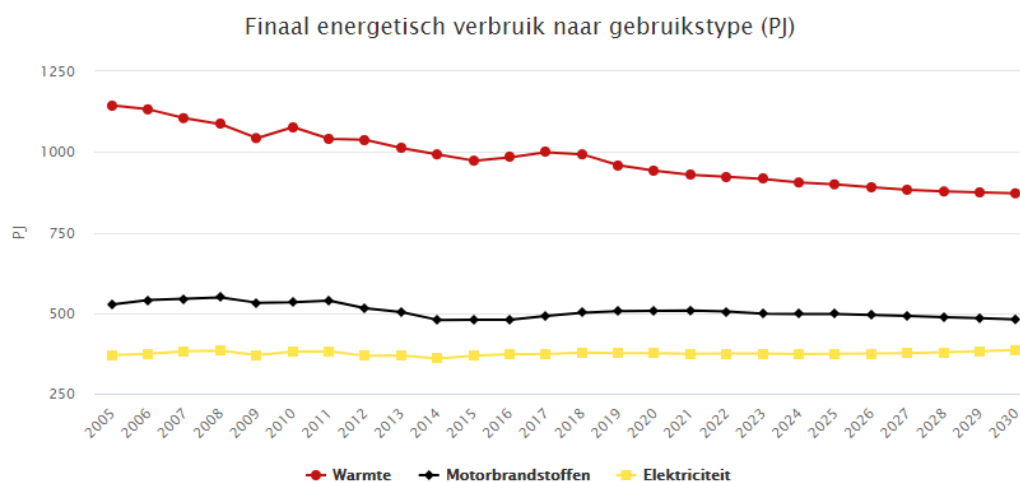
3.2.3 Import van waterstof

Volgens de Europese Commissie en de International Renewable Energy Agency (IRENA) liggen er kansen voor hernieuwbare energieproductie in alle Europese lidstaten en daarmee ook voor de productie van groen waterstof (International Renewable Energy Agency, 2018). Echter, is het de vraag waar productie van groen waterstof het meest kostenefficiënt kan plaatsvinden. Als vrijhandelsblok zou het slim zijn om als EU gezamenlijk waterstof te produceren waar het tegen de laagste prijs kan om aan de Europese energiebehoefte te voldoen. Voor technologieën zoals fotovoltaïsch (PV) is de potentie in Zuid-Europa veel groter dan in het noorden, simpelweg door de geografische ligging betreft de latitude. Als prijzen per hectare en arbeidskosten worden meegenomen is de businesscase van renewables in Zuid-Europa aanzienlijk gunstiger dan in Noord-Europa. De energiemarkt is globaal georganiseerd. De energietransitie is ook vanuit geopolitiek oogpunt aantrekkelijk aangezien voor productie van groen waterstof hernieuwbare energie nodig is wat op veel meer plaatsen kan worden opgewekt dan enkel in de landen die nu beschikken over

fossiele voorraden. Dit geeft importerende landen meer opties betreft de herkomst van energie. Het is aannemelijk dat wanneer de investeringskosten voor duurzame energie dalen, mogelijkheden buiten de Europese Unie goedkoper groen waterstof kunnen produceren en via export de Europese markt gaan bedienen. De haven van Rotterdam dient tijdig in te spelen op deze trend door de infrastructuur te bouwen om grootschalige import van waterstof voor de Europese markt te faciliteren.

3.3 Toepassingen

Waterstof is veelzijdig en kan gebruikt worden als energiebron in verschillende sectoren. Onderstaande tabel geeft het finaal energetisch verbruik (totaal aantal energie dat gebruikt wordt uitgesplitst op de drie energievormen) weer tot 2030. Waterstof heeft de potentie om een substantiële rol te spelen in de opwekking van warmte, motorbrandstoffen en elektriciteit (zie Figuur 7). Daardoor is waterstof uitermate geschikt voor decarbonisatie doelen gezien het feit dat voor motorbrandstoffen en warmte duurzame alternatieven op grote schaal ontbreken.



Figuur 7: Finaal energetisch verbruik per gebruikstype (Energie-Nederland, 2020)

In deze paragraaf zal verder worden ingezoomd op de rol die waterstof kan gaan spelen in de industrie, mobiliteit en bebouwde omgeving met name op de ontwikkeling van de waterstofvraag.

3.3.1 Waterstof in industriële processen

Waterstof is een belangrijke grondstof in de Nederlandse industrie. De waterstof die hierin vooral wordt gebruikt is grijze waterstof. De huidige waterstofvraag als grondstof in de industrie behelst jaarlijks 163 PJ. Waterstof heeft het potentieel om naast grondstof ook te worden gebruikt als energiebron voor verhittingsprocessen in de industrie waarbij het aardgas verdringt. Voor energie-intensieve sectoren zoals de staalindustrie zijn al mogelijkheden om dit decennium fossielvrij staal te kunnen leveren door integratie van waterstof in het productieproces (Rotman, 2020). Waterstof kan in de toekomst de rol innemen die aardgas nu speelt in de industrie. De waterstofvraag vanuit de industrie is verder toegelicht in de scenario's.

3.3.2 Waterstof in mobiliteit

Waterstof als brandstof in de mobiliteit is niet nieuw. De Amerikaanse President George W. Bush noemde in zijn 2003 State of the Union Address dat de eerste auto van een kind geboren in 2003 een waterstofauto zal zijn (The White House, 2003). Deze voorspelling is voorbarig gebleken aangezien waterstof nog bezig is om een solide positie op de markt in te nemen. Een prognose zoals geschetst door de Sociaaleconomische Raad in de Brandstofvisie van 2014 is te zien in Tabel 4.

Tabel 4: Schatting aantal H2-voertuigen (Sociaal-Economische Raad, 2014)

Jaar	Aantal H2-voertuigen
2030	100.000 - 200.000
2050	2.500.000 - 3.000.000

De huidige vraag naar waterstof in de mobiliteit is nog gering. Dit is te wijten aan de hoge kosten van waterstofvoertuigen en het ontbreken van pompinfrastructuur. Waterstof als brandstof in de mobiliteit bevindt zich nog in de pilotfase. Naast de hoge kosten is waterstof energetisch minder aantrekkelijk dan het rijden op elektriciteit (Afman, et al., 2017). Echter, zijn er recent nieuwe technieken ontwikkeld die zorgen dat waterstof aan aantrekkelijkheid wint in vergelijking met elektrisch. Een van deze ontwikkelingen is de Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV). Voertuigen met een FCEV, kwalificeren als een zero-emissions voertuig met als verbrandingsproducten water en energie. De actieradius van deze voertuigen kennen niet de limitatie van elektrische voertuigen. Naast personenauto's kunnen FCEV's ook worden toegepast in vrachtwagens, treinen, boten, vliegtuigen, bussen, motorrijwielen ed. De markt die waterstof kan veroveren is aanzienlijk mits het fossiele brandstoffen uit de markt kan prijzen.

3.3.3 Waterstof in de gebouwde omgeving

In Nederland wordt het grootste deel van de woningen verwarmd met aardgas (90%) (Stedin, 2020). De resterende woningen worden in hun warmtevraag voorzien door warmtepompen en warmtenetten. Het verduurzamen van de bestaande woningen is één van de grootste uitdagingen in de gebouwde omgeving. Waterstof kan een rol spelen bij het verduurzamen van bestaande en nieuwe woningen door te worden verbrand in een gasketel of hybride warmtepomp. Waterstof kan direct worden geïnjecteerd aan het bestaande gasnet of door middel van methanisatie worden toegevoegd. Een andere innovatie in de gebouwde omgeving zijn domestic fuel cells. Deze cellen leveren elektriciteit en warmte aan de woning. Uit onderzoek van Stedin wordt geconcludeerd dat de rol die waterstof gaat spelen in de bebouwde omgeving tot 2030 gering is. Beschikbare waterstof zal eerst worden gebruikt in andere sectoren zoals industrie en mobiliteit. Na 2030 zou waterstof een aantrekkelijkere optie kunnen worden in de gebouwde omgeving mits de prijs en beschikbaarheid het toelaten.

3.4 Beantwoording deelvraag 1

In dit hoofdstuk is deelvraag 1: "Welke trends hebben impact op de waterstoftransitie in de haven?" beantwoord. De waterstoftransitie kan doorwerken op de drie energievormen (warmte, motorbrandstoffen en elektriciteit) in het energiesysteem. Echter, is het de vraag wanneer waterstof als volwaardig energiealternatief de energiemarkten kan penetreren. Dit is afhankelijk van de prijs van waterstof en concurrentievermogen met bestaande energiebronnen. Voor sectoren als de gebouwde omgeving en mobiliteit lijkt waterstof dit decennium nog een marginale rol te vervullen. Het zwaartepunt van waterstof ligt momenteel bij de industrie gezien waterstof klimaatvriendelijke productie van producten mogelijk maakt. Schattingen van de toekomstige waterstofvraag zijn zeer onzeker en afhankelijk van het succes van technologische innovaties. Dat de vraag naar waterstof in de toekomst gaat toenemen is waarschijnlijk maar in welke mate is onbekend. Om dit te ondervangen zijn scenario's opgesteld die uitgaan van verschillende waterstofvragen.

4 Scenario's

In dit hoofdstuk zijn de toekomstscenario's voor de waterstoftransitie in de haven van Rotterdam uitgewerkt. Dit hoofdstuk beantwoord daarmee deelvraag 2: "Welke scenario's met betrekking tot de waterstofambities in 2050 zijn toepasbaar op de haven?".

Conform hoofdstuk 3 Waterstoftrends wordt waterstof in de toekomst gebruikt voor industriële processen, in de mobiliteit en in de gebouwde omgeving. Tevens vormt de Rotterdamse haven een belangrijke locatie voor het vervoer van waterstof naar andere gedeeltes van noordwest Europa waardoor er in de op te stellen scenario's ook rekening gehouden dient te worden met het vervoer van waterstof door de Rotterdamse haven.

Besloten is om binnen de scenario's rekening te houden met de waterstof welke benodigd is voor de industrie in de Rotterdamse haven en de te vervoeren hoeveelheid waterstof door de haven naar de rest van noordwest Europa. Hiermee wordt de hoeveelheid waterstof welke nodig is voor de mobiliteit en de gebouwde omgeving buiten beschouwing gelaten. Hiervoor is gekozen omdat deze twee toepassingen moeilijk te kwantificeren zijn en ook niet bij de scope van de opdracht aansluiten.

In paragraaf 4.1 wordt allereerst scenario's opgesteld voor de benodigde waterstof voor de industrie in de Rotterdamse haven. In paragraaf 4.2 wordt ingegaan op de hoeveelheid waterstof welke door de Rotterdamse haven wordt vervoerd. In paragraaf 4.3 worden vervolgens de gegevens gecombineerd en uitgewerkt tot scenario's waarna in paragraaf 4.4 de deelvraag beantwoord zal worden.

4.1 Waterstof benodigd voor industrie in de Rotterdamse haven

Om scenario's op te stellen is een theorie gezocht welke aansluit bij dit project (zie Bijlage 2 Theorie opstellen scenario's). Conform deze theorie worden de toekomstscenario's opgesteld aan de hand van de kruis-impact methode. In hoofdstuk 2 is vastgesteld dat eerst verschillende rapporten met scenario's worden. Deze worden getoetst aan vooraf opgestelde indicatoren hoe toepasbaar de scenario's zijn voor dit project. De gekozen scenario's worden gezamenlijk met de scenario's aangaande de waterstof die door de Rotterdamse haven wordt vervoerd samengevoegd in paragraaf 4.3.

4.1.1 Keuze rapport

In deze paragraaf worden de gekozen rapporten met scenario's (zie Bijlage 4 Inventarisatie rapporten "waterstof benodigd voor industrie in de Rotterdamse haven") beoordeeld op de opgestelde indicatoren (voor een uitgebreidere uitleg, zie Bijlage 3 Indicatoren toepasbaarheid scenario's "waterstof benodigd voor industrie in de Rotterdamse haven").:

- Indicator 1: Hebben de scenario's in het rapport als thema de toekomst van de haven van Rotterdam of over de waterstoftransitie?
- Indicator 2: Is het scenario onderbouwd met inzichten van experts?
- Indicator 3: Het scenario beslaat een tijdshorizon tot 2050?
- Indicator 4: Het scenario is actueel?
- Indicator 5: Is het scenario voldoende onderbouwd om bruikbaar te zijn voor de geplande uitwerking?

Zoals gesteld in de methode worden de scenario's beoordeeld met +, +/- en – op elk van de indicatoren. De resultaten zijn opgenomen in Tabel 5:

Tabel 5: Keuze tabel scenario's

Rapport	Indicator 1 - Thema	Indicator 2 – Experts	Indicator 3 - 2050	Indicator 4 - Actueel	Indicator 5 - Uitwerking
1: Energie- infrastructuur in het Rotterdamse havengebied	+	+ (mits achterliggende data beschikbaar is)	+	+ (maart 2019)	+/-
2: Decarbonization Pathways for the Industrial Cluster of the Port of Rotterdam	+/-	+	+	+	+/-
3: Blue hydrogen as accelerator and pioneer for energy transition in the industry	+	+	+/-	+	+
4: Havenvisie Rotterdam	-	+	+	+(november 2019)	-
5: In drie stappen naar een duurzaam industriecluster Rotterdam-Moerdijk in 2050	-	+	+	+(juli 2018)	+/-

Rapport 1 voldoet aan meeste gestelde indicatoren: Het gaat over het juiste thema, is door experts opgesteld, heeft een horizon tot 2050 en is actueel. Het nadeel van rapport 1 is echter dat het een kort en bondig rapport is en daardoor niet veel aanknopingspunten geeft voor de verdere uitwerking, het heeft een relatief hoog abstractieniveau. Hierom scoort rapport 1 op indicator 5 een +/-.

Rapport 2 voldoet aan drie van de vijf indicatoren. Dit rapport is breed onderbouwd maar heeft een andere focus dan de focus van dit project. Hierdoor scoort rapport 2 op indicatoren 1 en 5 een +/-.

Rapport 3 voldoet aan vier van de vijf indicatoren. Alleen op de indicator omtrent de streeftijd van het rapport wordt een +/- gescoord. Het rapport focust zich op een tijdsperiode tot en met 2030 i.p.v. 2050. Echter is wel een aanvullende samenvatting gevonden waarbij het project wordt doorgetrokken tot aan 2050. Hiermee is de score van +/- gerechtvaardigd.

Rapport 4 voldoet aan drie van de vijf indicatoren. Dit rapport komt echter te kort als het gaat om het thema (het rapport schets vooral doelen en kaders voor de toekomstige ontwikkeling en niet zozeer scenario's) en de uitwerking (vooral verwoord in doelen en niet concreet).

Rapport 5 voldoet aan drie van de vijf indicatoren. Dit rapport voldoet niet aan de eerste indicator omdat het rapport 1) geen echte scenario's schetst en 2) een net andere focus heeft (focust bij het verduurzamen vooral op een CO₂-reductie). Aan de vijfde indicator is een +/- toebedeeld omdat het rapport wel een onderbouwd inzicht geeft in de energiestromen maar hierbij net een andere focus heeft dan benodigd.

Uit de analyse van de rapporten blijkt dat het derde rapport (Blue hydrogen as accelerator and pioneer for energy transition in the industry) het beste scoort en dus het meest bruikbare is voor gebruik in dit project. Vooral de focus, uitwerking en scenario's zijn positieve punten van dit rapport. De uitwerking van de scenario's zoals deze in het rapport staan (zie Tabel 17), zijn al in een soort

kruis-impactanalyse uitgewerkt. De scenario's worden in de volgende paragraaf uitgebreid met informatie.

4.1.2 Keuze scenario's

Gekozen is om de scenario's uit het rapport "Blue hydrogen as accelerator and pioneer for energy transition in the industry" verder uit te werken. In Tabel 6 is nogmaals de overzichtstabel van de scenario's weergegeven welke door het rapport is uitgewerkt. Deze scenario's zijn al in een kruis-impact analyse stijl weergegeven aangezien verschillende voorvallen met elkaar kunnen worden vergeleken.

Tabel 6: Overzichtstabel scenario's "Blue hydrogen as accelerator and pioneer for energy transition in the industry" rapport

Solution space		Development concepts Our world that we control, we decide			
		0. Do nothing	1. Minimum scope Refineries only	2. Reference scope No regret, accelerated CO ₂ reduction	3. Maximum scope Refineries + powerplants
Scenarios The outside world that we cannot control	A. As Usual World	A0	A1	A2	A
	B. Economical World	B0	B1	B2	B3
	C. Sustainable World	C0	C1	C2	C3

In de overzichtstabel zijn twee verschillende werelden vergeleken (H-vision, 2019):

- 1. De wereld waar geen directe invloed op kan worden uitgeoefend** (verticale as)
 Dit is de wereld waar vanuit de haven geen directe invloed op kan worden uitgeoefend (algemene economische en technische ontwikkelingen). Hierbij zijn drie mogelijkheden:
 - De wereld zoals altijd - In deze wereld komen er geen grote veranderingen in de politiek of ontwikkelingen rondom deze transitie. De prijzen en de belangrijkste technologieën volgen de huidige trend en er vindt geen versnelling plaats in het verminderen van de CO₂ uitstoot. De CO₂ emissieprijzen zijn maximaal 44 euro/ton en de prijs van gas is maximaal 29 euro/MWh in 2045.
 - De economische wereld - In deze wereld vindt een sterke economische groei plaats en een continue ambitie om de klimaatdoelen te halen leidt tot een beperking van grondstoffen. Dit leidt tot verhoogde grondstofprijzen en het versnellen van de ontwikkeling van technologieën. De CO₂ emissieprijzen zijn maximaal 149 euro/ton en de prijs van gas is maximaal 34 euro/MWh in 2045.
 - De duurzame wereld - In deze wereld leidt de implementatie van baanbrekend klimaatbeleid tot een tekort op de CO₂ markt en aan economische nood. Dit resulteert in een verhoging van de CO₂ prijzen en een vermindering van alle andere prijzen (bijv. natuurlijk gas en elektriciteit). De CO₂ emissieprijzen is maximaal 149 euro/ton en de prijs van gas in maximaal 24 euro/MWh in 2045.
- 2. De wereld waar directe invloed op kan worden uitgeoefend** (horizontale as)
 Dit is de wereld waar vanuit de haven directe invloed op kan worden uitgeoefend (regelgeving die door de haven wordt afgegeven). Hierbij zijn vier mogelijkheden:
 - Niks doen - In deze scope zijn er geen veranderingen t.o.v. het huidige beleid. De bestaande kolencentrales in de haven worden veranderd naar biomassacentrales en

het daaropvolgende tekort aan elektriciteitsproductie wordt gedekt door de bestaande gascentrales (zoals nu ook al het plan is).

- Minimale scope – Deze scope bevat minimale aanpassingen voor de bestaande raffinaderijen en energiecentrales. Dit leidt tot ongeveer 2 Mt opgeslagen CO₂ per jaar.
- Referentie scope – Deze scope bevat significante veranderingen van de bestaande raffinaderijen en energiecentrales. Dit leidt tot ongeveer 6 Mt opgeslagen CO₂ per jaar.
- Maximale scope – Deze scope bevat een maximale transformatie van de bestaande installaties van de H-vision deelnemers plus veranderingen aan de installaties van partijen welke momenteel niet betrokken zijn (Exxon, Gunvor e.d.). Dit leidt tot ongeveer 10 Mt opgeslagen CO₂ per jaar.

Nu de tabel is beschreven is het, conform de kruis-impact analyse, belangrijk om te kijken met welke scenario's verder worden gewerkt.

Voor de verdere uitwerking van het verslag zal met de code van de scenario's worden gewerkt conform Tabel 6 (bijv. A0, B2 etc.).

Bij de keuze voor welke scenario's uitgewerkt moeten worden vallen de in Tabel 6 rood gearceerde scenario's (B1, C1 en A3) af. Hiervan vermeld het rapport zelf dat deze niet meegenomen zijn in de verdere uitwerking gebaseerd op expertkennis. Bij de overgebleven negen groen gearceerde scenario's is gekozen om een selectie uit te werken. Hiervoor is gekozen omdat de beschikbare tijd en capaciteit van de projectgroep het niet toestaat om alle negen scenario's uit te werken. Bij de selectie moet afgewogen worden of de geselecteerde scenario's samen een representatief beeld vormen voor alle scenario's.

Gekozen is om vier verschillende scenario's uit te werken:

- **Scenario A0** Dit scenario fungeert als het baseline scenario van waaruit de rest van de scenario's worden gebouwd. Het is een combinatie van een wereld die doorgaat op de huidige trend en de haven van Rotterdam die zelf ook weinig veranderd.
- **Scenario A1** Dit scenario fungeert als het minimale scenario. Het combineert een minimale wereldwijde inspanning (de A-scenario's) met een minimale inspanning van de haven van Rotterdam (de 1-scenario's).
- **Scenario B2** Dit scenario fungeert als het middelste scenario. Het combineert een significante wereldwijde verandering (de B-scenario's) met een significante verandering in de haven van Rotterdam (de 2-scenario's).
- **Scenario C3** Dit scenario fungeert als het maximale scenario. Het combineert een maximale wereldwijde inspanning (de C-scenario's) met een maximale inspanning in de haven van Rotterdam zelf (de 3-scenario's).

Tezamen vormen de gekozen scenario's een representatieve afspiegeling van alle scenario's omdat alle wereldwijde veranderingen met de veranderingen in de haven van Rotterdam worden gecombineerd. Hierbij is gekozen om een bepaalde wereldwijde inspanning te combineren met dezelfde inspanning in de haven van Rotterdam omdat dit het meest waarschijnlijke is.

4.2 Waterstof vervoerd door de Rotterdamse haven

Conform de opgestelde methode zouden, net als in paragraaf 4.1, indicatoren opgesteld moeten worden, rapporten met scenario's moeten worden gezocht en deze toetsen aan de indicatoren waarna de scenario's worden uitgewerkt. Tijdens het doen van dit onderzoek is echter gebleken dat er maar één concrete bron is die inzicht geeft hoeveel waterstof er door de Rotterdamse haven wordt getransporteerd. Om deze reden is besloten om van de vooraf opgestelde methode af te wijken en alleen deze bron uit te werken.

De bron welke concreet inzicht geeft in de hoeveelheid waterstof welke vervoerd wordt door de Rotterdamse haven is afkomstig van de Port of Rotterdam (havenbedrijf Rotterdam). In al zijn stukken gaat het Rotterdamse havenbedrijf uit van een transport van 20 Mt/jaar waterstof door de haven in 2050. Na verder onderzoek in de stukken blijkt dat het havenbedrijf dit aanmerkt als een ambitieus scenario.

Deze hoeveelheid dient gecombineerd te worden met de scenario's voor de hoeveelheid waterstof welke door de industrie worden gebruikt. Om hierop aan te sluiten zijn vier verschillende waarden nodig om bij elke van de scenario's aan te sluiten. Echter is er maar een concreet cijfer voor een ambitieus scenario. Besloten is om deze 20 Mt/jaar te koppelen aan het meest ambitieuze scenario (C3) en te berekenen wat procentueel de verschillen zijn tussen de scenario's voor de benodigde waterstof in de industrie. Deze percentages zullen vervolgens ook worden toegepast op de gevonden 20 Mt/jaar. Het gebruik van deze procentuele verschillen is misschien niet optimaal maar bedacht moet worden dat in het gebruikte rapport voor de benodigde waterstof in de industrie rekening wordt gehouden met wereldwijde veranderingen op het gebied van vraag en aanbod naar waterstof. Hiermee kunnen de geschetste waarden ook worden gebruikt voor de doorvoer van waterstof in de Rotterdamse haven (zie In bijlage 8 is het schema weergegeven voor het bepalen van de optimale verdeling in van de buisdiameters. In deze afweging is ervan uitgegaan dat een tweetal pijpleidingen de maximale hoeveelheid leidingen is.).

Tabel 7: Omrekening hoeveelheid waterstof, voor de verschillende scenario's, getransporteerd gaat worden door de Rotterdamse haven (voor berekening, zie Bijlage 6 Onderbouwing transport waterstof door de Rotterdamse haven in 2050). * is bepaald middels een andere manier (voor bepaling, zie Bijlage 6 Onderbouwing transport waterstof door de Rotterdamse haven in 2050).

Scenario	Benodigde hoeveelheid waterstof (kt/jaar) door industrie in 2050 (H-vision, 2019)	Percentage	Hoeveelheid waterstof (Mt/jaar) getransporteerd door de haven in 2050
A0*	0		0,5
A1	271	<- 22,49% ->	4,49
B2	666	<- 55,27% ->	11,05
C3	1205	<- 100% ->	20

4.3 Samenvoeging scenario's en verdere uitwerking

In deze paragraaf worden de scenario's van de benodigde waterstof voor de industrie in de haven samengevoegd met de scenario's voor het transport van waterstof door de haven (naar: (H-vision, 2019), Hoofdstuk 3 Waterstoftrends en kennis van experts verkregen middels interviews).

Scenario A0

Scenario A0 zal fungeren als 0-scenario van waaruit de rest van de scenario's worden gebouwd. Het is een combinatie van een wereld die doorgaat op de huidige trend en de haven van Rotterdam die zelf ook weinig veranderd. Bij dit scenario wordt aangenomen dat de bestaande kolencentrales in de Rotterdamse haven worden omgebouwd tot biomassacentrales en dat het daaropvolgende tekort aan elektriciteitsproductie wordt gedekt door de bestaande gascentrales.

- Totale hoeveelheid waterstof door pijpleidingen in de Rotterdamse haven: 0,5 Mt/jaar
 - Waterstof vervoerd door de Rotterdamse haven: 0,5 Mt/jaar
 - Waterstofvraag vanuit de industrie: Geen
- Koolstofopvang: Geen

Scenario A1

Het scenario A1 fungeert als het minimale scenario. Het combineert een minimale wereldwijde inspanning met een minimale inspanning van de haven van Rotterdam. Aangenomen wordt dat in dit scenario minimale veranderingen plaatsvinden aan de bestaande raffinaderijen en elektriciteitscentrales die zich in de Rotterdamse haven bevinden.

Waterstof voor de industrie in de Rotterdamse haven wordt in dit scenario gemaakt van natuurlijk- of geraffineerd gas door één of meerdere productiefaciliteiten op de Maasvlakte. De benodigde zuurstof voor dit proces wordt verstrekt door een nieuwe zuurstoffaciliteit.

In dit scenario zal het minimale CO₂ afvangpercentage in de industrie 88% bedragen wat resulteert in een maximum CO₂ volume van 2,2 Mtpa dat wordt vervoerd en opgeslagen via het Porthos project. De waterstofbrandstof wordt getransporteerd middels nieuwe lokale pijpleidingen in een nieuw distributienet. Flexibiliteit op korte en lange termijn zal worden geboden door flexibele productie en dus is er geen waterstofopslag benodigd.

De hoeveelheid waterstof die middels de Rotterdamse haven vervoerd zal worden, neemt toe van 0,5 Mt/jaar nu naar 4,49 Mt/jaar in 2050. Dit door een minimale wereldwijde inspanning om de klimaatdoelstellingen te halen.

- Totale hoeveelheid waterstof door pijpleidingen in de Rotterdamse haven: 4,761 Mt/jaar
 - Waterstof vervoerd door de Rotterdamse haven: 4,49 Mt/jaar
 - Waterstofvraag: 1190 MWh
 - 271 Kt/jaar middels omrekening (zie Bijlage 3 Indicatoren toepasbaarheid scenario's "waterstof benodigd voor industrie in de Rotterdamse haven")
- Koolstofopvang: 2,2 Mtpa

Scenario B2

Het scenario B2 fungeert als het middelste scenario. Het combineert een significante wereldwijde verandering met een significante verandering in de haven van Rotterdam. Aangenomen wordt dat er bij dit scenario een significante verandering plaatsvindt bij de bestaande raffinaderijen en elektriciteitscentrales.

In dit scenario wordt het waterstof dat benodigd is voor de industrie in de Rotterdamse haven gemaakt van natuurlijk- of geraffineerd gas bij één ATR-productiefaciliteit (ATR-variant – Auto-Thermal Reforming). De verwachte benodigde waterstofproductiecapaciteit van 3210 MW kan worden bereikt in 5 jaar.

In dit scenario zal het minimale CO₂ afvangpercentage in de industrie 88% bedragen wat resulteert in een maximum CO₂ volume van 5,5 Mtpa dat wordt vervoerd en opgeslagen via het Porthos project. De waterstofbrandstof wordt naar de eindgebruikers getransporteerd via nieuwe lokale pijpleidingen in een nieuw distributienet. Flexibiliteit op korte en lange termijn zal zijn geleverd door flexibele productie en netwerkopslag.

De hoeveelheid waterstof die middels de Rotterdamse haven vervoerd zal worden, neemt toe van 0,5 Mt/jaar nu naar 11,05 Mt/jaar in 2050. Dit door een significante wereldwijde inspanning om de klimaatdoelstellingen te halen.

- Totale hoeveelheid waterstof door pijpleidingen in de Rotterdamse haven: 11,716 Mt/jaar
 - Waterstof vervoerd door de Rotterdamse haven: 11,05 Mt/jaar
 - Waterstofvraag: 3210 MWh
 - 666 Kt/jaar middels omrekening (zie Bijlage 3 Indicatoren toepasbaarheid scenario's "waterstof benodigd voor industrie in de Rotterdamse haven")
- Koolstofopvang: 5,5 Mtpa

Scenario C3

Het scenario C3 fungeert als het maximale scenario. Het combineert een maximale wereldwijde inspanning met een maximale inspanning in de haven van Rotterdam zelf. Aangenomen wordt dat bij dit scenario maximale aanpassingen plaatsvinden bij de raffinaderijen, participanten van het H-vision project en aan installaties van derden in de haven van Rotterdam.

In dit scenario wordt waterstof voor de Rotterdamse industrie gemaakt van natuurlijk- of geraffineerd gas bij één of meerdere ATR-productiefaciliteiten op één geconcentreerde plek op de Maasvlakte. Het zuurstof toevoer wordt geleverd door een nieuw te bouwen zuurstoffaciliteit.

In dit scenario zal het minimale CO₂ afvangpercentage in de industrie 88% bedragen wat resulteert in een maximum CO₂ volume van 9,4 Mtpa dat wordt vervoerd en opgeslagen via een opgeschaald Porthos project. De waterstof wordt via een nieuw distributienetwerk naar de eindgebruikers getransporteerd. Het transport vindt plaats door een nieuw speciaal pijpleidingnetwerk. Flexibiliteit op korte en lange termijn zal worden geboden door flexibele productie en het gebruik van grootschalige ondergrond opslag in zoutcavernes of bijna lege gasvelden.

De hoeveelheid waterstof die middels de Rotterdamse haven vervoerd zal worden, neemt toe van 0,5 Mt/jaar nu naar 20 Mt/jaar in 2050. Dit door een maximale wereldwijde inspanning om de klimaatdoelstellingen te halen.

- Totale hoeveelheid waterstof door pijpleidingen in de Rotterdamse haven: 21,05 Mt/jaar
 - Waterstof vervoerd door de Rotterdamse haven: 20 Mt/jaar
 - Waterstofvraag: 5280 MWh
 - 1205 Kt/jaar middels omrekening (zie Bijlage 3 Indicatoren toepasbaarheid scenario's "waterstof benodigd voor industrie in de Rotterdamse haven")
- Koolstofopvang: 9,4 Mtpa

Opmerkingen bij de scenario's

De scenario's zoals hierboven beschreven hebben een aantal basisaannames welke, door nieuwe inzichten sinds het uitbrengen van het rapport, genuanceerd moeten worden:

- Het rapport gaat volledig uit van blauwe waterstof al blijkt uit hoofdstuk 3 dat waarschijnlijk groene waterstof rond 2050 een even interessante businesscase gaat vormen. Uit een interview met een betrokkene blijkt dat in het rapport wel voor een gedeelte rekening wordt gehouden met groene waterstof maar er moeten worden afgevraagd of dit voldoende is.
- De cijfers voor waterstofvraag en koolstofopvang zijn gebaseerd op de meest recente openbare uitgaven van het H-vision project. Via een interview is de projectgroep op de hoogte gekomen van een vernieuwde uitgave waarin geüpdatete waarden staan. Ondanks meerdere verzoeken worden deze cijfers niet gedeeld en wordt dit rapport dus gebaseerd op "verouderde" cijfers.
- Uit het rapport blijkt dat de benodigde hoeveelheid waterstof erg samenhangt met de economische activiteit in het Rotterdamse havengebied. Vanwege de coronacrisis gaat waarschijnlijk de economische activiteit achteruit waardoor het logisch zou zijn dat het H-

vision project ook achteruit zou gaan. Middels diverse interviews en hoofdstuk 3 is echter vastgesteld dat de coronacrisis de waterstoftransitie eerder zal versnellen dan vertragen. Het project wordt voornamelijk door de overheid getrokken en die geeft juist, in het corona herstellfonds, meer geld uit aan de waterstoftransitie.

4.4 Beantwoording deelvraag 2

In dit hoofdstuk is deelvraag 2 beantwoord: “Welke scenario’s met betrekking tot de waterstofambities in 2050 zijn toepasbaar op de haven?”. Deze deelvraag is in twee gedeelten onderzocht.

In het eerste gedeelte is onderzoek gedaan naar scenario’s omtrent de waterstof die benodigd is voor de industrie in de Rotterdamse haven. Nadat de verschillende scenario’s/ rapporten getoetst zijn aan deze indicatoren bleek dat de scenario’s uit het rapport “Blue hydrogen as accelerator and pioneer for energy transition in the industry” het bruikbaarste zijn voor dit project.

Dit rapport schetst de volgende scenario’s:

Tabel 8: Overzichtstabel scenario's uit het “Blue hydrogen as accelerator and pioneer for energy transition in the industry” rapport

Solution space		Development concepts Our world that we control, we decide			
		0. Do nothing	1. Minimum scope Refineries only	2. Reference scope No regret, accelerated CO ₂ reduction	3. Maximum scope Refineries + powerplants
Scenarios The outside world that we cannot control	A. As Usual World	A0	A1	A2	A
	B. Economical World	B0	B1	B2	B3
	C. Sustainable World	C0	C1	C2	C3

Voor de verdere uitwerking is gekozen om de scenario’s A0, A1, B2 en C3 te gebruiken. Deze scenario’s tezamen weerspiegelen alle scenario’s die in het rapport gesteld worden. Hiermee zijn deze scenario’s tot de best toepasbare scenario’s met betrekking tot de waterstofambities in de haven van Rotterdam voor 2050 gekozen. Deze scenario’s zijn vervolgens berekend op de benodigde jaarlijkse hoeveelheid waterstof.

Deze scenario’s zijn in het tweede gedeelte uitgebreid met hoeveelheden waterstof welke door de Rotterdamse haven moeten worden vervoerd. Deze aantallen zijn bepaald door de verwachte hoeveelheid waterstof om te rekenen met de procentuele veranderingen tussen de scenario’s.

De scenario’s welke bij de verdere uitwerking mee worden genomen zijn:

- **Scenario A0** – het 0 scenario
 - Totale hoeveelheid waterstof door buisleidingen in de Rotterdamse haven: 0,5 Mt/jaar
- **Scenario A1** – het minimale scenario
 - Totale hoeveelheid waterstof door buisleidingen in de Rotterdamse haven: 4,761 Mt/jaar
- **Scenario B2** – het middelste scenario
 - Totale hoeveelheid waterstof door buisleidingen in de Rotterdamse haven: 11,716 Mt/jaar
- **Scenario C3** – het maximale scenario
 - Totale hoeveelheid waterstof door buisleidingen in de Rotterdamse haven: 21,05 Mt/jaar.

5 Bestaand distributienetwerk

In dit hoofdstuk wordt het huidige distributienetwerk in de haven van Rotterdam geanalyseerd om deelvraag 3: wat is de invloed van de waterstoftransitie op het bestaande distributienetwerk te beantwoorden.

Het huidige waterstofnetwerk wordt in paragraaf 5.1 geanalyseerd en in paragraaf 5.2 wordt het huidige aardgasnetwerk geanalyseerd.

5.1 Huidig waterstofnetwerk

De huidige waterstofinfrastructuur in de haven van Rotterdam bestaat uit twee leidingen die in het beheer zijn van Air Products en van Air Liquide (At Osborne, 2018). De waterstofleiding van Air Liquide komt vanuit Noord-Frankrijk via Antwerpen naar Rotterdam richting de raffinaderijen (zie Figuur 8) en heeft een lengte van ongeveer 1000 km (Air Liquide, sd) (At Osborne, 2018) (DNV GL, 2017). De specificaties van deze leiding van Air Liquide is zichtbaar in Tabel 9. Het waterstofnetwerk van Air Products in Rotterdam heeft een omvang van ongeveer 140 km (DNV GL, 2017).

Tabel 9: Specificaties waterstofleiding Air Liquide (Tebodin Netherlands B.V., 2015)

Inwendige diameter (mm)	Wanddikte (mm)	Bedrijfsdruk (barg)	Debiet (nm ³ /hr)
156,1	6,4	100	100.000

Uit additionele rapporten en documenten met betrekking tot waterstofinfrastructuur (DNV GL, 2017) (DNV GL, 2019) (DNV GL, 2020) (Gasunie, TenneT, 2019) (van Soest & Warmenhoven, 2019) blijkt echter dat er naast de twee eerdergenoemde waterstofnetwerken er in de haven van Rotterdam verder geen waterstofinfrastructuur aanwezig is. In deze rapporten en documenten wordt er naast het huidige waterstofnetwerk ook gerefereerd naar het aanpassen van het huidige aardgasnetwerk voor het transport van waterstof.



Figuur 8: Locatie waterstofleiding Air Liquide (rode lijn) in de Rotterdamse haven (Tebodin Netherlands B.V., 2015)

5.2 Huidig aardgasnetwerk

Uit meerdere rapporten, bijvoorbeeld (DNV GL, 2017) (DNV GL, 2019) (Gasunie, TenneT, 2019) (van Soest & Warmenhoven, 2019), blijkt dat aardgasleidingen mogelijk aangepast kunnen worden voor het transport van waterstof. Hierdoor wordt in deze paragraaf het huidige aardgasnetwerk geanalyseerd. Het aanpassen van het aardgasnetwerk voor het transport van waterstof is interessant omdat het streven is om in 2022 de Groningse gaskraan nagenoeg volledig dicht te draaien waardoor deze leidingen niet meer gebruikt worden (Rijksoverheid, 2020).

Hierdoor wordt het hoofdtransportleidingnet (HTL) in en rondom de haven van Rotterdam geanalyseerd, doordat dit leidingnet op een kortere termijn vrij komt dan het regionale leidingennet.

5.2.1 Aardgasnetwerk Rotterdam

Het aardgasnetwerk in en rondom de haven van Rotterdam bestaat uit drie soorten leidingen: G-gas leidingen, H-gas leidingen en lokale leidingen (zie Figuur 9). Van deze drie soorten behoren de G-gas en H-gas leidingen tot het hoofdtransportleidingnet (HTL) en de lokale leidingen tot het regionale transportleidingnet (RTL) (Gasunie Transport Services, 2015). Door de G-gas leidingen wordt op dit moment nog het Groningse gas getransporteerd en is dus voor dit onderzoek interessant. Door de H-gas leidingen wordt geïmporteerd gas getransporteerd. Het onderscheid tussen de G-gas leidingen en H-gas leidingen komt door de calorische waarde. De calorische waarde geeft de hoeveelheid energie van gas per kubieke meter en is voor G-gas ongeveer 35MJ/m^3 , voor H-gas ongeveer 40MJ/m^3 (de calorische waarde van waterstof is ongeveer 12MJ/m^3) (DNV GL, 2017).



Figuur 9: Gasnetwerk Gasunie (Gasunie Transport Services, 2015)

5.2.2 Hoofdtransportleidingnet

Binnen het HTL-systeem van de Gasunie zijn de G-gas leidingen het meest interessant om aan te passen voor het transport van waterstof. In deze paragraaf wordt daarom het HTL-systeem geanalyseerd. Hierbij wordt er gekeken naar de (transport-) specificaties en de aanwezige tussenstations.

Het aardgas komt het HTL-systeem binnen via productie, interconnectiepunten, mengstations, gasopslag en/of LNG en verlaat het systeem via de meet- en regelstations, HTL-gasontvangststations en/of interconnectiepunten. Tussen het begin- en eindpunt wordt het gas op druk gebracht door middel van compressorstations (Gasunie Transport Services, 2014).

Specificaties hoofdtransportleidingnet

De (maximale) gasdruk in het HTL-systeem bedraagt 67,2 bar, 71,2 bar of 80,9 bar, dit verschilt echter per traject (Gasunie Transport Services, 2014). Het gas kan worden getransporteerd binnen een temperatuurbereik van +50°C en -20°C, echter wordt het transport beneden 0°C afgeraden in verband met staal en coating problemen. Het HTL-systeem wordt zodanig ontworpen dat de transportsnelheid van het gas onder de 20m/s ligt (Gasunie Transport Services, 2014). In Tabel 10 zijn de inwendige diameters weergegeven per pijpmaat (nominale diameter) en gasdruk die worden gebruikt door de Gasunie. Hierin is de pijpmaat of nominale diameter een dimensieloos kengetal die de (nominale) diameters ongeveer in millimeters aangeeft.

In de omgeving van Rotterdam en de haven heeft de G-gas leiding van de Gasunie ter hoogte van Spijkenisse en Hoogvliet een diameter van 914mm (36 inch) en een druk van 67,2 bar (DCMR Milieudienst Rijnmond, 2011) (Gemeente Rotterdam, 2009). Deze G-gas leiding loopt van de Tweede Maasvlakte naar Wijngaarden en is ongeveer 70 kilometer lang (van den Berg, 2020).

Tabel 10: Inwendige diameters HTL-systeem Gasunie (Gasunie Transport Services, 2014)

Nominale diameter (mm)	Nominale diameter (inch)	Inwendige diameter (mm)	
		HTL tot 67,2 bar	HTL tot 80,9 bar
100	4	105	105
150	6	159	156
200	8	207	207
250	10	258	258
300	12	314	312
400	16	394	393
450	18	444	443
500	20	494	492
600	24	595	591
750	30	745	742
900	36	894	890
1050	42	1044	1039
1200	48	1192	1187

Tussenstations

In en rondom de haven van Rotterdam zijn er naast de buisleidingen zelf ook meet- en regelstations, reduceerstations en mengstations aanwezig (zie Figuur 9). In de meet- en regelstations komen de aardgasleiding weer boven de grond en wordt de druk omlaag gebracht. Daarnaast wordt er in de meet- en regelstations een geurstof toegevoegd aan het aardgas ten behoeve van de veiligheid (Gasunie, sd).

In de reduceerstations wordt de druk aan de inlaat- of uitlaatzijde gehandhaafd of voor het handhaven van een bepaalde 'flow' door middel van druk reductie (Gasunie Transport Services, 2014).

In de mengstations worden gassen met verschillende samenstellingen gemengd onder handhaving van een gewenste kwaliteit (Gasunie Transport Services, 2014).

Een ander tussenstation in het aardgasnetwerk van de Gasunie is een compressorstation. In een compressorstation wordt de druk binnen de leidingen verhoogd, dit gebeurt ongeveer elke 100 kilometer. Dit wordt gedaan doordat het gas over lange afstanden druk verliest (Gasunie, sd). De Gasunie heeft 22 compressorstations in Nederland, waarvan er tenminste 4 elektrisch aangedreven zijn (Gasunie, sd) (Brendel, 2010). In deze compressorstations worden voornamelijk roterende compressoren gebruikt (Lensvelt, 2020). In en rondom de haven van Rotterdam is echter geen

compressorstation aanwezig, het dichtstbijzijnde compressorstation is gelegen in Wijngaarden (zie Figuur 9). Dit compressorstation is onderdeel van het H-gasnetwerk.

5.3 Beantwoording deelvraag 3

In dit hoofdstuk is deelvraag 3 beantwoord: 'Wat is de invloed van de waterstoftransitie op het bestaande distributienetwerk?' Hierbij is er eerst gekeken naar het bestaande waterstofnetwerk in de haven van Rotterdam. Dit netwerk bestaat uit een tweetal pijpleidingen van Air Liquide en van Air Products, bestemd voor de petrochemische industrie. De pijpleiding van Air Liquide is echter relatief klein (transportcapaciteit van ongeveer 100.000m³/hr) en dus minder geschikt voor het transporteren van hoeveelheden waterstof zoals beschreven in hoofdstuk 4: Scenario's. Na de analyse van het huidige waterstofnetwerk is de focus verlegd naar het bestaand aardgasnetwerk doordat het een optie is om de huidige aardgasinfrastructuur aan te passen voor het transport van waterstof. Dit is een interessante optie doordat de Groningse gaskraan wordt dichtgedraaid en de bijbehorende pijpleidingen op termijn niet meer gebruikt gaan worden. In en rondom de haven van Rotterdam liggen twee soorten gasleidingen van de Gasunie: een H-gas leiding en een G-gas leiding. Door de H-gas leiding wordt hoogcalorisch gas getransporteerd dat hoofdzakelijk geïmporteerd wordt. Door de G-gas leiding wordt Gronings gas getransporteerd en is dus op termijn interessant voor het omvormen voor het transport van waterstof. Deze G-gas leiding loopt van de Tweede Maasvlakte naar Wijngaarden en is ongeveer 70 kilometer lang en heeft een doorsnee van 36 inch (914mm).

6 Waterstof in het energienetwerk

Binnen dit hoofdstuk wordt antwoord gegeven op deelvraag 4: ‘Op welke haalbare wijze kan een waterstofdistributienetwerk gerealiseerd worden?’ Voor de beantwoording van deze deelvraag is ten eerste beschreven wat de mogelijkheden zijn met betrekking tot het vervoeren van waterstof door een pijpleiding (zie paragraaf 6.1). Hierna is beschreven wat de parameters voor het ontwerp zijn om de vraag naar waterstof uit de scenario’s te kunnen faciliteren (zie paragraaf 6.2). Vervolgens is beschreven wat het meest rendabel pad is om te bewandelen door de tijd in een beslisboom en wat dus de meest haalbare wijze is (zie paragraaf 6.3).

6.1 Transport van waterstof

Het vervoeren van waterstof over het water (schepen), over de weg (vrachtwagens) of over rails (trein) biedt niet de stabiliteit die met het transporteren door pijpleidingen wel gegarandeerd kan worden. Met de blik op leveringszekerheid, veiligheid en kosten zijn pijpleidingen het meest effectief voor het transporteren van grote hoeveelheden waterstof (Port of Rotterdam, 2020). Een pijpleiding is voor het transporteren een grote vraag aan waterstof de meest rendabele keuze (Shell, 2017). Binnen deze paragraaf is beschreven wat de mogelijkheden zijn voor het transporteren van waterstof door een pijpleiding, wat de compressie technieken zijn en op welke wijze waterstof kan worden opgeslagen.

6.1.1 Aanpassen bestaand aardgas netwerk

Waterstof kan getransporteerd worden in bestaande pijpleidingen die zijn gerealiseerd van aardgas (Wang, van der Leun, Peters, & Buseman, 2020). Hierbij is drukval (drukverschil tussen het begin- en eindpunt) de kritische parameter voor de dimensionering van een pijpleidingnetwerk en de belangrijkste parameter hiervoor is de energiedichtheid (calorische waarde) van waterstof ten opzichte van aardgas. Een debiet van waterstof (wat ongeveer drie keer groter is dan dat van aardgas) heeft ongeveer dezelfde drukval en dus ook dezelfde energiedichtheid. Dit heeft te maken met de chemische eigenschappen van waterstof (Wang, van der Leun, Peters, & Buseman, 2020). De bestaande gaspijpleiding kan bij een gelijkblijvende drukval 98% van de energie transporteren vergeleken met Groningen gas (L-gas) en 80 % in vergelijking met hoogcalorisch aardgas (H-gas) (DNV GL, 2017). Zo kan een 48 inch pijpleiding 13 GW aan waterstof vervoeren en een 36 inch pijpleiding 7 GW. Deze capaciteit is echter lager dan de maximale belasting. Uit onderzoek is gebleken dat het transporteren van waterstof op een mindere capaciteit voordeliger is voor de transportkosten doordat hoge initiële extra kosten voor compressor capaciteiten en het bijbehorende energiegebruik kunnen worden voorkomen (Wang, van der Leun, Peters, & Buseman, 2020).

Het huidige gasdistributienetwerk zal geen significante invloed ondervinden van waterstof. Voor alle bekende materialen, met als belangrijkste staal, PE en slagvast PVC, is op basis van literatuur en praktijkonderzoek geen degradatie te verwachten of waargenomen. Echter zijn gasmeters een belangrijk aandachtspunt. Dit komt door de toename van het te transporteren gasvolume om dezelfde energiedichtheid te garanderen. Het gevolg hiervan is dat op piekmomenten de bestaande gasmeters een te kleine capaciteit hebben (Kiwa Technology B.V., 2018).

Het conversieproces van aardgasleidingen richt zich voornamelijk op het reinigen van de pijpleiding met stikstof om vervuilingen te verwijderen, het monitoren van de leidingen om scheuren tijdig te identificeren en het vervangen van afsluiting en kleppen die voor een langere periode in gebruik zijn (Wang, van der Leun, Peters, & Buseman, 2020).

6.1.2 Aanleggen nieuw waterstofnetwerk

Het realiseren van een nieuw waterstofnetwerk verzorgt het vervoeren van zowel blauwe waterstof als groene waterstof. De productie van groene waterstof is op korte termijn nog niet aannemelijk. Het biedt echter wel potentie voor de lange termijn (2030-2050) en kan op dit moment getransporteerd worden in leidingen die in eerste instantie ontwikkeld zijn voor blauwe waterstof (H-vision, 2019).

Voor het vervoeren van waterstof worden over het algemeen roestvrijstaal en koolstofstalen pijpleidingen, vergelijkbaar met aardgasleidingen, gebruikt. Het is ook mogelijk om waterstof te transporteren door een versterkte polymeer pijpleiding. Deze pijpleidingen worden voornamelijk toegepast voor het transporteren van waterstof in productieprocessen (Gillette & Kolpa, 2007). De specificaties van een waterstof pijpleiding zijn te vergelijken met een pijpleiding voor aardgas (Kiwa Technology B.V., 2018). Het prominente verschil tussen het transporteren van waterstof en aardgas in een pijpleiding, zit in de benodigde compressor capaciteit. Aangezien de energiedichtheid van waterstof ongeveer 3 maal lager is dan die van aardgas is er 3 maal het volume nodig is om dezelfde energiedichtheid te transporteren. Doordat compressoren werken op basis van volume en niet op energiedichtheid en is er een hogere compressie nodig wat meer vermogen vraagt en resulteert in een aanzienlijk hoger energieverbruik (Gillette & Kolpa, 2007).

Het leggen van nieuwe leidingen gaat in Nederland, in vergelijking met andere landen, vrij eenvoudig. Dit komt doordat Nederland de 'Structuurvisie Buisleiding' heeft opgezet. In deze visie zijn tracés gereserveerd voor het aanleggen van nieuwe leidinginfrastructuur (Port of Rotterdam, 2020). In de structuurvisie wordt ook rekening gehouden met buisleidingen ten behoeve van waterstof, met name in de verbindingen tussen de haven- en industrieclusters (Ministerie van Infrastructuur en Milieu en het Ministerie van Economische zaken, Landbouw en Innovatie, 2012).

Voor het aanleggen van een nieuw lokaal waterstofnetwerk in de haven van Rotterdam is geen extra compressie nodig. Dit netwerk wordt voornamelijk gebruikt voor verbranding bij lage druk (H-vision, 2019).

6.1.3 Compressie

Waterstof is relatief moeilijk te comprimeren in vergelijking met aardgas omdat het bestaat uit minuscule moleculen. Compressoren voor waterstof zijn duur door de materialen die vereist zijn, de grootte om de benodigde compressor capaciteit te verzorgen en overbodigheid die nodig is voor het waarborgen van de betrouwbaarheid. Compressoren voor waterstof hebben strakke toleranties en speciale afsluiting om te druk te behalen die nodig is voor het transporteren van grote hoeveelheden waterstof (Gillette & Kolpa, 2007).

Compressoren zijn essentieel in de productie en distributie van waterstof. Compressoren zijn onder te verdelen in drie ontwerpen (Fenske & Erck, 2010):

- Verdringingscompressoren, deze comprimeren gas door verplaatsing van een mechanische koppeling die het volume reduceert.
- Axiale compressoren, deze comprimeren gas door gebruik te maken van een reeks waaiers die per reeks verkleinen
- Centrifugale compressoren, deze comprimeren gas door gebruik te maken van een draaiende schijf (impeller) in een gevormde behuizing die het gas versnelt. De diffusor zet de snelheid gedeeltelijk om in druk.

Binnen het comprimeren van gas ligt de voorkeur bij verdringingscompressoren, met name zuigercompressoren, en centrifugaal compressoren. Over het algemeen kan worden gesteld dat

centrifugaal compressoren de voorkeur hebben bij het comprimeren van grote volumes en zuigercompressoren voor kleinere volumes. Zuigertechnologie is effectiever en meer flexibel in opereren. Echter is het wel dat zuigercompressoren meer slijtage ondervinden en dus meer onderhoud nodig hebben (North Sea Energy, 2020).

Een bewezen technologie voor het comprimeren van waterstof is het gebruiken van zuigercompressoren. Deze variant compressoren zijn beschikbaar met en zonder smeermiddel. Dit is met name belangrijk op het moment dat deze worden ingezet voor het comprimeren van waterstof met een hoge zuiverheid. Zuigercompressoren met smeermiddel kunnen de waterstof verontreinigen. Een nadeel van zuigercompressors is de hoge onderhoudskosten door slijtage. Het is mogelijk de onderhoudskosten te minimaliseren door kennis te benutten van experts waardoor dit soort compressor voordeliger wordt als vergelijkbare technologieën (North Sea Energy, 2020).

Centrifugaal compressoren zijn maatwerk machines die worden ontworpen voor een specifieke toepassing. Het ontwerp is afhankelijk van het debiet, de thermodynamische eigenschappen van het gas en de vereiste drukverhouding. Het comprimeren van waterstof door gebruik te maken van centrifugaal compressoren brengt veel uitdagingen met zich mee en wordt gezien als onpraktisch (North Sea Energy, 2020).

6.1.4 Opslag

Gas wordt in het bestaande gastransportsysteem opgeslagen in lege gasvelden en in zout cavernes. Bij een overgang naar 100% waterstof neemt die opslagcapaciteit van energie af. Bij eenzelfde volume van opslagcapaciteit zal door de geringere energiedichtheid van waterstof met 1/3 worden gereduceerd. Een risico hierbij is dat bij opslag in lege gasvelden, voornamelijk in het begin, verontreiniging kan optreden in het waterstofgas wat voor extra kosten kan zorgen. Hetzelfde geldt voor opslag in het netwerk zelf (linepacking). Er kan eenzelfde volume gebufferd worden maar dit is 1/3 van de energie-inhoud. Dit maakt inspelen op variaties in de verwachte vraag moeilijker (DNV GL, 2017).

Opslag van waterstof in zout cavernes heeft naar alle waarschijnlijkheid de voorkeur. Dit heeft te maken met de afsluiting en het voorkomen van vermenging waardoor de veiligheid en zuiverheid van waterstof beter gegarandeerd kan worden. Opslag van waterstof in gasvelden kan een alternatieven zijn op het moment dat er een grotere seizoensgebonden buffercapaciteit nodig is. Het gaat hier dan met name over low-grade waterstof (van Gessel, Breunese, Juez Larré, Huijskes, & Remmelts, 2018).

6.2 Parameters voor het ontwerp

Om aan de vraag naar waterstof in 2050, zoals deze geformuleerd zijn in de scenario's, te kunnen faciliteren moeten pijpleidingen aangelegd worden. Deze leidingen dienen niet alleen voor het voorzien van waterstof aan de industriecluster, maar ook voor het exporteren van waterstof naar het achterland. In deze paragraaf is, naast het bepalen van de optimale diameter om aan de vraag te kunnen voldoen, ook een bepaalde capaciteit nodig voor de compressie achterhaald. Het aspect opslaan van waterstof is binnen de ontwerp parameters weggelaten. De reden hiervoor is dat dit buiten de scope van het project valt. Het gaat binnen deze paragraaf over een initiële verkenning van de capaciteit van zowel de buisleiding(en) en compressor die benodigd zijn om de vraag naar waterstof te kunnen faciliteren. In bijlage 7 zijn de volledige berekeningen weergegeven.

6.2.1 Benodigde diameter pijpleiding

Voor de bepaling van de capaciteit van de pijpleiding zijn een tweetal formules gebruikt. De eerste formule (optimum pipeline diameter equation) stelt dat de optimale diameter afhankelijk is van het debiet van de pijpleiding en de stroomsnelheid van het medium. De tweede formule (Total gas flow equation) stelt dat de diameter van de pijpleiding afhankelijk is van het debiet, de initiële druk, de temperatuur en stroomsnelheid (H-vision, 2019). In Tabel 11 zijn de formules voor het bepalen van de pijpleiding diameter weergegeven.

Tabel 11: Formules berekenen diameter pijpleiding (INTECH GmbH, 2020)

Optimum pipeline diameter equation	Total gas flow equation
$d_o = \sqrt{\frac{(4 \cdot Q)}{(\pi \cdot v_o)}}$	$d = 0,29 \cdot \sqrt{\frac{(Q \cdot T)}{(P \cdot V)}}$
<i>d_o</i> – Optimale inwendige diameter in mm <i>Q</i> – Debiet in m ³ /s <i>V_o</i> – Stroomsnelheid in m/s	<i>d</i> – Inwendige diameter in feet <i>Q</i> – Debiet in ft ³ /min <i>T</i> – Temperatuur in K <i>P</i> – Druk in psi <i>V</i> – Stroomsnelheid ft/s

De compressor capaciteit die benodigd is voor het transporteren van de verschillende hoeveelheden waterstof is berekend aan de hand van het debiet. Voor deze berekening zijn gegevens gebruikt die zijn opgesteld door North Sea Energy waarin wordt gesteld dat voor het transporteren van waterstof bij een debiet van 18,2 kg/uur en een druk van 60-80 bar, een compressor capaciteit nodig is van 9,41 kW ervan uitgaande dat een zuigercompressor of een diafragmacompressor gebruikt wordt. De compressor capaciteit neemt lineair toe naar mate het debiet toeneemt. Dit betekent dat bij een debiet van 1 kg/uur een compressor capaciteit nodig is van 0,517 kW (North Sea Energy, 2020).

In Tabel 12 staan de uitkomsten, na omrekening, van de tweetal formules voor het berekenen van de inwendige buisdiameters die nodig zijn voor het transporteren van de vraag naar waterstof per scenario.

Tabel 12: Overzicht resultaten berekening buisdiameters

Scenario	Optimum pipeline diameter equation		Total gas flow equation	
	In mm	In inch	In mm	In inch
Scenario A0	348,13	14	347,91	14
Scenario A1	1074,26	42	1073,58	42
Scenario B2	1685,20	66	1684,12	66
Scenario C3	2258,85	89	2257,40	89

Uit de resultaten is af te leiden dat, na afronding, de formules op dezelfde afmetingen uitkomen. Uit deze resultaten kan geconcludeerd worden dat:

- **Het scenario A0** uitgaat van een totale aan waterstof van 0,5 Mt/jaar. Dit komt neer op een debiet van 1,425994 m³/s waarvoor een buisleiding met diameter van 14 inch nodig is.
- **Het scenario A1** uitgaat van een totale vraag aan waterstof van 4,761 Mt/jaar. Dit komt neer op een debiet van 13,57832 m³/s waarvoor een buisleiding met diameter van 42 inch nodig is.
- **Het scenario B2** uitgaat van een totale aan vraag aan waterstof van 11,716 Mt/jaar. Dit komt neer op een debiet van 33,4139 m³/s waarvoor een buisleiding met diameter van 66 inch nodig is.
- **Het scenario C3** uitgaat van een totale vraag aan waterstof van 21,05 Mt/jaar. Dit komt neer op een debiet van 60,03436 m³/s waarvoor een buisleiding met diameter van 89 inch nodig is.

6.2.2 Benodigde compressor capaciteit

In Tabel 13 staan de uitkomsten, na omrekening, van de benodigde compressor capaciteit die nodig is voor het transporten van de vraag naar waterstof per scenario.

Tabel 13: Overzicht resultaten berekening compressor capaciteit

Scenario	Vraag in kg/uur	Capaciteit compressor in kW	Capaciteit compressor in MW
Scenario A0	57.077,63	29.511,01	29,51
Scenario A1	543.493,15	281.003,88	281,00
Scenario B2	1.337.442,92	691.502,08	691,50
Scenario C3	2.402.968,04	1.242.413,69	1.242,41

Uit de resultaten kan geconcludeerd worden dat:

- **Het scenario A0** bij een totale vraag aan waterstof van 0,5 Mt/jaar en een buisleiding met diameter van 14 inch, een compressor capaciteit nodig is van 29,51 MW.
- **Het scenario A1** bij een totale vraag aan waterstof van 4,761 Mt/jaar en een buisleiding met diameter van 42 inch, een compressor capaciteit nodig is van 281 MW.
- **Het scenario B2** bij een totale vraag aan waterstof van 11,716 Mt/jaar en een buisleiding met diameter van 66 inch, een compressor capaciteit nodig is van 691,50 MW.
- **Het scenario C3** bij een totale vraag aan waterstof van 21,05 Mt/jaar en een buisleiding met diameter van 89 inch, een compressor capaciteit nodig is van 1.242,41 MW.

6.2.3 Implicaties voor het ontwerp

Voor de berekening van investeringskosten en onderhoudskosten kunnen de ontwerpparameters niet één op één worden overgenomen. Dit heeft met name effect op de investeringskosten gerelateerd aan de pijpleidingen. Investeringskosten voor een pijpleiding van 14 inch ontbreken. Er zijn echter wel kosten bekend voor het aanleggen van een 16 inch pijpleiding. Hiernaast ontbreken gegevens over pijpleidingen van 66 inch en 89 inch. De grootste gasleiding die momenteel in gebruik is heeft een diameter van 142 centimeter (56 inches) (Offshore Technology, 2018).

Voor het berekenen van de kosten betekent het dat de volgende ontwerpparameters gehanteerd worden voor de verschillende scenario's:

- **Scenario A0**, inwendige buisdiameter van 16 inch en een compressor capaciteit van 29,51 MW.
- **Scenario A1**, inwendige buisdiameter van 42 inch met een compressor capaciteit van 281 MW.
- **Scenario B2**, twee pijpleidingen waarvan één een inwendige diameter heeft van 24 inch en de andere een inwendige diameter van 42 inch met een compressor capaciteit van 691,50 MW.
- **Scenario C3**, twee pijpleidingen waarvan één een inwendige diameter heeft van 42 inch en de andere van 48 inch met een compressor capaciteit van 1.242,41 MW.

In bijlage 8 is het schema weergegeven voor het bepalen van de optimale verdeling in van de buisdiameters. In deze afweging is ervan uitgegaan dat een tweetal pijpleidingen de maximale hoeveelheid leidingen is.

6.3 Voorkeursroute 2050

Om inzicht te geven in welke opties economisch en organisatorisch haalbaar zijn is gebruik gemaakt van de beslisboommethode van Van den Boomen (van den Boomen, Spaan, Schoenmaker, & Wolfert, 2019). Deze methode geeft inzicht in welke benadering door de tijd het meest rendabel is, rekening houdend met de onzekerheid vanuit de scenario's. De beslisboom is voor twee situaties uitgewerkt. De eerste situatie heeft betrekking op een geheel nieuw te realiseren waterstoftransportnetwerk, de tweede situatie gaat ervan uit dat in 2030 een bestaande gasleiding binnen het havengebied beschikbaar komt voor het transporteren van waterstof. Het vaststellen van het voorkeurspad gebeurt door middel van een aantal stappen. De volledige uitwerking van deze methode is terug te vinden in Bijlage 10.

Voor het bepalen van de voorkeursroute is gebruik gemaakt van huidige kostenindicaties voor waterstofleidingen en compressoren en inkomsten uit waterstof. Een uiteenzetting van deze kosten en inkomsten is terug te vinden in Bijlage 9. In Bijlage 10 is een analyse van deze beslisboom uitgewerkt waarbij gekeken wordt naar veranderingen in variabelen, een sensitiviteitsstudie en de daarbij behorende alternatieve voorkeursroutes.

De investerings- en onderhoudskosten en de inkomsten per verkochte waterstofeenheid zijn opgenomen in het beslisboommodel. De kosten en inkomsten verschillen per scenario. De investeringen die moeten worden gedaan om te kunnen voldoen aan de vraag uit het hoogste scenario (C3) zijn hoog, de inkomsten zijn daarentegen ook maximaal. Dit betekent niet dat dit het meest rendabele pad betreft. Dit alles is daarnaast ook onderhevig aan de kans dat het scenario daadwerkelijk uitkomt.

De beslisboom genereert een antwoord op de vraag welk pad door de tijd het meest rendabel is in het geval van verschillende scenario's die elk andere investeringskosten en inkomsten kennen en die tegelijkertijd onderhevig zijn aan verschillende kansen dat deze uitkomen. Daarbij wordt er gerekend met een inkomstenderving die plaatsvindt als er gekozen wordt voor een scenario met bovenliggende scenario's. Hierbij wordt inzicht gegeven in misgelopen inkomsten als er toch voor een hoger gelegen scenario gekozen zou zijn.

6.3.1 Definiëren van probabilityscores

Binnen de beslisboom wordt gewerkt met verschillende scenario's voor de vraagontwikkeling naar waterstof. Elk scenario heeft een bepaalde kans dat deze uitkomt binnen een tijdsinterval. Deze kansen zijn erg onzeker en worden volgens logische redenering vastgesteld die verderop wordt beschreven. Na het doorrekenen van de beslisboom worden deze kansen gevalideerd om te achterhalen binnen welke marge er aanzienlijke afwijkingen ontstaan binnen de beslisboom.

Binnen het onderzoek en de beslisboom wordt gewerkt met vier verschillende scenario's voor de vraag naar waterstof. Het daadwerkelijk uitkomen van een scenario heeft een bepaalde kans van optreden. Om te kunnen omgaan met deze onzekerheid wordt binnen de beslisboom gewerkt met probabilityscores per tijdsinterval per scenario.

In de beslisboom zijn de mogelijke investeringsstrategieën uitgewerkt. De kosten en opbrengsten die bij deze strategieën horen hangen af van de actie die in een beslisnode genomen wordt en vervolgens van de ontwikkeling van de waterstofvraag die gerelateerd is aan een kans van optreden. Immers de capaciteit van de aangelegde leidingen bepaalt of aan de waterstofvraag kan worden voldaan. Deze kansberekening voor de ontwikkeling van de waterstofvraag is onderdeel van het doorrekenen van de beslisboom. Tabel 14 laat zien wat de kans is dat een bepaalde waterstofvraag in een bepaald tijdsframe optreedt.

Tabel 14: Tabel uit de beslisboom met probabilityscores per demand.

Probabilities for demand P(D)					
Demand:	2020-2030	2030-2040	2040-2050	>2050	
500Kt	40%	20%	5%	1%	
4761Kt	45%	40%	35%	30%	
11716Kt	10%	30%	35%	40%	
21050Kt	5%	10%	25%	29%	
Total	100%	100%	100%	100%	

Per tijdsinterval van 10 jaar is bepaald hoe waarschijnlijk het is dat een scenario uitkomt. Tabel 42 vormt bij de uitwerking de referentie voor de percentages.

Tijdperiode 2020-2030

Voor de tijdsperiodes 2020-2030 is de kans voor het optreden van de scenario's als volgt:

- Scenario A0 (waterstofvraag ontwikkelt naar 0.5Mt) 40%
- Scenario A1 (waterstofvraag ontwikkelt naar 4.7Mt) 45%
- Scenario B2 (waterstofvraag ontwikkelt naar 11.7Mt) 10%
- Scenario C3 (waterstofvraag ontwikkelt naar 21.1Mt) 5%

Onderbouwing:

Op dit moment wordt een begin gemaakt met de waterstoftransitie. Eerste projecten en doelen verschijnen en het klimaatakkoord van Parijs is een stok achter de deur om opzoek te gaan naar minder vervuilende manieren van energieproductie. De transitie staat hiermee echt aan het begin en het is in de huidige tijd dan ook moeilijk om één van de meest ambitieuze scenario's als eindresultaat te zien.

In de huidige tijd is het voorspelbaarder dat het scenario A0 of A1 uitkomt. Momenteel zijn er nog niet veel innovatieve technieken die grootschalige veranderingen binnen de transitie te weeg gaan

brengen en daarmee de ambitieuzere scenario's lijken te gaan halen. Ook lijken er vanuit de haven van Rotterdam nog geen duidelijke signalen te komen van een opschaling zoals deze voorspeld wordt in het rapport van H-vision.

Tijdsperiode 2030-2040

Voor de tijdsperioden 2030-2040 is de kans voor het optreden van de scenario's als volgt:

- Scenario A0 (waterstofvraag ontwikkelt naar 0.5Mt) 20%
- Scenario A1 (waterstofvraag ontwikkelt naar 4.7Mt) 40%
- Scenario B2 (waterstofvraag ontwikkelt naar 11.7Mt) 30%
- Scenario C3 (waterstofvraag ontwikkelt naar 21.1Mt) 10%

Onderbouwing:

Over tien jaar wordt verwacht dat de eerste doorbraken binnen de transitie bereikt zijn. Partijen gaan zich steeds meer bezighouden met de transitie en zorgen daarvoor voor nieuwe inzichten en technieken. Hierdoor wordt de kans op het scenario A0 (waarbij door wordt gegaan op de huidige manier zonder ingrepen) aanzienlijk kleiner.

Tegelijkertijd neemt de kans om uiteindelijk in een ambitieuzer scenario (de scenario's B2 en C3) door deze nieuwe ontwikkelingen en vergrote interesse toe. Het meeste ambitieuze scenario (C3) is echter nog steeds lastig te behalen vanwege de zwaarte van dit scenario.

Tijdsperiode 2040-2050

Voor de tijdsperioden 2040-2050 is de kans voor het optreden van de scenario's als volgt:

- Scenario A0 (waterstofvraag ontwikkelt naar 0.5Mt) 5%
- Scenario A1 (waterstofvraag ontwikkelt naar 4.7Mt) 35%
- Scenario B2 (waterstofvraag ontwikkelt naar 11.7Mt) 35%
- Scenario C3 (waterstofvraag ontwikkelt naar 21.1Mt) 25%

Onderbouwing:

In de verre toekomst is de kennis, innovaties en bereidheid om deel te nemen aan de transitie merkbaar gegroeid. De gevolgen van klimaatverandering worden steeds duidelijker en er moet iets gebeuren om dit tegen te gaan.

De verwachting hierbij is dat de focus steeds meer van de minder ambitieuzere scenario's naar de ambitieuzere scenario's verschuift. Rond deze tijd zal het gemiddelde scenario bijna even denkbaar zijn als het minimale scenario en ook het maximale scenario begint steeds meer werkelijkheid te worden. Daarentegen neemt de kans dat het scenario waarbij weinig tot niks veranderd ten opzichte van de huidige realiteit steeds verder af tot dat het bijna niet meer realistisch is.

Tijdsperiode >2050

Voor de tijdsperiode >2050 is de kans voor het optreden van de scenario's als volgt:

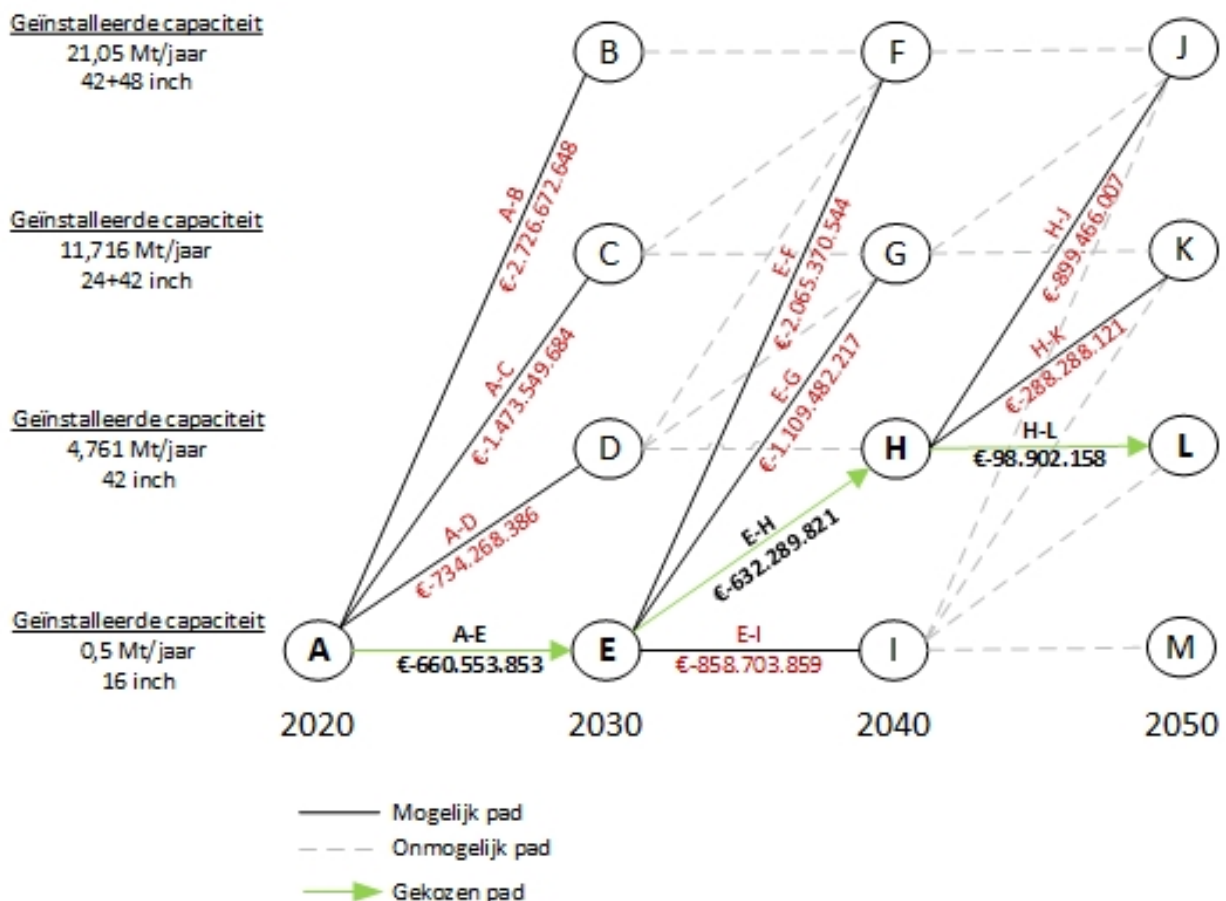
- Scenario A0 (waterstofvraag ontwikkelt naar 0.5Mt) 1%
- Scenario A1 (waterstofvraag ontwikkelt naar 4.7Mt) 30%
- Scenario B2 (waterstofvraag ontwikkelt naar 11.7Mt) 40%
- Scenario C3 (waterstofvraag ontwikkelt naar 21.1Mt) 29%

Onderbouwing:

Als na 2050 wordt gekeken zal de transitie steeds meer richting de ambitieuzere scenario's gaan. De gevolgen van de klimaatveranderingen, de veranderde mentaliteit en innovaties binnen deze transitie maken dit mogelijk. De kans dat scenario A0 optreedt is in dit stadium verwaarloosbaar klein.

6.3.2 Doorrekenen beslisboom nieuw waterstoftransportnetwerk

Figuur 10 geeft de beslisboom weer zoals deze is opgesteld voor een nieuw te realiseren waterstoftransportnetwerk in de haven van Rotterdam. De groene lijn geeft de voorkeursroute aan die gevolgd wordt door de tijd. Deze lijn wordt gevormd door het volgen van de lijnen met de daarbij behorende hoogste contante waarde. De groene lijn geeft aan dat binnen het tijdsinterval 2020-2030 (A-E) wordt geïnvesteerd in het uitbreiden van het transportnetwerk naar een capaciteit van 0,5 Mt waterstof per jaar. Hierna wordt de lijn E-H-L gevolgd en wordt er geïnvesteerd in opschaling van het waterstofnetwerk naar 4,761 Mt per jaar. De kosten voor opschaling, samen met de kans dat de vraag behorende bij de hogere scenario's daadwerkelijk uitkomt, is hoger dan de gedeerde inkomsten vanuit een waterstofvraag vanuit een hoger scenario. Dit betelend dat het de kosten hoger zin om op te schalen als de inkomsten waardoor er negatieve waarden ontstaan. Figuur 10 geeft alleen het meest economisch rendabel pad weer aan de hand van de berekende contante waarden. In paragraaf 6.4 is een uitgebreid overzicht gepresenteerd waarin is weergegeven wat dit pad in de praktijk betekend.

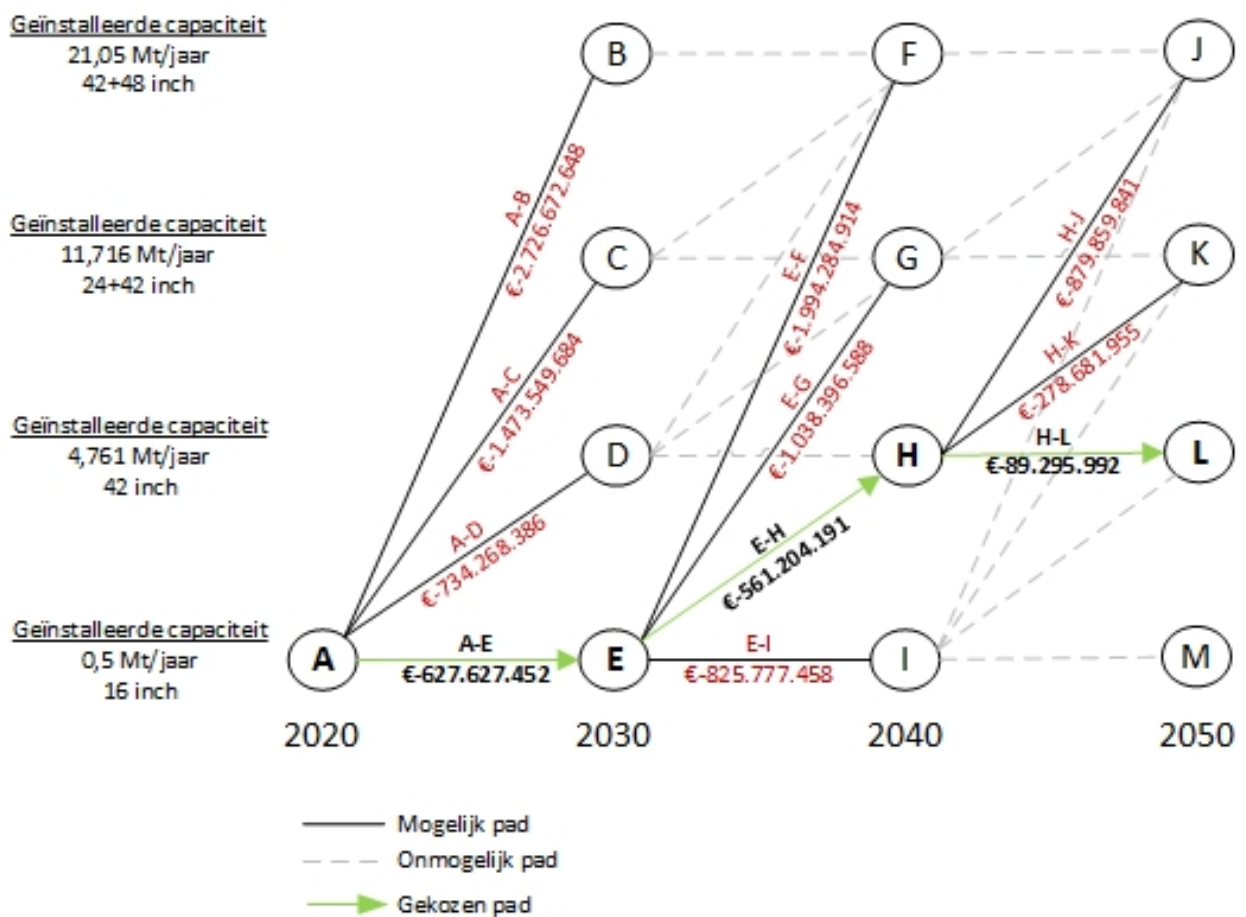


Figuur 10: Beslisboom met voorkeursroute nieuw netwerk (huidige prijzen)

6.3.3 Doorrekenen beslisboom gebruik aardgasleiding

De beslisboom is ook doorgerekend voor de situatie waarin er in 2030 een laagcalorische aardgasleiding beschikbaar komt binnen de haven. Deze leiding zal dan niet meer gebruikt worden omdat het aardgasgebruik zodanig is teruggebracht binnen de industrie en in Nederland dat deze overbodig wordt. Het hoogcalorische netwerk blijft beschikbaar voor industrie. Omdat de transformatiekosten van een bestaande leiding aanzienlijk lager zijn dan het aanleggen van een nieuwe leiding wordt deze optie doorgerekend. Het gaat hier om een pijpleiding met een inwendige diameter van 36 inch.

Figuur 11 geeft de voorkeursroute aan rekening houdende met de mogelijkheid tot het aanpassen van de bestaande 36 inch aardgaspijpleiding. Uit de doorrekening komt naar voren dat het pad A-E-H-L nog steeds de voorkeur geniet. Figuur 11 geeft alleen het meest economisch rendabel pad weer aan de hand van de berekende contante waarden. In paragraaf 6.4 is een uitgebreid overzicht gepresenteerd waarin is weergegeven wat dit pad in de praktijk betekent.

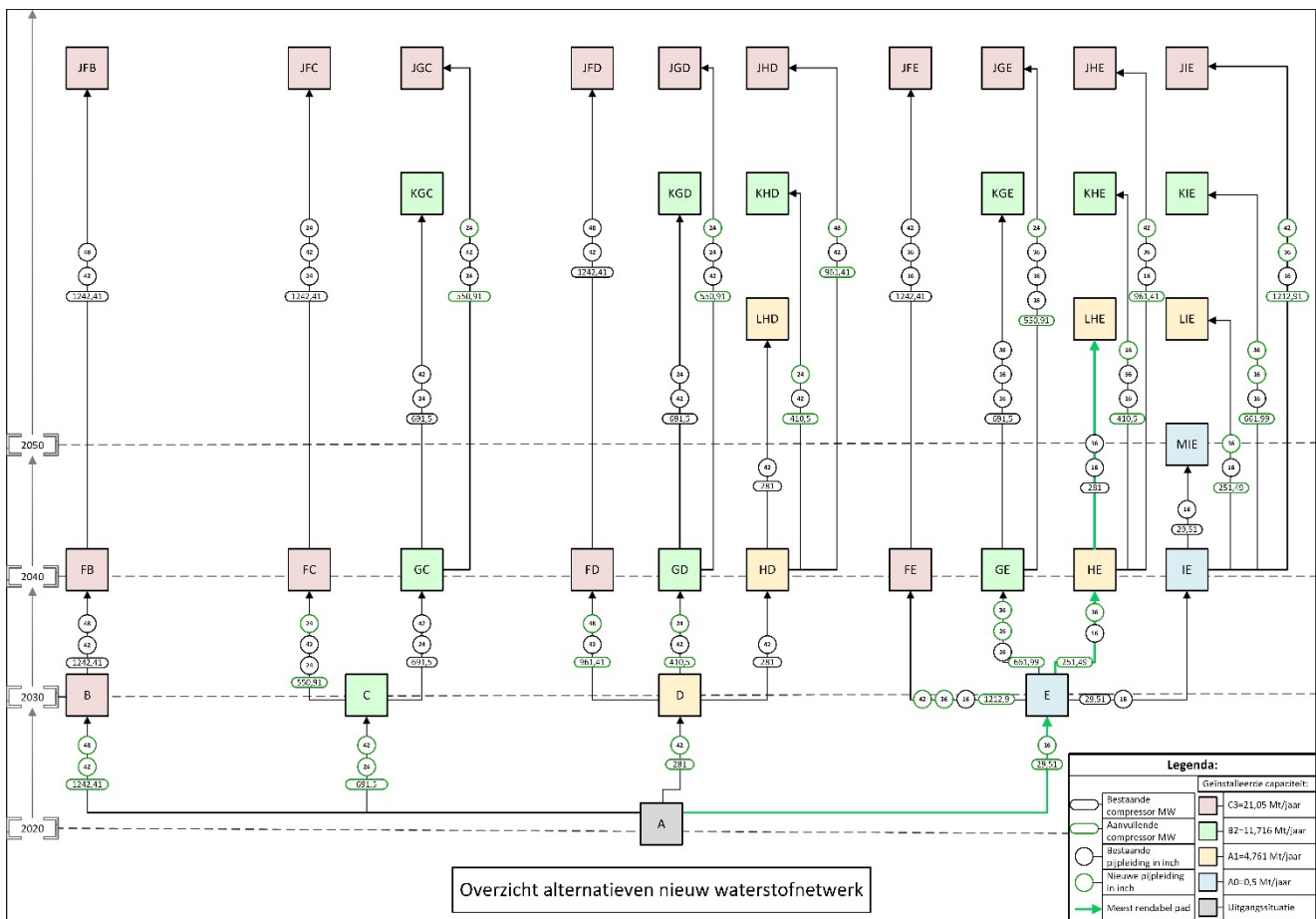


Figuur 11: Beslisboom met voorkeursroute i.c.m. bestaande aardgasleiding (huidige prijzen)

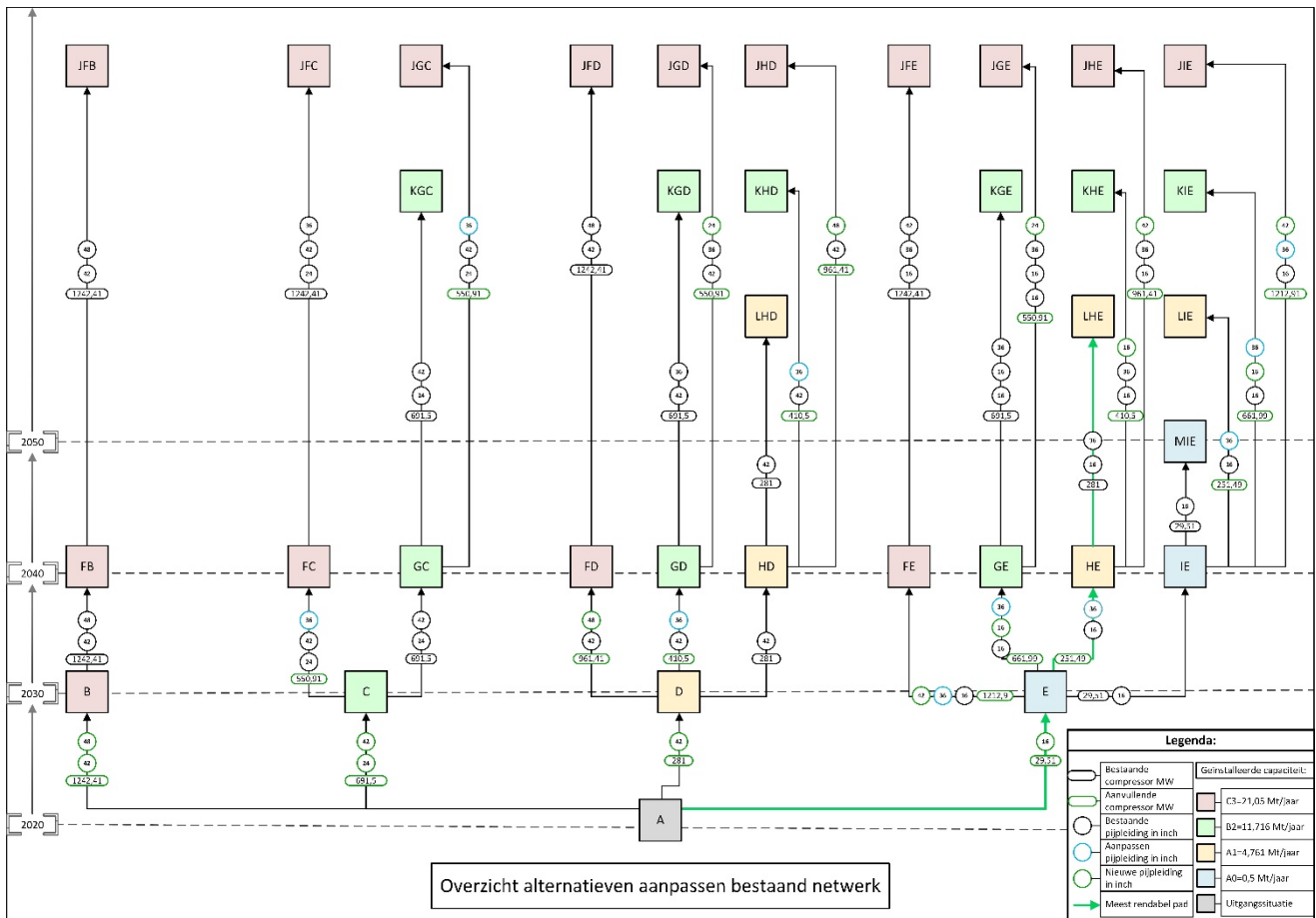
6.4 Beantwoording deelvraag 4

In dit hoofdstuk is deelvraag 4 beantwoord: "Op welke haalbare wijze kan een waterstofdistributienetwerk gerealiseerd worden?". Voor de beantwoording van deze deelvraag is onderzocht wat ervoor nodig is om waterstof door een pijpleiding te vervoeren, waar rekening mee gehouden moet worden, welke capaciteit benodigd is voor het transporteren van de vraag aan waterstof zoals deze is geformuleerd in de verschillende scenario's en wat het meest economische rendabel pad is. Met de vaststelling van het meest economisch rendabele pad is de meest haalbare wijze voor het realiseren van een waterstofdistributienetwerk achterhaald en een antwoord gegeven op deelvraag 4. In Figuur 12 en Figuur 13 is een overzicht gepresenteerd met alle mogelijke alternatieven gehanteerd in dit onderzoek. In deze overzichten is weergegeven welke mogelijke paden gevolgd kunnen worden. Bij deze verschillende paden is aangegeven wat ervoor nodig is om van een bepaalde node naar de volgende node te komen (lees B→FB, C→GC, etc.). Om bijvoorbeeld van node E in 2030 (scenario A0) naar node HE in 2040 (scenario A1) te gaan, is naast de bestaande 16 inch pijpleiding een extra pijpleiding van 36 inch nodig om de vraag naar waterstof te kunnen faciliteren. Verder, is er een aanvullende compressor capaciteit nodig van 251,49 MW. Deze berekening is gedaan voor alle nodes. Op de paden tussen deze nodes aangegeven wat de bestaande situatie is en wat gerealiseerd moet worden om de vraag naar waterstof te kunnen faciliteren.

Uit de beslisboom, Figuur 10 en Figuur 11, en het overzicht van de alternatieven, Figuur 12 en Figuur 13, kan geconcludeerd worden dat het pad A-E-HE-LHE de meest haalbare wijze is voor het realiseren van een waterstofdistributienetwerk. Het gaat binnen dit pad over het realiseren van twee pijpleidingen van 70 kilometer lang met een diameter van 16 inch en een pijpleiding van 36 inch met een bijbehorende compressor capaciteit van 281 MW.



Figuur 12: Schematische weergave alternatieven nieuw waterstofnetwerk. In dit overzicht is weergegeven welke mogelijke paden gevolgd kunnen worden. Bij deze verschillende paden is aangegeven wat er nodig is om van een bepaalde node naar de volgende node te komen.



Figuur 13: Schematische weergave alternatieven aanpassen bestaand netwerk. In dit overzicht is weergegeven welke mogelijke paden gevolgd kunnen worden. Bij deze verschillende paden is aangegeven wat ervoor nodig is om van een bepaalde node naar de volgende node te komen.

Opmerkelijk is dat dit pad zowel voor het realiseren van een nieuw netwerk geldt als het aanpassen van het huidige aardgasnetwerk. In beide situaties is het pad A-E-HE-LHE het meest economisch rendabel en dus de meest haalbare wijze voor het realiseren van een waterstofdistributienetwerk. Dit komt doordat in beide situaties, na een initiële investering voor het realiseren van een 16 inch pijpleiding, de capaciteit vergroot kan worden met een 36 inch buis waarbij het mogelijk is om een bestaande pijpleiding aan te passen of een nieuwe pijpleiding te realiseren. Echter is het wel noodzakelijk om, voor deze uitbreiding, de compressor capaciteit te vergroten van 29,51 MW naar 281 MW (uitbreiding van 251,49 MW). Na deze realisatie/aanpassing blijven verdere investeringskosten uit. Verder biedt dit pad de mogelijkheid tot het benutten van een bestaande aardgaspijpleiding wat gunstig kan zijn in de praktijk. In bijlage 11 is de schematische weergave van alternatieven opgenomen.

7 Implementatiestrategie

Dit hoofdstuk gaat in op deelvraag 5: “Hoe kan de haven van Rotterdam op een adaptieve wijze een robuust waterstofdistributienetwerk realiseren?”. Deze deelvraag lijkt een tegenstelling te bevatten namelijk in de begrippen op adaptieve wijze en een robuust netwerk. Echter, zijn deze twee parameters van belang om een antifragiel systeem te realiseren gebaseerd op optionaliteit (adaptief) en redundantie (robuust). Optionaliteit is het openhouden van keuzemogelijkheden waardoor strategisch beweegruimte wordt gecreëerd en op een later moment in de tijd een beter besluit kan worden genomen. Een redundant systeem heeft capaciteiten die overbodig zijn in een stabiele situatie maar bij ongeregelheden de continuering van de functie van het systeem waarborgen (van 't Hek & van Oss, 2020). Om hier invulling aan te geven in de Rotterdamse haven wordt gebruik gemaakt van de laatste stappen uit de DAPP-methode van Haasnoot. De voorgaande stappen zijn in vorige hoofdstukken gezet. Stap 6 “selecteren van het geprefereerde pad” komt in paragraaf 7.1 aan bod. 7.2 Contingency planning gaat in op stap 7: “vaststellen van contingency actions, signposts and triggers. 7.3 behandelt stap 8: “specificeren van het dynamische adaptieve plan”. Tot slot wordt in 7.4 ingegaan op stap 9: “implementatie van het adaptieve plan”. In deze paragraaf wordt beschreven hoe stakeholders het plan kunnen implementeren.

7.1 Mogelijke geprefereerde paden

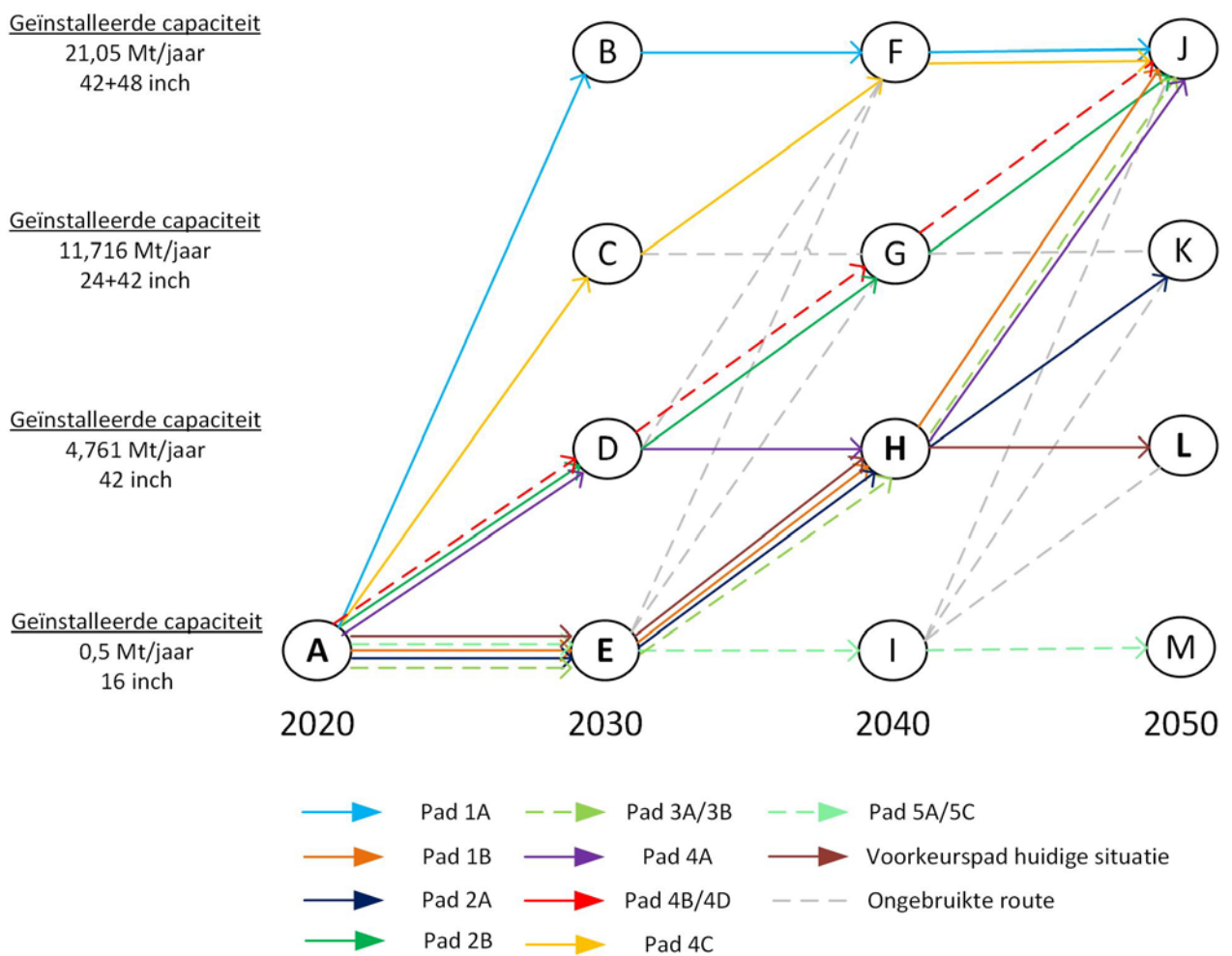
Voor het vaststellen van het geprefereerde pad wordt gebruik gemaakt van een sensitiviteitsanalyse. Het pad zoals deze gepresenteerd is in paragraaf 6.3 is gebaseerd op de huidige beschikbare informatie en is daarom een momentopname. Om een indicatie te geven hoe dit pad onder invloed staat van toekomstige veranderingen of andere beslissingen is gewerkt met een aantal “*wat als*” analyses. De volledige uitwerking van deze analyse is te lezen in bijlage 10.

De volgende 5 vragen zijn gesteld en doorgerekend in de beslisboom, elke vraag kent 2 of meer acties:

1. Wat is de invloed van veranderingen in prijzen voor het realiseren van compressoren.
 - a. De prijzen voor compressoren zijn in zijn geheel uit de beslisboom gehaald.
 - b. De prijzen voor compressoren zijn elke tijdsinterval gehalveerd.
2. Wat is de invloed van veranderingen binnen de probabilityscores behorende een grotere groei van de hogere scenario's?
 - a. De probabilityscores van de scenario's A0 en A1 zijn met 10% verlaagd en de probabilityscores voor de scenario's B1 en C3 zijn met 10% verhoogd.
 - b. De probabilityscores van de scenario's A0 en A1 zijn met 20% verlaagd en de probabilityscores voor de scenario's B1 en C3 zijn met 20% verhoogd.
3. Wat is de invloed van veranderingen binnen de probabilityscores behorende een gematigde groei van de hogere scenario's?
 - a. De probabilityscores van de scenario's A0 en A1 zijn met 10% verhoogd en de probabilityscores voor de scenario's B1 en C3 zijn met 10% verlaagd.
 - b. De probabilityscores van de scenario's A0 en A1 zijn met 20% verhoogd en de probabilityscores voor de scenario's B1 en C3 zijn met 20% verlaagd.
4. Wat is de invloed van aanpassingen aan verkoopprijzen per verkochte waterstofeenheid?
 - a. De verkoopprijzen zijn vermenigvuldigd met 2.
 - b. De verkoopprijzen zijn vermenigvuldigd met 3.
 - c. De verkoopprijzen zijn vermenigvuldigd met 4.
 - d. De optimale verkoopprijs wordt bepaald voor het behalen van het voorkeurspad dat leidt naar de hoogst haalbare vraag.

5. Wat is de invloed van fictieve gedeerde inkomsten.
 - a. In het geval van gedeerde inkomsten zijn deze naar 0 gesteld.
 - b. In het geval van gedeerde inkomsten zijn deze naar de inkomsten van de minimale capaciteit gesteld die geleverd kan zijn

Figuur 14 geeft een versimpelde weergave van de beslissboom met daarin alle voorkeurspaden die ontstaan bij het doorrekenen aan de hand van de “wat als” vragen en de bijbehorende acties. De verschillende pad kleuren vertegenwoordigen de bovengenoemde acties. De uitkomsten van deze analyse kunnen gebruikt worden om een optimaal pad te voorspellen. Als Figuur 14 geanalyseerd wordt op basis van hoeveelheid intersecties per node kan het geprefereerde pad A-E-H-J worden gevormd. Concreet zegt dit nog niets over de benodigde buisdiameters en compressorcapaciteiten. In de praktijk kan een invulling van dit op basis van no-regret actions plaatsvinden. Een verdere praktische uitwerking van dit pad is opgenomen in paragraaf 0.



Figuur 14: Versimpelde weergave van de beslissboom met daarin verschillende paden behorende bij de wat als vragen en acties.

7.2 Contingency planning

Voor een robuust plan dienen contingency actions te worden gespecificeerd. Contingency actions zijn acties die gedaan kunnen worden om te anticiperen op nieuwe ontwikkelingen en die daardoor het geprefereerde pad beïnvloeden. Contingency actions kunnen worden onderscheiden in corrigerende, defensieve en kapitaliserende acties verbonden aan een monitoringsysteem en triggers. De trigger is het moment dat een contingency actie dient te worden genomen. Signposts gaan in op gemonitorde aspecten die betrekking hebben op de route van het geprefereerde pad. Signposts en triggers zijn te verdelen in de volgende drie categorieën (Haasnoot, Walker, Kwakkel, & ter Maat, 2013):

1. Trends en gebeurtenissen afkomstig uit de natuur
2. Gevolgen door antropogeen handelen
3. Verandering van filosofische uitgangspunten

Voorbeeld: Er komt subsidie beschikbaar om waterstofinfrastructuur te realiseren. Het monitoren van subsidiemogelijkheden is de signpost. Het verkrijgen van de daadwerkelijke subsidie is de trigger, de corresponderende contingency actie is beredeneren wat het effect van de subsidie is op het geprefereerde pad en waar nodig wijzigingen doorvoeren.

In deze paragraaf wordt uitgewerkt welke signposts met corresponderende triggers en contingency acties invloed hebben op de route van het geprefereerde pad. Ter verduidelijking: het geprefereerde pad verandert door de tijd heen als ontwikkelingen zich wel of niet manifesteren. De resultaten worden gecombineerd in paragraaf 7.3 het dynamisch adaptieve plan.

1. Klimaatactie

De signpost klimaatactie is de bereidheid van de maatschappij om klimaatmitigatie acties te ondernemen. De veronderstelling is dat naarmate negatieve consequenties van een opwarmend klimaat zich prominenter manifesteren dat ook de bereidheid toe gaat nemen om het energiesysteem te decarboniseren en daarmee de allocatie van middelen in waterstof gaat toenemen. De triggers hiervoor kunnen Europese of nationale verkiezingen zijn, toenemende schade door weersextremen, klimatologische anomalieën zoals de perfecte storm of grote publieke/private kapitaalinjecties waarmee investeringen in de benodigde infrastructuur kunnen worden gedragen. De contingency actie is het opnieuw doorrekenen van de beslisboom met de subsidies. Dit zou ervoor kunnen zorgen dat er eerder dient te worden opgeschaald.

2. Duurzame energie

De signpost realisatie van duurzame energieopwekkingsmogelijkheden is bepalend voor het aanbod groene energie beschikbaar voor elektrolyse van water t.b.v. groen waterstof. Groei van de capaciteit groene energie verhoogt het aanbod van waterstof en heeft daardoor invloed op de productie- en kostprijs en het te transporteren volume. De trigger is het online komen van grote windparken voor de Hollandse kust. De contingency actie is het faciliteren van voldoende transportcapaciteit en of opslagmogelijkheden.

3. Technologische ontwikkelingen

De signpost technologische ontwikkelingen kan resulteren in een substantiële groei in de waterstofvraag en of aanbod door meer op waterstof gebaseerde applicaties of doorbraken op het vlak van waterstofsynthese. Een groeiende vraag werkt stuwend voor de prijs per kuub wat additionele investeringen in waterstof rendabeler maakt en op termijn ook voor meer aanbod kan zorgen en daarmee meer opbrengsten voor de doorvoerende partij. De trigger is grootschalige uitrol van succesvolle waterstof applicaties (toename waterstofvraag in de mobiliteit, hybride

warmtepompen, waterstof als energiebron in verhittingsprocessen etc.) of productietechnieken (ondergrondse SMR, toenemende efficiëntie van electrolyzers, economies of scale effecten etc.). De contingency actie is het herzien van de effecten op het voorkeurspad en de beslisboom aanvullen met de nieuwe gegevens (prijzen, waterstofvraag en benodigde capaciteit).

4. Ervaring met het transporteren van waterstof

Momenteel is grootschalig transport van waterstof op langere afstanden door een buisleiding een noviteit. Ervaringen met de benodigde compressoren, reduceren van drukverlies, leidingcoatings en de aanleg van H₂ buisleidingen is gering. Als waterstofinfrastructuur gebruikelijker wordt zal naar waarschijnlijkheid de kosten op deze aspecten gaan dalen. De signpost is realisatie van waterstofbackbones elders in de wereld (EU, VS, Azië-Pacific). De trigger is de disseminatie van kennis en best practices en beschikbaarheid ervan voor de aanleg van de Nederlandse waterstof infrastructuur. De contingency actie is het aanpassen van de variabelen in de beslisboom (kosten compressoren, aanleg, nieuwe diameters ed.) en de implicaties op het geprefereerde pad.

5. Economische stagnatie

Economische stagnatie is een reële toekomst waarin de West-Europese economie stagneert en geleidelijk overgaat in het Japanse (post-growth) economische model. Aan de grondslag hiervan ligt de vergrijzing waardoor de kapitaalbasis van de economie (generatie babyboomer en de verloren generatie 1945-1970) de pensioengerechtigde leeftijd bereiken en niet meer bijdragen aan het genereren van waarde voor de economie en het beschikbaar stellen van vloeibaar kapitaal. Generaties X, Y en Z (1970 – 2015) zijn procentueel gezien vele malen kleiner en het is aannemelijk dat zij niet de consumptiekracht hebben om de economie te laten groeien. De signpost is inversie van de bevolkingspiramide. De trigger is teruglopende consumptie wat resulteert in een lagere energievraag. De contingency actie is het aanpassen van de waterstofvraag en prijs. En beredeneren van de impact op het geprefereerde pad.

6. Doorrekenen negatieve externaliteiten

Een paradigmaverschuiving in de bevolking kan resulteren in het belasten van negatieve externaliteiten. Milieu, volksgezondheids- en klimaatschade wordt door middel van belastingen aan de kaak gesteld waardoor fossiele bronnen duurder worden ten opzichte van waterstof. Dit verhoogt de concurrentiepositie van waterstof waardoor de vraag gaat toenemen. De signpost is belastinghervormingen in verkiezingsprogramma's. De trigger is aanpassing van het belastingstelsel. De contingency actie is het verhogen van de waterstofvraag in de beslisboom en beredeneren van de invloed op het geprefereerde pad.

Tabel 15 geeft kort de ontwikkelingen weer met de daar bijbehorende signposts, triggers en contingency acties en wanneer in de tijd de ontwikkeling gemonitord dient te worden.

Tabel 15: Contingency planning

Ontwikkeling	Signpost	Trigger(s)	Contingency actie	Tijdsindicatie
Klimaatactie	Maatschappelijke bereidheid klimaatmitigatie	Verkiezingen, publieke opinie	Duiden effecten voor het geprefereerde pad	2030
Duurzame energie	Realisatie capaciteit duurzame energie	Beschikbaar komen van duurzame energie	Faciliteren transport en of opslag	2030
Technologische ontwikkelingen	Ontwikkelingen nieuwe waterstoftechnologieën	Grootschalige uitrol waterstof innovaties	Duiden effecten voor het geprefereerde pad	2040

Transporteren van waterstof	Realisatie waterstofbackbones	Beschikbaarheid kennis en best practices	Duiden effecten voor het geprefereerde pad	2040
Economische stagnatie	Inversie bevolkingspiramide	Teruglopende consumptie	Duiden effecten voor het geprefereerde pad	2040
Negatieve externaliteiten	Belastinghervorming in verkiezingsprogramma's	Aanpassing belastingstelsel	Duiden effecten voor het geprefereerde pad	2040

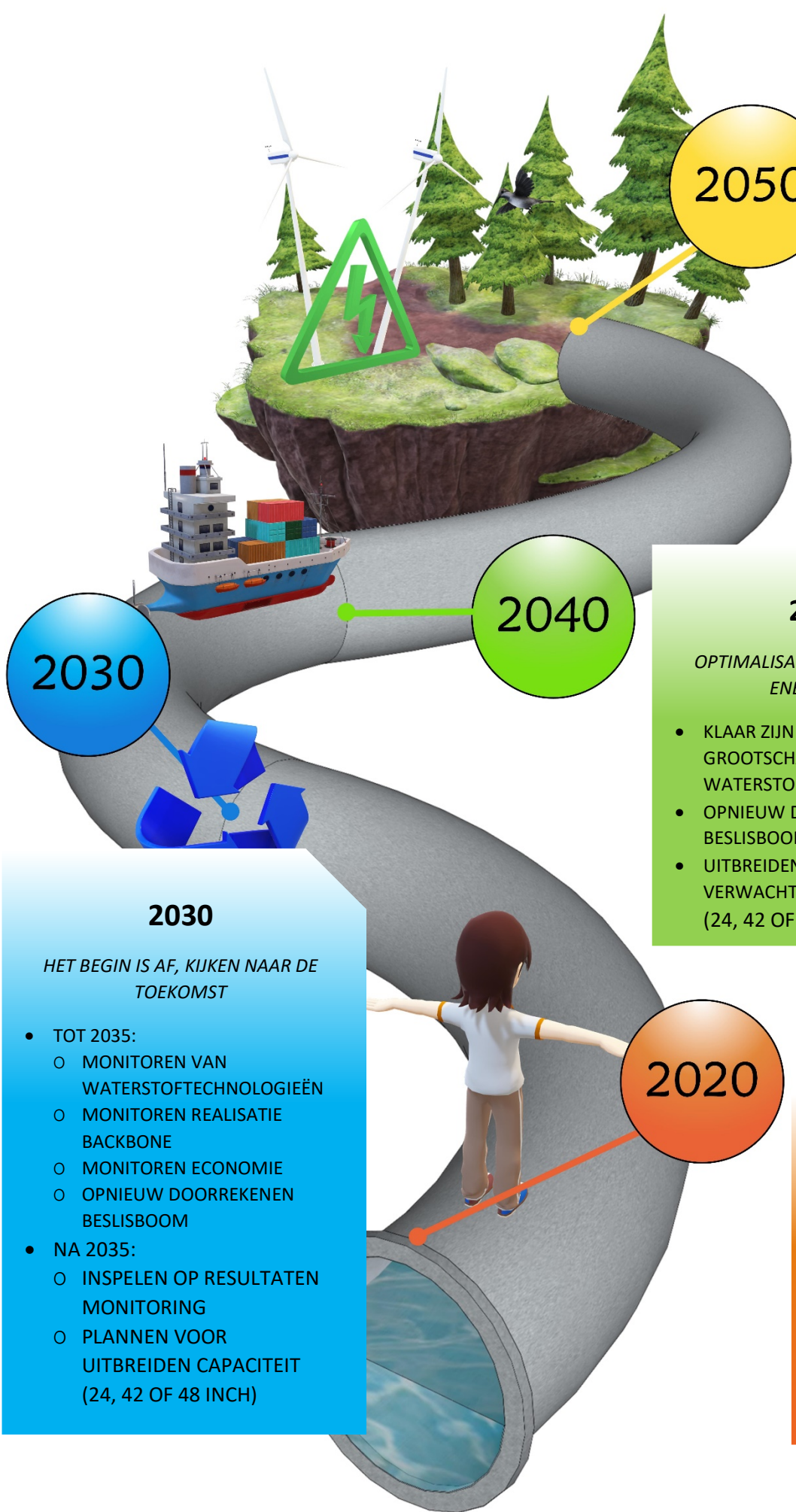
7.3 Het dynamisch adaptieve plan

Het dynamische adaptieve pad beschrijft hoe invulling kan worden gegeven aan het behalen van de benodigde transportcapaciteit door het uitvoeren van no-regret maatregelen per tijdsinterval (2020-2030-2040-2050). De no-regret maatregelen gaan uit van het referentiekader dat in de toekomst een gedecarboniseerde samenleving dient te worden bereikt (in 2050). Tevens dient er rekening te worden gehouden met de uitkomsten van de sensitiviteitsanalyse en contingency planning waarin toekomstige mogelijke gebeurtenissen staan beschreven die grote invloed kunnen hebben op de capaciteit die gefaciliteerd dient te worden.

Zoals is gebleken uit de scenario's en de daaruit afgeleide capaciteit is voor het eerste tijdvak nog niet een grote capaciteit nodig om de waterstofvraag te faciliteren. Een buis met een diameter van 16 inch kan afdoende capaciteit voor de korte termijn garanderen. Dit komt tevens uit het voorkeurspad opgesteld aan de hand van de gegevens die nu bekend zijn. Als figuur 14 met daarin de paden opgesteld in de sensitiviteitsanalyse erbij wordt genomen verandert dit beeld en wordt duidelijk dat naarmate kosten van compressoren dalen grotere capaciteiten benodigd zijn. Het leggen van een buisleiding met een diameter van 16 inch voldoet niet aan de eisen van een antifragiel systeem waarin redundantie en optionaliteit worden gebruikt om de onzekerheden te managen.

In de helft van de paden van figuur 14 kan een 16 inch diameter in 2030 niet meer de gevraagde capaciteit faciliteren. Om routes open te houden is het aan te raden om tussen 2020 en 2030 een buisleiding met een diameter van 42 inch te plaatsen waardoor de middelste gevraagde capaciteit wordt gedekt en er tot 2040 voldoende geïnstalleerde capaciteit is. De tijd tot 2040 kan gebruikt worden voor het monitoren van de signposts opgesteld in de contingency planning. Waardoor halverwege de jaren '30 voorbereidingen kunnen worden getroffen voor een eventuele opschaling aan de hand van nieuwe inzichten betreft marktontwikkeling en kosten.

Als de groei van de waterstofvraag doorzet kan worden gekozen voor de aanleg van een tweede buisleiding van 24, 42 of 48 inch. Er wordt tevens verwacht dat rond 2040 import van (groene) waterstof een substantiële rol gaat spelen op de Europese energiemarkt wat kan resulteren in een hogere benodigde geïnstalleerde capaciteit. Door deze strategie te hanteren wordt er in het eerste decennium gekozen voor overcapaciteit en kan in het tweede decennium een weloverwogen besluit worden gemaakt betreft de eventuele opschaling van het systeem. Aan te raden is om bij de aanleg van de eerste buisleiding voldoende ruimte te reserveren voor een potentiële parallelle tweede buisleiding later in de tijd. Zie ommezijde voor een grafische weergave van het dynamisch adaptieve pad.



2050

2050

*WATERSTOF: HOOFDBESTANDEEL
VAN DE ENERGIEMIX*

- TRANSITIE AFGEROND

2040

2040

*OPTIMALISATIE WATERSTOF IN
ENERGIEMIX*

- KLAAR ZIJN VOOR
GROOTSCHALIGE IMPORT VAN
WATERSTOF
- OPNIEUW DOORREKENEN
BESLISBOOM
- UITBREIDEN CAPACITEIT NAAR
VERWACHTE BEHOEFTE IN 2050
(24, 42 OF 48 INCH)

2030

2030

*HET BEGIN IS AF, KIJKEN NAAR DE
TOEKOMST*

- TOT 2035:
 - MONITOREN VAN
WATERSTOFTECHNOLOGIEËN
 - MONITOREN REALISATIE
BACKBONE
 - MONITOREN ECONOMIE
 - OPNIEUW DOORREKENEN
BESLISBOOM
- NA 2035:
 - INSPELEN OP RESULTATEN
MONITORING
 - PLANNEN VOOR
UITBREIDEN CAPACITEIT
(24, 42 OF 48 INCH)

2020

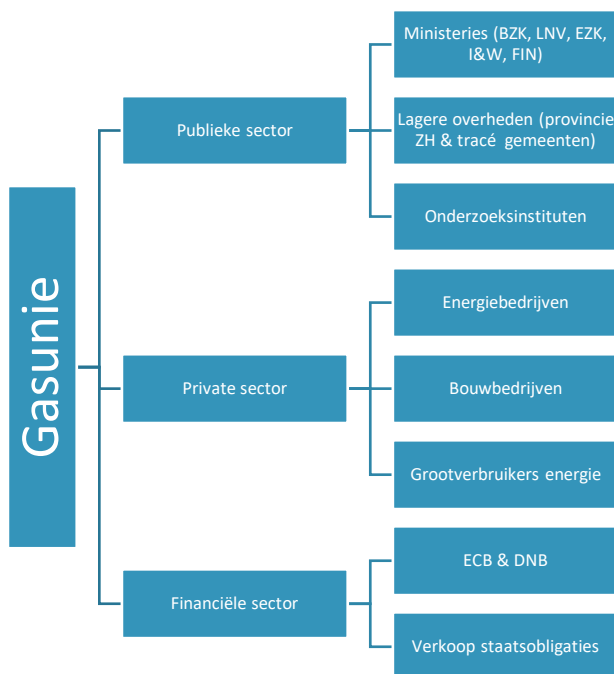
2020

DE EERSTE CONCRETE STAPPEN

- NO-REGRET: INSTALLEREN 42
INCH BUISLEIDING
- TRACÉ VRIJHOUDEN VOOR
UITBREIDING
- MONITOREN OP KLIMAATACTIE
- MONITOREN CAPACITEIT
DUURZAME ENERGIE

7.4 Implementatie en monitoring van het dynamische adaptieve plan

Geadviseerd wordt om de regie voor het realiseren van het waterstofnetwerk bij de Gasunie te leggen gezien zij ook de uitrol van de landelijke waterstofbackbone begeleiden. De Gasunie is tevens het staatsbedrijf met de meeste kennis beschikbaar op het gebied van buisleidingen en heeft in het verleden bewezen om snel de aardgasinfrastructuur te kunnen realiseren. Daarnaast heeft de Gasunie de buitenlandse contacten om contracten voor export te kunnen afsluiten. Het implementatie advies is om een consortium te vormen waarin de publieke, private en financiële sector samenwerken ten behoeve van een voorspoedige uitrol van het waterstofnetwerk. Zie Figuur 15.



Figuur 15: H2-consortium uitrol waterstofnetwerk

Publieke sector

De publieke sector heeft als taak om vergunningen, tracé bepaling, ruimtelijke inpassing en het beschikbaar stellen van overheidssubsidies te regelen. De rol van het Havenbedrijf zal zijn om geïmporteerde waterstof te ontsluiten via de waterstofinfrastructuur. De taak van de onderzoeksinstituten (Hogeschool Rotterdam, Erasmus Universiteit, IRENA, CBS, CPB etc.) is om de signposts te monitoren. Daarnaast dienen voldoende middelen te worden gereserveerd voor research and development waardoor technologische doorbraken op waterstofgebied worden gestimuleerd. Tot slot kan de overheid door middel van beleid aansturen op milieu- en klimaatvriendelijkere energie bijvoorbeeld door het doorrekenen van negatieve externaliteiten of het opercenten van waterstofauto's te schorten.

Private sector

De private sector heeft als taak om het waterstofnetwerk te realiseren maar ook om de markt te ontwikkelen door waterstof af te nemen en toe te passen als klimaatvriendelijk alternatief voor fossiele energie. Marktontwikkeling zal naar waarschijnlijkheid eerst aan multinationals worden overgelaten. Hierdoor wordt waterstof wijder beschikbaar en heeft het MKB de kans om

waterstofapplicaties te ontwikkelen en marktconform aan te bieden. Hierbij valt te denken aan nieuwe producten zoals hybridewarmtepompen maar ook aan windmolens met grotere generatoren waardoor windenergie beter kan worden benut en er meer overtollige stroom kan worden ingezet voor waterstofproductie.

Financiële sector

De financiële sector is nodig om investeringen op korte termijn te kunnen uitvoeren door voldoende kapitaal bijeen te brengen om substantiële investeringen te bekostigen. Voor de 70 km aan 42 inch buisleidingen worden de kosten boven de 800 miljoen geraamd. Ervan uitgaande dat er in de toekomst nog een buisleiding bij dient te worden gelegd zal het project de miljard euro gaan overschrijden waardoor het kan worden gezien als een megaproject. Dit is een substantiële overheidskostenpost. In ogeschouw nemende dat op termijn ook op andere plaatsen in Nederland vergelijkbare investeringen gedaan dienen te worden. Als dit wordt vergeleken met het budget van SDE+ (jaarlijks rond de 4 miljard) valt de prijs echter mee. Geadviseerd wordt om de plannen te bekostigen door middel van uitgifte van staatsobligaties. Op deze wijze voelt de Nederlandse burger niet direct de gevolgen en blijft de rente laag. Bijkomend voordeel is dat grote infrastructurele werken de reële economie stimuleren en Nederland sneller uit de nieuwe economische crisis kan komen.

7.5 Beantwoording deelvraag 5

In dit hoofdstuk is deelvraag 5: “Hoe kan de haven van Rotterdam op een adaptieve wijze een robuust waterstofdistributienetwerk realiseren?” beantwoordt. Dit is gedaan door het uitvoeren van een sensitiviteitsanalyse op de beslisboom waardoor alternatieve routes in kaart werden gebracht. Hierna zijn mogelijke toekomstige ontwikkelingen (contingency planning) geschetst die van grote invloed kunnen zijn op de uitrol van het waterstofnetwerk. De sensitiviteitsanalyse tezamen met de contingency planning vormden de input voor het dynamisch adaptieve plan. Er is een route met stapsgewijze acties per tijdshorizon gecreëerd rekening houdend met de onomkeerbaarheid van het aanleggen van de waterstofinfrastructuur. Hierin wordt aangeraden om een 42 inch buisleiding aan te leggen tot 2030. Met deze diameter kan waarschijnlijk in de capaciteit tot 2040 worden voorzien. Eind jaren '30 zal er geëvalueerd moeten worden of extra capaciteit vereist is en zo ja welke diameter hierin kan voorzien. Tot slot is er advies gegeven over de vorming van een H2-consortium waarin de Gasunie de lead heeft en wordt ondersteund door publieke, private en financiële instanties om de kans op een voorspoedige uitrol te vergewissen.

8 Discussie

In dit hoofdstuk worden de validiteit, beperkingen van het onderzoek en de onderzoeksresultaten beschreven. Daarnaast worden ook de gevolgen van het onderzoek behandeld in de paragraaf 'implicatie'.

8.1 Validatie

De trends op het gebied van waterstof en de waterstoftransitie zijn in kaart gebracht door middel van literatuurstudie. Deze trends zijn vervolgens geverifieerd en gevalideerd door middel van 'expert judgement'. In gesprekken met personen uit het werkveld is nagegaan of de in kaart gebrachte trends correct zijn en of er geen belangrijke trends over het hoofd zijn gezien. De geverifieerde en gevalideerde trends zijn vervolgens gebruikt in de scenario's en de beslisboom.

De vier scenario's die de basis vormen voor het berekenen van de benodigde transportcapaciteit en uiteindelijk de beslisboom, zijn opgesteld op basis van de benodigde hoeveelheid waterstof in de industrie en de hoeveelheid dat door de haven wordt getransporteerd. Deze scenario's zijn opgesteld aan de hand van theorie, onderschreven bronnen en expert kennis. Van de theorie is lichtelijk afgeweken omdat in de gekozen bron al een dergelijke analyse is gebeurd waardoor dit overbodig werd. De gebruikte bron voor de uitwerking is zorgvuldig geselecteerd op basis van indicatoren en afgewogen tegen andere mogelijk bruikbare bronnen. De originele aanpak was om de opgestelde scenario's te verifiëren bij een expert op het gebied van scenariocreatie. Dit bleek niet mogelijk te zijn waardoor de scenario's geverifieerd en uitgebreid zijn in verschillende sessies met stakeholders. Bij het opstellen van de scenario's voor de hoeveelheid waterstof dat door de haven wordt getransporteerd, zou eenzelfde proces zoals bij de bovengenoemde scenario's doorlopen moeten worden. Vanwege de schaarste aan beschikbare informatie is besloten om de enige concrete en onderbouwde bron te gebruiken. De waarde uit deze bron is vervolgens omgerekend naar de andere scenario's toe en samengevoegd met de bovengenoemde scenario's.

De gehele uitwerking van de scenario's komt overeen met de opgestelde verwachtingen aan het begin van het onderzoek. De resultaten laten zien dat er veel verschillende mogelijkheden zijn waarop de waterstoftransitie zich in de Rotterdamse haven kan ontwikkelen.

Na het opstellen van de scenario's is het bestaande waterstofdistributienetwerk in de haven van Rotterdam geanalyseerd om hierna te kunnen bepalen waar en welke aanpassingen mogelijk zijn aan het bestaande netwerk. In deze analyse zijn twee bestaande netwerken naar voren gekomen: het waterstofnetwerk van Air Liquide en van Air Products. Vanuit de organisaties zelf zijn niet tot nauwelijks gegevens beschikbaar over de netwerken. De informatie die achterhaald is van beide netwerken, komen hoofdzakelijk vanuit adviesrapporten. Hierbij is aangenomen dat deze adviesrapporten valide zijn en overeenkomen met de laatste inzichten, waardoor aangenomen kan worden dat de analyse van het bestaande waterstofnetwerk valide is.

Doordat het bestaande waterstofnetwerk te klein is om de in de scenario's geformuleerde waterstofvraag te transporteren en er gegevens niet beschikbaar zijn, is er naast het waterstofnetwerk ook het bestaande aardgasdistributienetwerk in kaart gebracht. Hier is het aardgasnetwerk van de Gasunie in en rondom de haven van Rotterdam geanalyseerd. In deze analyse zijn gegevens van de Gasunie zelf gebruikt, maar ook gegevens vanuit (advies-)rapporten, vanwege de beperkte beschikbaarheid van gegevens van dit netwerk. Hierbij is ook aangenomen dat deze (advies-)rapporten valide zijn en overeenkomen met de laatste inzichten en gegevens, waardoor aangenomen kan worden dat de analyse van het aardgasnetwerk valide is.

Op basis van de in de scenario's geformuleerde waterstofvraag is de benodigde capaciteit voor het waterstofdistributienetwerk berekend. De berekening van de capaciteit bestaat uit twee onderdelen:

de benodigde inwendige buisdiameter en de benodigde compressorcapaciteit. Voor het achterhalen van de benodigde inwendige buisdiameters zijn twee verschillende formules gebruikt om te valideren of de uitkomsten kloppen. Na een vergelijking van de resultaten die voortkomen uit de formules is te zien dat er een afwijking van maximaal (scenario C3) 1,45 mm tussen de berekenende buisdiametersaanwezig is. Deze afwijking is, na afronding en omzetting naar inches, verwaarloosbaar. De berekenende benodigde inwendige buisdiameter kan door deze vergelijking worden gezien als valide zijnde. Voor het berekenen van de benodigde compressor capaciteit is uitgebreid onderzoek uitgevoerd en gesproken met experts. De berekende compressor capaciteit is gebaseerd op de aanname dat voor een debiet van 1 kg waterstof per uur een compressor capaciteit nodig is van 0,517 kW ervan uitgaande dat er gebruik wordt gemaakt van een diafragma- of zuigercompressor. Door de beperkte gegevens, zijn deze gegevens overgenomen uit de literatuur met de aanname dat deze valide zijn. De berekende compressor capaciteit geeft een indicatie van de benodigde capaciteit, dit is echter niet de realiteit omdat dit nog niet eerder is gedaan voor hoeveelheden waterstof die zijn geformuleerd in de scenario's.

Het bepalen van de investerings- en onderhoudskosten van waterstofpijpleidingen en compressorstations is gedaan door literatuur te analyseren en de hieruit voortkomende gegevens te gebruiken. Voor de bepaling van de investeringskosten en onderhoudskosten zijn de laatste inzichten gebruik. De berekende kosten zijn gebruikt als input voor de beslisboom en zijn op een vergelijkbare wijze bepaald. De aanname hierbij is dat de gegevens in de literatuur, opgesteld door een derde partij, valide zijn.

De beslisboom is gevalideerd op drie punten (zie Bijlage 10 Uitwerking beslisboommethode): 1. Inhoudsvaliditeit: Kloppen de gegevens? 2. Indruksvaliditeit: Is het op de juiste manier doorgerekend? En 3. Ecologische validiteit: Zijn de resultaten waarheidsgetrouw? Uit deze validatie blijkt dat de uitvoering en resultaten van de beslisboom valide zijn en daarmee ook het optimale pad wat hieruit is voortgekomen.

8.2 Beperkingen

Tijdens het in kaart brengen van de trends op het gebied van waterstof zijn beperking naar voren gekomen. Zo zijn er om de waterstoftransitie van start te laten gaan grote geldbedragen vanuit de overheid gereserveerd. Het is echter onzeker of deze financiële commitment zich in de toekomst doorzet. Deze beperking heeft daarmee mogelijk ook invloed op de uitkomst van de beslisboom en de adaptieve strategie. Daarnaast kost het produceren van waterstof door middel van elektrolyse veel energie en heeft het zelfs een negatieve energiebalans. Het produceren door middel van elektrolyse wordt pas voordelig wanneer er een overproductie is van duurzame energie dat geen aansluiting meer kan vinden op het elektriciteitsnet. Dit is echter afhankelijk van de bereidheid van Nederland en energetische buurlanden om bijvoorbeeld grote windparken aan te leggen. Toekomstige prijzen van waterstof zijn lastig te voorspellen en zijn afhankelijk van innovaties en financiële commitment van de betrokken partijen. De toekomstige waterstofvraag zal waarschijnlijk toenemen in sectoren die lastig zijn te decarboniseren (mobiliteit, industrie, en gebouwde omgeving). Wanneer de kosten van technische innovaties in de mobiliteit en gebouwde omgeving lager worden, dan zal de waterstoftransitie hier mogelijk ook gaan spelen. Daarnaast kan het importeren van waterstof kan in de komende decennia gaan groeien. De Europese periferie (o.a. Algerije en Oekraïne) herbergt grote duurzame potenties en kan gebruikt worden om waterstof te produceren en transporteren naar Europa. Echter zal hiervoor de volumes moeten toenemen en de landen in de Europese periferie veilig en betrouwbaar zijn zodat dit getransporteerd worden via een pijpleiding. Dat kan mogelijk een negatieve impact kan hebben voor Rotterdam als beoogd 'waterstofhub'. De beperkingen als het gevolg van de onzekerheid in toekomstige waterstofprijzen,

de toekomstige waterstofvraag en waterstofherkomst hebben allemaal invloed op de resultaten van de beslisboom en de adaptieve strategie.

Het uitwerken van de scenario's die worden gebruikt als basis voor de capaciteit berekening van het netwerk en de beslisboom heeft een aantal beperkingen opgeleverd. De eerste beperking is het gevolg van het werken in de toekomst. Het werken in de toekomst kan niet worden gebaseerd op feiten maar moet worden gebaseerd op onderbouwde aannames vanuit rapporten. Dit zorgt ervoor dat de resultaten van de toekomstscenario's zo goed mogelijk zijn opgesteld maar waarschijnlijk nooit 100% overeen zullen komen met de werkelijkheid. Een voorbeeld hiervan is de 20 miljoen waterstof dat door de Rotterdamse haven zal stromen in 2050. Dit getal is een rond getal en daardoor bruikbaar voor uitwerkingen. In de toekomst zal deze waarde afwijken en de vraag is hoe significant deze afwijking zal zijn van deze afgeronde waarde. Deze beperking zorgt ervoor dat de benodigde netwerkcapaciteit en beslisboom uitkomsten mogelijk kunnen veranderen.

Een andere beperking is dat door de beperkte tijd en capaciteit die de projectgroep tot zijn beschikking heeft niet elk scenario kan worden uitgewerkt. Hierdoor zijn een aantal potentieel nuttige scenario's niet uitgewerkt. Zoals eerder in de paragraaf 8.1 gesteld, is het ook een beperking dat de scenario's niet geverifieerd konden worden met een expert.

Na het uitwerken van de scenario's is het bestaande waterstofdistributienetwerk geanalyseerd. De analyse van het bestaande netwerk is uitgevoerd om later te kunnen bepalen welke aanpassing er aan het netwerk gedaan kunnen worden. Deze analyse bestaat uit een analyse van het waterstofnetwerk en het aardgasnetwerk. Het analyseren van het bestaande waterstofdistributienetwerk in de haven van Rotterdam leverde twee bestaande netwerken op die eigendom zijn van Air Liquide en Air Products. Een beperking van deze analyse is dat van het Air Products netwerk, op de totale omvang na, geen gegevens openbaar zijn, hierdoor zijn de capaciteit en de afmetingen van dit netwerk niet in kaart gebracht.

Naast het bestaande waterstofnetwerk is ook het bestaande aardgasnetwerk in de haven van Rotterdam geanalyseerd. Hierbij zijn onder ander de diameter, locatie en druk van de pijpleiding van Gasunie in kaart gebracht. Een beperking bij deze analyse zijn gegevens van de Gasunie met betrekking tot de exacte lengte van de pijpleiding op het traject Tweede Maasvlakte – Wijngaarden, het debiet en de ouderdom van de pijpleiding. Deze gegevens zijn bedrijfsgevoelige informatie en zijn daardoor niet verstrekt en/of beschikbaar. Het ontbreken van het debiet van de aardgaspijpleiding in de haven van Rotterdam heeft echter geen invloed op de resultaten, het ontbreken van de exacte lengte en de ouderdom kunnen die mogelijk wel hebben. Doordat er later in het onderzoek is gerekend met pijpleidingkosten per kilometer kunnen de uiteindelijke kosten hoger of lager uitvallen. Dit komt doordat er op basis van een interview met de Gasunie een geschatte trajectlengte van 70 kilometer is gebruikt. Het ontbreken van de ouderdom van de aardgaspijpleiding kan invloed hebben op de beslissingsmomenten binnen de adaptieve strategie wanneer deze voor 2050 vervangen moet worden.

Met de in de scenario's geformuleerde waterstofvraag is de benodigde capaciteit berekend van het waterstofdistributienetwerk. Een grote beperking in deze berekening is de compressorcapaciteit. De berekende compressorcapaciteit geeft een indicatie van het benodigde vermogen maar weerspiegelt niet de realiteit. Er zijn te weinig gegevens bekend over waterstofcompressoren om een goed beeld te beschrijven over de benodigde capaciteit voor de grote vraag aan waterstof. Deze beperking kan mogelijk invloed hebben op de uitkomst van de beslisboom en dus de adaptieve strategie. Voor dit aspect is het aan te raden om bij realisatie van een waterstofnetwerk dit nader te onderzoeken. Voor de pijpleiding is alleen de inwendige diameter berekend benodigd voor het transporteren van de vraag aan waterstof gesteld in de scenario's. Aspecten zoals wanddikte, verval en benodigde

compressor stations zijn niet meegenomen. Daarnaast zijn de investeringskosten voor het realiseren/aanpassen van pijpleidingen gebaseerd op percentages die als kengetallen gehanteerd worden in de literatuur. Ook is het belangrijk om te vermelden dat de kosten en ontwerpparameters die gepaard gaan met het realiseren van een pijpleiding kunnen verschillen per locatie. Op een bepaalde locatie kunnen de omstandigheden gunstiger zijn als op een andere locatie en kunnen kosten en parameters aanzienlijk verschillen. Gasmeterstations zijn buiten de scope gelaten omdat deze voornamelijk gebruikt worden voor de overgang van het transportnetwerk naar het lokale distributienetwerk (voor gebruik binnen huishoudens). Het is voor transporteren van waterstof in mindere mate van belang als voor het distribueren ervan. Verder gaan er risico's gepaard met het transporteren van waterstof door pijpleidingen. Deze risico's zijn niet meegenomen binnen dit onderzoek.

Op basis van de formuleerde scenario's en de berekende benodigde netwerkcapaciteit is de beslisboom opgesteld en uitgewerkt. Tijdens het uitwerken van de beslisboom zijn enkele beperkingen naar voren gekomen. De eerste beperking is dat de kosten en baten in de beslisboom gebaseerd zijn op huidige informatie. In de toekomst kunnen deze kosten en baten veranderen aan de hand van technische ontwikkelingen op het gebied van waterstof. Hiermee kan de voorkeursroute mogelijk ook veranderen. De tweede beperking is dat er in de beslisboom de risico's niet zijn meegenomen. De risico's kunnen ervoor zorgen dat de investeringskosten hoger kunnen liggen. In de sensitiviteitsanalyse zijn de veranderende transportkosten van waterstof meegenomen. De waterstoftransitie wordt niet alleen vanuit de private sector gefinancierd maar zal voor een groot deel publiek geld bevatten via subsidiering. Deze kosten en baten zijn echter niet meegenomen in de beslisboom.

8.3 Implicatie

De adaptieve strategie, zoals beschreven in hoofdstuk 7, kan mogelijk de waterstofambities voor 2050 in de haven van Rotterdam faciliteren en dus ook bijdragen aan de decarbonisatiedoelen. Deze methode kan inzicht geven aan de te nemen maatregelen en daarmee besluitvormers helpen in de planning van het uitvoeren van maatregelen aan de hand van een concreet doel, bijvoorbeeld het decarboniseren van de haven van Rotterdam.

De uitkomsten van deze beslisboom is echter afhankelijk van de uiteindelijke vraag en aanbod naar waterstof en technische ontwikkelingen op het gebied van waterstof en waterstoftransport. Een aantal van deze mogelijke ontwikkelingen zijn in kaart gebracht in de 'contingency planning'. Veel hangt daarbij af van de industriële partijen in de haven van Rotterdam en de rol van de overheid. Gaat de industriële sector inzetten op de waterstoftransitie of gaan ze voorlopig wachten? En gaat de overheid een actieve rol of passieve rol spelen in de waterstoftransitie? Een factor in de rol van de overheid is de druk vanuit de bevolking. De bevolking kan namelijk via verkiezingen invloed uitoefenen op het beleid.

Naast de rollen van de betrokken partijen zijn er nog vraagtekens rondom technische aspecten met betrekking tot het transport van waterstof door buisleidingen. Zo is weinig bekend over de soort compressoren die nodig zijn voor waterstoftransport door pijpleidingen en wat de ideale compressie hierbij is.

9 Conclusie

In dit hoofdstuk is antwoord gegeven op de hoofdvraag van dit onderzoek: *“Volgens welke adaptieve strategie kan een distributienetwerk gerealiseerd worden om de ambities voor 2050 op het gebied van waterstof van de haven van Rotterdam te faciliteren?”*. Om deze hoofdvraag te kunnen beantwoorden, zijn eerst de antwoorden op de deelvragen behandeld:

Deelvraag 1: Welke trends hebben impact op de waterstoftransitie in de haven?

De waterstoftransitie kan doorwerken op de drie energievormen (warmte, motorbrandstoffen en elektriciteit) in het energiesysteem. Echter, is het de vraag wanneer waterstof als volwaardig energiealternatief de energiemarkten kan penetreren. Dit is afhankelijk van de prijs van waterstof en concurrentievermogen met bestaande energiebronnen. Voor sectoren als de gebouwde omgeving en mobiliteit lijkt waterstof dit decennium nog een marginale rol te vervullen. Het zwaartepunt van waterstof ligt momenteel bij de industrie gezien waterstof klimaatvriendelijke productie van producten mogelijk maakt. Schattingen van de toekomstige waterstofvraag zijn zeer onzeker en afhankelijk van het succes van technologische innovaties. Dat de vraag naar waterstof in de toekomst gaat toenemen is waarschijnlijk maar hoeveel is onzeker. Om dit te ondervangen zijn scenario's opgesteld die uitgaan van verschillende waterstofvragen.

Deelvraag 2: Welke scenario's met betrekking tot de waterstofambities in 2050 zijn toepasbaar op de haven?

Binnen dit rapport is onderzoek gedaan naar verschillende scenario's voor de benodigde waterstof in de Rotterdamse haven en hoeveel waterstof er door de haven wordt vervoerd. Middels het gebruik van diverse bronnen zijn de volgende scenario's opgesteld:

- **Scenario A0** – het 0 scenario
 - Totale hoeveelheid waterstof door buisleidingen in de Rotterdamse haven: 0,5 Mt/jaar
- **Scenario A1** – het minimale scenario
 - Totale hoeveelheid waterstof door buisleidingen in de Rotterdamse haven: 4,761 Mt/jaar
- **Scenario B2** – het middelste scenario
 - Totale hoeveelheid waterstof door buisleidingen in de Rotterdamse haven: 11,716 Mt/jaar
- **Scenario C3** – het maximale scenario
 - Totale hoeveelheid waterstof door buisleidingen in de Rotterdamse haven: 21,05 Mt/jaar.

Deelvraag 3: Wat is de invloed van de waterstoftransitie op het bestaande distributienetwerk?

Het bestaande netwerk bestaat uit pijpleidingen van Air Liquide en van Air Products, bestemd voor de petrochemische industrie. De pijpleiding van Air Liquide is echter relatief klein dus minder geschikt voor het transporteren van grote hoeveelheden waterstof.

Na de analyse van het huidige waterstofnetwerk is de focus verlegd naar het bestaand aardgasnetwerk omdat het een optie is om de huidige aardgasinfrastructuur aan te passen voor het transport van waterstof. Dit is een interessante optie omdat de Groningse gaskraan wordt dichtgedraaid en de bijbehorende pijpleidingen op termijn niet meer gebruikt gaan worden. In en rondom de haven van Rotterdam liggen twee soorten gasleidingen van de Gasunie: een H-gas leiding en een G-gas leiding. Door de H-gas leiding wordt hoogcalorisch gas getransporteerd dat hoofdzakelijk geïmporteerd wordt. Door de G-gas leiding wordt Gronings gas getransporteerd en is dus op termijn (vanaf 2030 op zn vroegst) interessant voor het omvormen voor het transport van waterstof.

Deelvraag 4: Op welke haalbare wijze kan een waterstof distributienetwerk gerealiseerd worden?

Onderzocht is wat ervoor nodig is om waterstof door een buisleidingen te vervoeren, waar rekening mee gehouden moet worden, welke capaciteit benodigd is voor het transporteren van de vraag aan waterstof (zoals deze is geformuleerd in de verschillende scenario's) en wat het meest economische rendabel pad is. Met de vaststelling van het meest economisch rendabele pad is de meest haalbare wijze voor het realiseren van een waterstof distributienetwerk achterhaald. Het gaat binnen dit pad over het realiseren van twee buisleidingen van 70 kilometer lang met een diameter van 16 inch en een pijpleiding van 36 inch met een bijbehorende compressor capaciteit van 281 MW.

Opmerkelijk is dat dit pad zowel voor het realiseren van een nieuw netwerk geldt als het aanpassen van het huidige aardgasnetwerk. In beide situaties is het pad het meest economisch rendabel en dus de meest haalbare wijze voor het realiseren van een waterstof distributienetwerk. Dit komt omdat in beide situaties, na een initiële investering voor het realiseren van een 16 inch pijpleiding, de capaciteit vergroot kan worden met een 36 inch buis waarbij het mogelijk is om een bestaande pijpleiding aan te passen of een nieuwe pijpleiding te realiseren. Echter is het wel noodzakelijk om, voor deze uitbreiding, de compressor capaciteit te vergroten van 29,51 MW naar 281 MW (uitbreiding van 251,49 MW). Na deze realisatie/aanpassing blijven verdere investeringskosten uit. Het meeste economische rendabele pad sluit echter niet aan bij de werkelijke wereld. Om een voorkeurspad te genereren dat aansluit bij de werkelijke wereld is een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd. De resultaten van deze analyse vormen de input voor deelvraag 5.

Deelvraag 5: Hoe kan de haven van Rotterdam op een adaptieve wijze een robuust waterstof distributienetwerk realiseren?

In dit project is dit gedaan door het uitvoeren van een sensitiviteitsanalyse op de beslisboom waardoor alternatieve routes in kaart werden gebracht. Hierna zijn mogelijke toekomstige ontwikkelingen (contingency planning) geschetst die van grote invloed kunnen zijn op de uitrol van het waterstofnetwerk. De sensitiviteitsanalyse tezamen met de contingency planning vormden de input voor het dynamisch adaptieve plan. Er is een route met stapsgewijze acties per tijdshorizon gecreëerd rekening houdend met de onomkeerbaarheid van het aanleggen van de waterstofinfrastructuur. Hierin wordt aangeraden om een 42 inch buisleiding aan te leggen tot 2030. Met deze diameter kan waarschijnlijk in de capaciteit tot 2040 worden voorzien. Eind jaren '30 zal er geëvalueerd moeten worden of extra capaciteit vereist is en zo ja welke diameter hierin kan voorzien. Tot slot is er advies gegeven over de vorming van een H₂-consortium waarin de Gasunie de lead heeft en wordt ondersteund door publieke, private en financiële instanties om de kans op een voorspoedige uitrol te vergewissen.

Vanuit de conclusies van de deelvragen vloeit de beantwoording van de hoofdvraag voort.

Hoofdvraag: Volgens welke adaptieve strategie kan een distributienetwerk gerealiseerd worden om de ambities voor 2050 op het gebied van waterstof van de haven van Rotterdam te faciliteren?

Om tot een adaptieve strategie te komen is allereerst gekeken welke trends en scenario's toepasbaar zijn op de Rotterdamse haven. Ook is het huidige distributiesysteem geanalyseerd en is onderzocht op welke wijze een waterstof distributienetwerk gerealiseerd kan worden. Door het uitvoeren van deze stappen is een gedegen fundering voor de adaptieve strategie gevormd.

De adaptieve strategie (het dynamisch adaptieve plan) beschrijft hoe invulling kan worden gegeven aan het behalen van de benodigde transportcapaciteit door het uitvoeren van no-regret maatregelen per tijdsinterval (2020-2030-2040-2050). De no-regret maatregelen gaan uit van het referentiekader dat in de toekomst (2050) een gedecarboniseerde samenleving dient te worden bereikt. Volgens de adaptieve strategie dienen de volgende stappen genomen te worden:

2020 – De eerste concrete stappen

- No-regret maatregel: Installeren 42 inch buisleiding
- Tracé vrijhouden voor uitbreiding
- Monitoren op klimaatactie
- Monitoren capaciteit duurzame energie

2030 – Het begin is af, kijken naar de toekomst

Tot 2035:

- Monitoren van waterstoftechnologieën
- Monitoren realisatie backbone
- Monitoren economie
- Opnieuw doorrekenen beslisboom

Na 2035:

- Inspelen op resultaten monitoring

2040 – Optimalisatie waterstof in energiemix

- Klaar zijn voor grootschalige import van waterstof
- Opnieuw doorrekenen beslisboom
- Uitbreiden capaciteit naar verwachte behoefte in 2050

2050 – Waterstof: Hoofdbestanddeel van de energiemix

- Transitie afgerond

Geadviseerd wordt om de regie voor het realiseren van het waterstofnetwerk bij de Gasunie te leggen gezien zij ook de uitrol van de landelijke waterstofbackbone begeleiden. De Gasunie is tevens het staatsbedrijf met de meeste kennis beschikbaar op het gebied van buisleidingen en heeft in het verleden bewezen om snel de aardgasinfrastructuur te kunnen realiseren. Daarnaast heeft de Gasunie de buitenlandse contacten om contracten voor export te kunnen afsluiten. Het implementatie advies is om een consortium te vormen waarin de publieke, private en financiële sector samenwerken ten behoeve van een voorspoedige uitrol van het waterstofnetwerk.

10 Aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden aanbevelingen gedaan voor het verbeteren en voortzetten van dit onderzoek. Deze aanbeveling zijn voortgekomen vanuit de discussie van het onderzoek, de onderzoeksresultaten en de conclusie.

De implementatiestrategie, zoals beschreven in hoofdstuk 7, is een adaptieve strategie waarmee een waterstofdistributienetwerk in de haven van Rotterdam gerealiseerd kan worden en daarmee de waterstofambities van het havenbedrijf kan faciliteren. Aanbevolen is om bij het implementeren van deze strategie, nader onderzoek uit te voeren naar de benodigde compressor capaciteit en methode van comprimeren voor het transport van waterstof. Dit heeft als reden dat de berekening van de compressor capaciteit niet de realiteit weerspiegelt. Hierbij is het daarom ook nodig om onderzoek te doen naar de meest efficiënte compressie van waterstof voor het transport door pijpleidingen. Hiernaast, is het aan te bevelen om per locatie specifiek te kijken welke parameters gebruikt moeten worden voor het ontwerp, dit zal namelijk naar alle waarschijnlijkheid per locatie verschillen. Hierin is het, los van de dimensionering, ook van belang om na te gaan wat de (technische) vereisten zijn voor waterstofpijpleidingen (wanddiktes, materiaal, etc.).

Uit de berekende transportcapaciteit, om de verschillende vragen naar waterstof te kunnen faciliteren, komen pijpleidingen voor waterstoftransport met diameters van meer dan één meter naar voren. Gezien de dimensionering van deze pijpleidingen, is het aan te bevelen om onderzoek te doen naar de risico's van het transport van waterstof door pijpleidingen en dit volledig inzichtelijk te krijgen zodat de veiligheid gewaarborgd kan worden. Hiernaast is redundantie niet meegenomen in de bepaling van de benodigde transportcapaciteit. Dit is verstandig om nader te onderzoeken voor het verzorgen van een fail-safe binnen het systeem.

In de beslisboom is gerekend met gegevens gebaseerd op de beschikbare literatuur. In de beslisboom zelf staan statische gegevens waardoor deze gegevens niet inspelen op veranderende situaties. Voor elke tijdinterval moet gekeken worden naar de input gegevens om te bepalen of deze nog kalibratie nodig hebben. Als aanvulling voor de beslisboom, wordt aanbevolen om de risico's en de kosten die deze met zich meebrengen te verweken in de beslisboom zodat er een completer beeld gevormd kan worden.

Als aanbeveling in het kader van de onderzochte mogelijkheden is het verstandig om dit aspect uit te breiden en te onderzoeken naar het injecteren van waterstof in het aardgasnet. Deze mogelijkheid kan mogelijk worden gebruikt als kickstarter van de waterstof transitie. Uit de literatuur en interviews is de optie om waterstof bij te mengen en dit op het eindpunt weer te scheiden naar voren gekomen. Binnen dit onderzoek is dit niet meegenomen maar bestaat er de mogelijkheid dat dit een minder kostbaar alternatief is.

Als laatste is aangeraden om onderzoek uit te voeren naar de benodigde kwaliteit van de te transporteren waterstof en hier standaarden voor op te stellen. De reden hiervoor is dat, vanuit de literatuur en gehouden interviews, de petrochemische industrie mogelijk een hogere kwaliteit waterstof nodig heeft dan andere sectoren.

Bibliografie

- Afman, M., Rooijers, F., Aalberts-Bakker, J., van Grinsven, A., van Lieshout, M., Huigen, T., . . . Scholten, T. (2017). *Achtergrondrapport Net voor de Toekomst*. Delft: CE Delft.
- Agency for the cooperation of energy regulators. (2015). *Report on unit investment cost indicators and corresponding reference values for electricity and gas infrastructure*.
- Air Liquide. (sd). *Large Industries*. Opgeroepen op Oktober 18, 2020, van Air Liquide: <https://industrie.airliquide-benelux.com/belgie-nederland/levering-industriële-medische-gassen/gas-large-industry>
- Amer, M. (2011). Development of fuzzy cognitive map (FCM) based scenarios. *Portland International Center for Management of Engineering and Technology*, 1-15.
- Amer, M., Daim, T. U., & Jetter, A. (2012). A review of scenario planning. *Elsevier*.
- Andrea, R. (2016). *Development of Real Option Theory in the last 20 years*. Debrecen, Hongarije : University of Debrecen.
- At Osborne. (2018). *Buisleidingen in Nederland: Een marktverkenning*. Baarn.
- Bammer, G., & Smithson, M. (2008). *Uncertainty and Risk: Multidisciplinary Perspectives*. Londen, Verenigd Koninkrijk: Earthscan Publications.
- Banuls, V. A., & Turoff, M. (2011). Scenario construction via Delphi and cross-impact analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, 1579-1602.
- Benders, L. (2020, oktober 23). *Validiteit in je scriptie*. Opgehaald van Scribbr.nl: <https://www.scribbr.nl/onderzoeksmethoden/validiteit-van-scriptieonderzoek/>
- Ben-Haim, Y. (2001). *Information-Gap Theory: Decisions Under Severe Uncertainty*. Londen, Verenigd Koninkrijk: Academic Press.
- Boardman, A. E., Greenberg, D. H., Vining, A. R., & Weimer, D. L. (2018). *Cost-Benefit Analysis, Concepts and Practice* (Fifth ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Brendel, M. (2010, Juli 3). *Eerste compressorstation Noord-Zuid route gasvoerend*. Opgeroepen op November 9, 2020, van Technisch weekblad.nl: <https://www.technischweekblad.nl/nieuws/eerste-compressorstation-noord-zuid-route-gasvoerend>
- Cobouw Bouwkosten GWW. (2020). *Aanbrengen, lossen, leggen en stellen buis, staal*. Opgeroepen op November 3, 2020, van GWWkosten.nl: https://www-gwwkosten-nl.hvhl.idm.oclc.org/Calculeren/Infra_en_groen/_Aanbrengen,_lossen,_leggen_en_stellen_buis,_staal/kostengegevens-kostenkengetallen/3387395-2015RAW.htm
- Cobouw Bouwkosten GWW. (2020). *Stalen Buis*. Opgeroepen op November 3, 2020, van GWWkosten.nl: https://www-gwwkosten-nl.hvhl.idm.oclc.org/Materiaalprijzen/Kabel_en_leidingwerk/_Stalen_buis/kostengegevens-prijzen,_normen_en_tarieven/2930755-2015RAW.htm
- da Silva Veras, T., Simonato Mozer, T., da Costa Rubim Messeder dos Santos, D., & da Silva César, A. (2016, September 28). Hydrogen: Trends, production and characterization of the main process worldwide. *Elsevier*, pp. 2019 - 2033.

- DCMR Milieudienst Rijnmond. (2011). *Aanvullende berekeningen EV Bestemmingsplan Spijkenisse*.
- DNV GL. (2017). *Verkenning waterstofinfrastructuur*. Groningen: DNV GL.
- DNV GL. (2019). *Filling the data gap: an update of the 2019 hydrogen supply in the Netherlands*.
- DNV GL. (2020). *Taskforce infrastructuur klimaatakkoord industrie: Meerjaren programma infrastructuur energie en klimaat*.
- Energie-Nederland. (2020, Oktober 18). *feiten en cijfers verbruik en emissies*. Opgehaald van energie-nederland: <https://www.energie-nederland.nl/feiten-en-cijfers/verbruik-en-emissies/>
- Enzer, S. (1972). Cross-impact techniques in technology assessment. *Elsevier*. Opgehaald van <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0016328772900237>
- European Sting. (2020, Juli 03). *Billions for sustainable investments – Germany’s plan for a green recovery*. Opgehaald van The European Sting: <https://europeansting.com/2020/07/03/billions-for-sustainable-investments-germanys-plan-for-a-green-recovery/>
- Eurostat. (2020, Oktober 06). *From where do we import energy and how dependent are we?*. Opgehaald van ec.europa.eu: <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy/bloc-2c.html>
- Fenske, G., & Erck, R. (2010). *Hydrogen Pipeline Compressors*. Argonne, Illinois: Argonne National Laboratory.
- Gasunie. (sd). *Begrippenlijst: Compressorstations*. Opgeroepen op Oktober 20, 2020, van Gasunie: <https://www.gasunie.nl/begrippenlijst/compressorstation>
- Gasunie. (sd). *Begrippenlijst: Meet- en regelstation*. Opgeroepen op Oktober 19, 2020, van Gasunie: <https://www.gasunie.nl/begrippenlijst/meet-en-regelstation>
- Gasunie Transport Services. (2014). *Ontwerp uitgangspunten transportsysteem*. Groningen.
- Gasunie Transport Services. (2015, Juli 14). *Het transportnetwerk*. Opgeroepen op Oktober 12, 2020, van Gasunie Transport Services: <https://www.gasunietransportservices.nl/netwerk-operations/het-transportnetwerk>
- Gasunie, TenneT. (2019). *Infrastructure Outlook 2050: A joint study by Gasunie and TenneT on integrated energy infrastructure in the Netherlands and Germany*.
- Gemeente Rotterdam. (2009). *Bestemmingsplan Hoogvliet Noordwest*. Rotterdam.
- Gigler, J., Weeda, M., Hoogma, R., & de Boer, J. (2020). *Waterstof voor de energietransitie*. Amersfoort: Topsector Energie.
- Gillette, J., & Kolpa, R. (2007). *Overview of Interstate Hydrogen Pipeline Systems*. Lemont, Illinois: Argonne National Laboratory.
- Gordijn, F., Ernstman, N., Helder, J., & Brouwer, H. (2018). *Reflection Methods, Practical Guide for Trainers and Facilitators*. Wageningen: Wageningen Centre for Development Innovation,.
- Gordon, T., & Hayward, H. (1968). Initial experiments with the cross impact matrix method of forecasting. *Elsevier*. Opgehaald van <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016328768800035>

- Haasnoot, M., Middelkoop, H., Offermans, A., van Beek, E., & van Duersen, W. P. (2012). Exploring pathways for sustainable water management in river deltas in a changing environment. *Climatic Change*, 795-819.
- Haasnoot, M., Walker, W. E., Kwakkel, J. H., & ter Maat, J. (2013). Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. *Global Environmental Change*(23), 485-498.
- Hand, E. (2020). Company to harvest green hydrogen by igniting oil fires underground. *Sciencemag*.
- Havenbedrijf Rotterdam. (2020). *Haven van Rotterdam wordt internationale waterstofhub*. Rotterdam: Havenbedrijf Rotterdam.
- Helton, J. (1994). *Treatment of uncertainty in performance assessments for complex systems*. Herndon, Virginia, Verenigde Staten van Amerika: Journal of Risk Analysis.
- Henrion, M., & Fischhoff, B. (1986). *Assessing uncertainty in physical constants*. Annual Journal of Physics.
- Hers, S., Scholten, T., van der Veen, R., van de Water, S., Leguijt, C., & Rooijers, F. (2018). *Waterstofroutes Nederland*. Delft: CE Delft.
- Hox, J. J., & Boeijs, H. R. (2005). Data collection, Primary vs. Secondary. *Encyclopedia of Social Measurements*, 593-599.
- H-vision. (2019). *Annexes to the H-vision Main Report*.
- H-vision. (2019). *Blue hydrogen as accelerator and pioneer for energy transition in the industry*.
- Idealhy.eu. (z.d.). Liquid Hydrogen Outline. Opgehaald van https://www.idealhy.eu/index.php?page=lh2_outline
- INTECH GmbH. (2020, november 9). *Pipeline Design and Selection. Optimum Pipeline Diameter*. Opgehaald van INTECH-GmbH: https://intech-gmbh.com/pipelines_calc_and_select/#pipelines_design
- International Renewable Energy Agency. (2018). *Renewable Energy Prospects for the European Union*. Brussel: Europese Commissie.
- International Renewable Energy Agency. (2019). *Hydrogen a renewable energy perspective*. Tokio, Japan: IRENA.
- Kahneman, D., & Tversky, A. (1982). *Variants of uncertainty*. Cambridge: Cambridge University.
- Kiwa Technology B.V. (2018). *Toekomstbestendige gasdistributienetten*. Apeldoorn: Kiwa Technology B.V.
- Klimaatakkoord. (2019). *Klimaatakkoord*. Den Haag: EZK, BZK, LNV, I&W.
- Knoot, J. (sd). *FOETSJE-model: Marketingstrategie testen*. Opgeroepen op November 17, 2020, van Strategischmarketingplan.com: <https://www.strategischmarketingplan.com/marketingmodellen/foetsje-model/>
- Kolmogorov, A. (1956). *Foundations of the theory of probability*. New York, New York, Verenigde Staten van Amerika: Chelsea Publishing Company New York.

- Koopmans, T. (1957). *Three essays on the state of economic science*. New York, New York, Verenigde Staten van Amerika: Yale University.
- Kumar, R. (2019). *Research Methodology: A step-by-step guide for beginners*. Londen: Sage Publications Ltd.
- Lancaster Pipeline. (2020, November 11). *Lancaster Pipeline*. Opgehaald van Lancasterpipeline: <http://www.lancasterpipeline.org/pipeline-lifetime>
- Lensvelt, T. (2020, November 12). Interview Shell. (J. van Ekris, & J. Mulder, Interviewers)
- Li, Y., Chen, J., & Feng, L. (2012). *Dealing with Uncertainty A Survey of Theories and Practices*. Beijing: Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University.
- Lindsey, T. (2020, September 10). Latest Developments in the Emerging Hydrogen Economy. *Latest Developments in the Emerging Hydrogen Economy* (p. 34). Champaign Illinois : Smart Energy Design and Assistance Center. Opgehaald van <https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/108370/Tim%20Lindsey%20The%20Emerging%20Hydrogen%20Economy%20September%2010%2c%202020.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Linowes, L. (2018). *Texas Wind Power Story: Part 1 How Subsidies Drive Texas Wind Power Development*. Austin, Texas, United States of America : Texas Public Policy Foundation.
- Liu, B. (2011). *Why is there a need for uncertainty theory?* Beijing, Volksrepubliek China : Tsinghua Universiteit.
- Marquis de Laplace, P. (1814). *Essai philosophique sur les probabilités*. Parijs: Imprimeur Libraire pour les Mathématiques.
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. (2019). *Kamerbrief over Groeistrategie voor Nederland op de lange termijn*. Den Haag: Tweede Kamer der Staten-Generaal.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu en het Ministerie van Economische zaken, Landbouw en Innovatie. (2012). *Structuurvisie Buisleidingen 2012-2035*. Den Haag: Ministerie van Infrastructuur en Milieu en het Ministerie van Economische zaken, Landbouw en Innovatie.
- Moreira Silva, J., & Dom Cabral, F. (2014). *Real Options Theory: An alternative methodology applicable to investment analyses in R&D Projects*. Journal of Basic and Applied Sciences.
- National Research Council. (2000). *Risk Analysis and Uncertainty in Flood Damage Reduction Studies*. Ottawa, Canada: National Academy Press.
- Natke, H., & Ben-Haim, Y. (1996). *Uncertainty: a discussion from various points of view*. Berlijn: Akademie Verlag.
- New Mobility News. (2020, September 04). *France follows Germany with €7 billion for 'green' hydrogen*. Opgehaald van Newmobility: <https://newmobility.news/2020/09/04/france-follows-germany-with-e7-billion-for-green-hydrogen/>
- New York Times. (2020, Augustus 04). *BP Reports a Huge Loss and Vows to Increase Renewable Investment*. Opgehaald van New York Times: <https://www.nytimes.com/2020/08/04/business/energy-environment/bp-renewable-investment.html>

- North Sea Energy. (2020). *Technical assessment of Hydrogen transport, compression, processing offshore*. Eindhoven: TNO.
- Offshore Technology. (2018, januari 14). *Transporting oil and gas: the world's longest pipelines*. Opgehaald van offshore-technology: <https://www.offshore-technology.com/features/worlds-longest-pipelines/#:~:text=With%20a%20diameter%20of%20142cm,by%20national%20energy%20giant%20Gazprom>.
- Pillkahn, U. (2008). *Using Trends and Scenarios as Tools for Strategy Development*.
- Port of Rotterdam. (2019). *Energie-infrastructuur in het Rotterdamse havengebied*.
- Port of Rotterdam. (2019). *Havenvisie Rotterdam 2030*. Rotterdam: Port of Rotterdam.
- Port of Rotterdam. (2020, September 17). *Energietransitie*. Opgehaald van portofrotterdam: <https://www.portofrotterdam.com/nl/zakendoen/haven-van-de-toekomst/energietransitie/waterstof-in-rotterdam>
- Port of Rotterdam. (2020). *Visie Havenbedrijf Rotterdam N.V. Energietransitie vereist nieuwe buisleidingen Rotterdam, Chemelot en Noordrijn-Westfalen*. Rotterdam: Port of Rotterdam.
- Port of Rotterdam. (2020). *Waterstofeconomie in Rotterdam start met backbone*. Opgehaald van <https://www.portofrotterdam.com/nl/zakendoen/haven-van-de-toekomst/energietransitie/waterstof-in-rotterdam>
- Port of Rotterdam, Rijksoverheid, provincie Zuid Holland, Deltalinqs en gemeente Rotterdam. (2019). *Havenvisie*.
- Provincie Groningen. (2019). *INVESTERINGSAGENDA WATERSTOF NOORD-NEDERLAND*. Groningen: Provincie Groningen.
- Rijksoverheid. (2020, September 21). *Gaskraan Groningen verder dicht*. Opgeroepen op Oktober 19, 2020, van Rijksoverheid: [https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2020/09/21/gaskraan-groningen-verder-dicht#:~:text=De%20gaswinning%20uit%20het%20Groningenveld,Klimaat\)%20over%20het%20zogenaamde%20vaststellingsbesluit](https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2020/09/21/gaskraan-groningen-verder-dicht#:~:text=De%20gaswinning%20uit%20het%20Groningenveld,Klimaat)%20over%20het%20zogenaamde%20vaststellingsbesluit).
- Rijksoverheid. (sd). *Factor C*. Opgeroepen op September 10, 2020, van CommunicatieRijk: <https://www.communicatierijk.nl/vakkennis/factor-c>
- Rijksoverheid. (sd). *Factor-C*. Opgeroepen op November 2, 2020, van CommunicatieRijk: <https://www.communicatierijk.nl/vakkennis/factor-c>
- Rotman, E. (2020, Januari 30). *Duurzaam bedrijfsleven*. Opgehaald van Duurzaam bedrijfsleven: <https://www.duurzaambedrijfsleven.nl/industrie/33231/fossielvrij-staal-groene-waterstof>
- S&P Global. (2020, Juni 02). *EU needs Eur430 billion to scale up hydrogen by 2030: trade body*. Opgehaald van Standard & Poors: <https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/electric-power/060220-eu-needs-eur430-billion-to-scale-up-hydrogen-by-2030-trade-body>
- Schwartz, E., & Trigeorgis, L. (2001). *Real Options and Investment Under Uncertainty*. Boston, Massachusetts, Verenigde Staten van Amerika: The MIT Press.

- Schwartz, P. (1996). *The Art of the Long View: Planning for the Future in an Uncertain World*.
- Scribbr. (2017). *Hoe doe je deskresearch?* Opgehaald van <https://www.scribbr.nl/scriptie-structuur/hoe-doe-je-deskresearch/>
- Shell. (2017). *Energy of the future? Sustainable mobility through Fuel Cells and H2*. Hamburg: Shell Deutschland Oil GmbH.
- Sociaal-Economische Raad. (2014). *Brandstofvisie*. Den Haag: Sociaal-Economische Raad.
- Sparidaens, C. (2020, November 26). *Honderden Europese miljoenen voor noordelijke provincies*. Opgehaald van NOS: <https://nos.nl/artikel/2358126-honderden-europese-miljoenen-voor-noordelijke-provincies.html>
- Stedin. (2020). *Waterstof in de gebouwde omgeving*. Rotterdam: Stedin.
- Taneja, P., Van Schuylenburg, M., & Ligteringen, H. (2008). *Dealing with uncertainty in design of port infrastructure systems*. Delft: Technische Universiteit Delft.
- Tebodin Netherlands B.V. (2015). *QRA Leidingen Air Liquide: Alle Leidingen*. Velsen-Noord.
- The White House. (2003, Januari 28). *White House Archives*. Opgehaald van White House Archives: https://georgewbush-whitehouse.archives.gov/infocus/technology/economic_policy200404/chap2.html
- TNO. (z.d.). Tien dingen die je moet weten over waterstof.
- van den Berg, A. (2020, Oktober 27). Interview Gasunie. (O. ten Voorde, & J. Mulder, Interviewers)
- Van den Berg, A. (2020, 10 29). Waterstoftransitie in de haven van Rotterdam. (J. Mulder, Interviewer)
- van den Boomen, M., Spaan, M., Schoenmaker, R., & Wolfert, A. (2019). *Untangling decision tree and real options analyses: a public infrastructure case study dealing with political decisions, structural integrity and price uncertainty*. Journal of Construction Management and Economics.
- van den Boomen, M., Spaan, M., Yue, S., & Wolfert, A. (2020). *Infrastructure maintenance and replacement optimization under multiple uncertainties and managerial flexibility*. Journal of Construction Management and Economics.
- van Gessel, S., Breunese, J., Juez Larré, J., Huijskes, T., & Remmelts, G. (2018). *Ondergrondse Opslag in Nederland - Technische Verkenning*. Utrecht: TNO.
- van Soest, J., & Warmenhoven, H. (2019). *Waterstof in het klimaatakkoord: Rapportage van cross-sectorale werkgroep waterstof aan de klimaattafels elektriciteit en industrie*.
- van 't Hek, J., & van Oss, L. (2020). *Antifragiliteit als systeemeigenschap*. Meer dan de som der delen.
- Van Wijk, A., & Chatzimarkakis, J. (2020). *Green Hydrogen for a European Green Deal A 2x40 GW Initiative*. Brussels : Hydrogen Europe.
- Wageningen University and Research. (2003). *Performance-indicatoren*.
- Wang, A., van der Leun, K., Peters, D., & Buseman, M. (2020). *European Hydrogen Backbone*. Utrecht: Guidehouse.

Werkgroep industriecluster Rotterdam-Moerdijk. (2018). *In drie stappen naar een duurzaam industriecluster Rotterdam-Moerdijk in 2050.*

Wilkinson, L. (1995). How to build scenarios. Opgehaald van http://www.cse.chalmers.se/research/group/idc/ituniv/kurser/09/hcd/literatures/Wilkinson%20on%20scenarios_Martin%20B.pdf

Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy. (2016). *Decarbonization Pathways for the Industrial Cluster of the Port of Rotterdam.*

Bijlagen

In Tabel 16 is een overzicht weergegeven van de bijlagen:

Tabel 16: Overzichtstabel bijlagen

Bijlagennummer	
Bijlage 1	Netwerkanalyse
Bijlage 2	Theorie opstellen scenario's
Bijlage 3	Indicatoren toepasbaarheid scenario's "waterstof benodigd voor industrie in de Rotterdamse haven"
Bijlage 4	Inventarisatie rapporten "waterstof benodigd voor industrie in de Rotterdamse haven"
Bijlage 5	Berekening benodigde hoeveelheid waterstof
Bijlage 6	Onderbouwing transport waterstof door de Rotterdamse haven in 2050
Bijlage 7	Berekeningen buisdiameter en compressor capaciteit
Bijlage 8	Afweging ontwerpparameters scenario's
Bijlage 9	Kostenoverzicht beslisboom
Bijlage 10	Uitwerking beslisboommethode
Bijlage 11	Schematische weergave alternatieven

Bijlage 1 Netwerkanalyse

Methode

Voor het uitvoeren van deze stakeholderanalyse wordt de 'factor-C' methode gebruikt. De factor-C methode is een door de Rijksoverheid ontwikkelde methode waarbij er strategisch wordt omgegaan met gebiedsgerichte opgaven qua communicatie (Rijksoverheid). Er is gekozen voor deze methode omdat deze methode de verschillende actoren in kaart brengt, waarbij er ook gekeken wordt naar onderlinge relaties en welke invloed de verschillende actoren op elkaar uitoefenen.

Stappen

De factor-C methode kent in zijn totaliteit vijf onderdelen (opgave, omgeving, strategie, verhaal en aanpak), waarbij er in deze stakeholderanalyse de methode en stappen van het onderdeel 'omgeving' van toepassing zijn. Het onderdeel 'omgeving' van de factor-C methode kent de volgende stappen die in deze analyse worden gevolgd en uitgevoerd:

1. Actoren in kaart brengen
2. Krachtenveldanalyse
3. Onderlinge relaties en verhoudingen
4. Rollen van de actoren

Stap 1: Actoren in Kaart brengen

De eerste stap is het in kaart brengen van alle actoren, dit wordt gedaan door als eerste het doel neer te zetten. Vervolgens worden alle invalshoeken met betrekking tot groepen en organisaties benoemd. Hierna worden de voorgaande invalshoeken verder onderverdeeld en als laatste worden de namen van de organisaties bij de desbetreffende invalshoeken benoemd.

Stap 2: Krachtenveld

In stap 2: Krachtenveld, word in kaart gebracht welke partijen het machtigst zijn en wat de standpunten zijn van deze partijen ten opzichte van het onderzoeksdoel. Deze analysestap wordt uitgevoerd door middel van de 'Kleuren ABC' en bestaat uit vier stappen (Rijksoverheid):

- De eerste stap is een overzicht maken van de in stap 1 geïdentificeerde actoren.
- De tweede stap is een kleur code geven aan de actoren aan de hand van de standpunten ten opzichte van het onderzoeksdoel. In deze stap zijn er vier kleurcodes: Groen is positief, oranje is neutraal, rood is negatief en zwart is onbekend. De standpunten van de partijen wordt geïnventariseerd en verwerkt door het bezoeken van de websites van de actoren.
- De derde stap is het bepalen van de machtsniveaus van de actoren, dit wordt uitgevoerd door middel van het toekennen van lettercodes aan de actoren. In deze stap zijn er drie lettercodes: A, B en C. Waarin A is zeer machtig, B is redelijk machtig en C is niet machtig. De informatie om te bepalen of een actor machtig is of niet, wordt verzameld door te kijken naar de grootte van de actor en door te kijken naar of de actor in het verleden invloed uitgeoefend heeft.
- De vierde en laatste stap is het clusteren van de actoren aan de hand van kleur- en lettercodes.

Na het uitvoeren van de 'kleuren ABC' kan er worden opgemaakt waar qua standpunten en macht van de stakeholders de kansen en knelpunten liggen: Veel groene A's betekent dat de kans zeer groot is dat deze partijen positief tegenover de waterstoftransitie staan, terwijl veel rode A's betekent dat er veel machtige partijen negatief tegenover waterstof en de waterstoftransitie staan.

Stap 3: Onderlinge relaties

In de derde stap van de 'factor-C' methode worden de onderlinge relaties tussen de stakeholders benoemd en geanalyseerd. Door het uitvoeren van deze stap kan er worden gekeken waar de kansen en knelpunten liggen en de onderlinge relaties. Hiermee wordt er dus gekeken waar partijen elkaar versterken en waar mogelijke problemen liggen en geeft aan welke partijen met elkaar in gesprek zouden moeten gaan.

Deze stap wordt uitgevoerd door middel van het maken van een sociogram ook wel bekend als een netwerkanalyse (niet te verwarren met de totale netwerkanalyse).

Stap 4: Rollen van de actoren

De vierde en laatste stap is het bepalen van de rollen van de stakeholders in het kader van waterstof en de waterstoftransitie. In deze stap wordt er gekeken naar de invloed die de partijen hebben op het project en het netwerk. Hierin wordt er gekeken of partijen alleen geïnformeerd willen worden of dat ze willen meewerken of zelfs meebeslissen.

Deze stap wordt uitgewerkt in de 'Ringen van invloed', waarin onderscheid wordt gemaakt tussen de rollen van de partijen (beslissers, beïnvloeders, uitvoerders en gebruikers) en de mate waarin de partijen willen meebepalen, meewerken, meedenken en mee willen weten. Het bepalen van de rollen en de betrokkenheid gebeurt op basis van de uitkomsten van stap 2 en stap 3.

Uitwerking

De bovenstaande stappen van de 'factor-C' methode zijn vervolgens stap uitgevoerd en zijn hieronder per stap uitgewerkt.

Stap 1: Actoren in kaart brengen

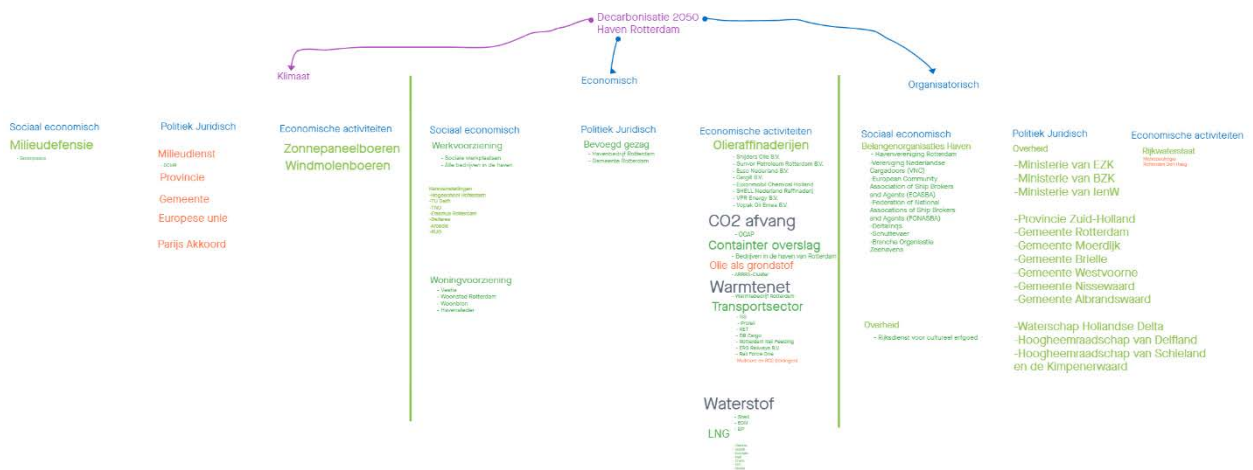
Om de actoren binnen dit project in kaart te brengen is als eerste een 'quick and dirty' analyse uitgevoerd op basis van beschikbare documenten (Figuur 16). Na deze eerste analyse, is er een groepsessie georganiseerd waarbij er opnieuw actoren zijn geïnventariseerd (Figuur 17). Dit is gedaan om vanuit verschillende invalshoeken te kijken welke actoren van belang zijn.

Beheer	Transport	Belangenbehartigers
Port of Rotterdam	Zeevaart	Deltalinqs
Rijkswaterstaat	Binnenvaart	
Provincie Zuid-Holland	Veerdiensten	
DCMR Milieudienst Rijnmond	Transportbedrijven	
	Containerterminals	
Petrochemische industrie		
Olieraffinaderijen	Olieterminals	
- BP	- Gunvor	
- Gunvor	- Maasvlakte Olieterminals	
- Koch HC	- Maatschappij Europort Terminal	
- ExxonMobil	- Shell	
- Shell	- TEAM	
Plantaardige olieraffinaderijen	Petrochemische bedrijven	
- MaasRefinery	Biobrandstof producenten	
- IOI-Loders Croklaan		
- Cargill Refined Oils Europe		
- Wilmar Edible oils		
- Sime Darby Unimills		

Energie en water	Opslag
Kolen-, gas- en biomassacentrales	
Kolen-, gas- en biomassaterminals	
Industriële gas- en waterbedrijven	

Afvalverwerkingsbedrijven	Schoonmaakbedrijven
Kennisinstellingen	
Hogeschool Rotterdam	
TU Delft	
Erasmus Universiteit	

Figuur 16 Actoren inventarisatie 'quick and dirty'



Figuur 17 Actoren inventarisatie

De uitkomsten van de 'quick and dirty' analyse alsmede de groepsessie, zijn vervolgens verwerkt in een Excel overzicht die als basis dient voor stap 2: Krachtenveldanalyse.

Stap 2: Krachtenveldanalyse

In de tweede stap van de netwerkanalyse is er gekeken naar hoe de verschillende actoren naar waterstof en de waterstoftransitie kijken en naar het machtsniveau van de actoren. Dit is uitgevoerd

door middel van het toepassen van de 'kleuren ABC' (Figuur 18). Hierin geeft de kleur (groen/oranje/rood/zwart) aan hoe de actor kijkt richting de waterstoftransitie. Daarnaast geven de letters (A/B/C) aan hoe machtig deze actor is. Bij het bepalen van de kleuren en letters zijn de websites en documenten van de websites van alle actoren op de lijst geraadpleegd. Hierbij is er gekeken of de actoren ambities hebben of al bezig zijn met waterstof en naar de grootte, relevantie en de invloed in het verleden van de actoren.

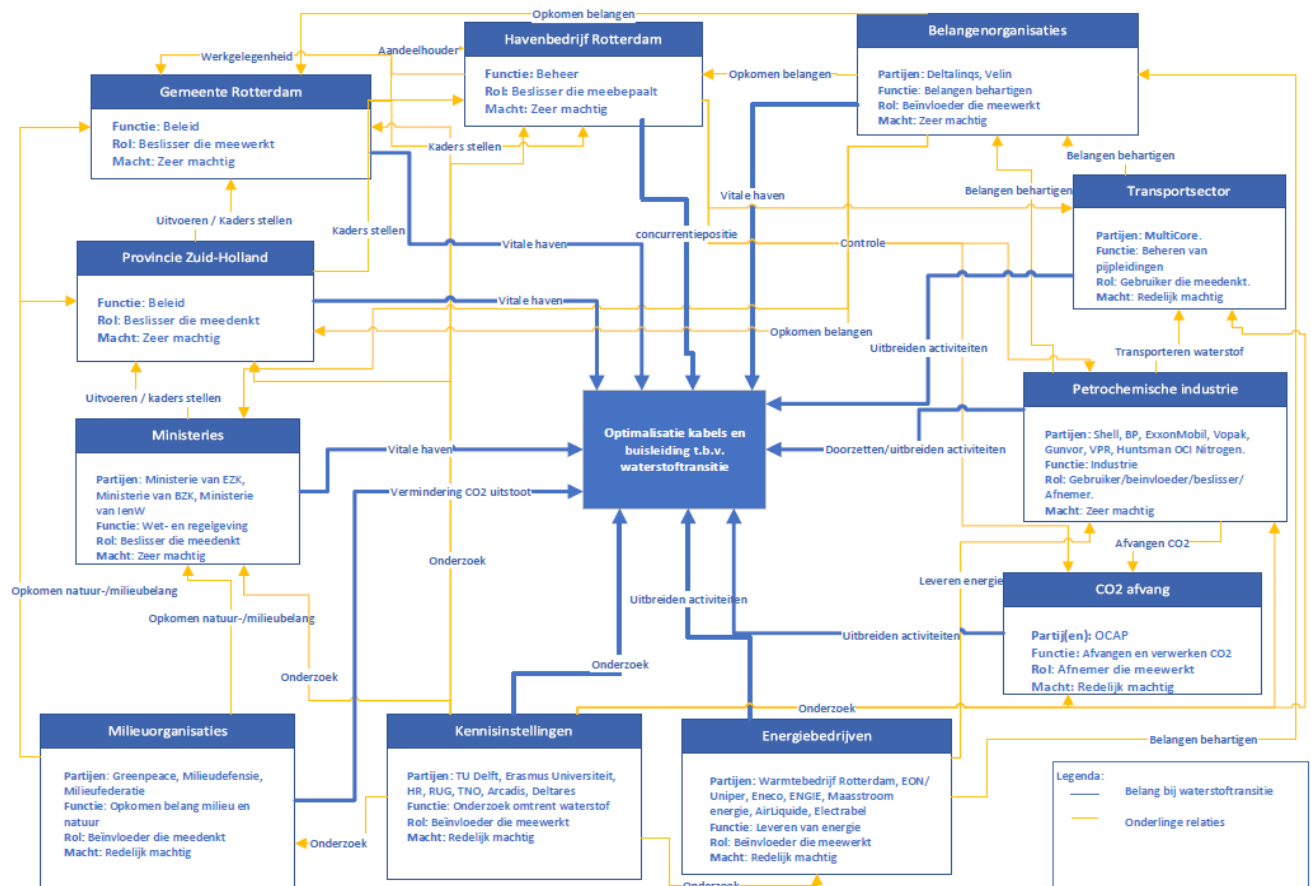
Hoofdcategorie	Categorie	Subcategorie	Partijen	Standpunt	Machtsniveau	Standpunten	Machtsniveau			
Klimaat	Sociaal-economisch	Milieuorganisaties	Milieudefensie	B	B	Positief	A	Zeer machtig		
			Greenpeace	B	B	Neutraal/passief	B	Fredelijk machtig		
	Politiek-juridisch	Milieudienst	DCMR	C	C	Negatief	C	Niet machtig		
			Europese Unie	A	A	Onbekend				
Economische activiteiten	Zonnepaneelboeren		C	C						
		Windmolenboeren	C	C						
Economie	Sociaal-economisch	Werkvoorziening Kennisinstellingen	Sociale werkplaatsen	C	C					
			TU Delft	B	B					
			Erasmus Universiteit	B	B					
			Hogeschool Rotterdam	B	B					
			TNO	B	B					
			Deltares	B	B					
			RUG	B	B					
			Arcadis	B	B					
			Politiek-Juridisch	Bevoegd gezag	Havenbedrijf Rotterdam	A	A			
					Shell	A	A			
			Economische activiteiten	Olie/raffinaderijen	BP	A	A			
					Esso/Mobil	A	A			
					Gunvor	B	B			
					VPR	B	B			
	Plantage/olie/raffinaderijen	MaasRefinery			B	B				
		IOI-Loders Croklaan			B	B				
		Cargill Refined Oils Europe			B	B				
		Vilmar Edible oils			B	B				
	CO2-afvang	Sime Darby Unimills			B	B				
		OCAP			C	C				
	Containeroverslag	Containerterminals	C	C						
		Containerdepots	C	C						
	Energie en water	Varniebedrijf Rotterdam	EDM/Uniper	B	B					
			Enecogen (Eneco)	C	C					
			Maasroom Energie	C	C					
			Air Liquide	A	A					
			Air Products-Electrabel	B	B					
			ENGIE	B	B					
			Evides Industriewater	C	C					
			AVR	C	C					
			EBN	A	A					
			Equinor	B	B					
			TenneT	A	A					
			Recreatie	Spido	Spido	C	C			
					Rondvaart Europoort	C	C			
			Transport	Watertaxi Rotterdam	NS (Spoor)	C	C			
	Prorail (Spoor)	C			C					
	RET (Spoor)	C			C					
	DB Cargo (Spoor)	C			C					
	Rotterdam Rail Feeding (Spoor)	C			C					
	ERS Railways B.V. (Spoor)	C			C					
	Rail Force One (Spoor)	C			C					
	MultiCore (pijpleiding)	B			B					
	ARG/RIC2 (pijpleiding)	C			C					
Waterstof	Shell	Shell			A	A				
		EDM/Uniper	A	A						
		BP	A	A						
		OCI Nitrogen	C	C						
		Gasunie	A	A						
		EDM/Uniper	A	A						
		Eneco	A	A						
		RWE	A	A						
		QMV-Gas	B	B						
		GasTerra	B	B						
		Linde Gas	B	B						
		VOPAK	A	A						
		Orsted	A	A						
		Organisatorisch	Sociaal-Economisch	Belangenorganisaties	Havenvereniging Rotterdam	C	C			
Vereniging Rotterdamse Cargoctors	B				B					
Federation of national associations of ship brokers and agents	B				B					
Deltalings	A				A					
Schuttevaer	C				C					
Branchenorganisatie Zeehavens	B				B					
Valin	B				B					
Rijksdienst voor Cultureel erfgoed	C				C					
Politiek-Juridisch	Overheid				Ministerie van EZK	B	B			
					Ministerie van EZK	B	B			
					Ministerie van IenW	A	A			
					Provincie Zuid-Holland	A	A			
					Gemeente Rotterdam	A	A			
					Gemeente Moerdijk	C	C			
			Gemeente Brielle	C	C					
			Gemeente Westvoorne	C	C					
Economische Activiteiten	Overheid		Gemeente Nissewaard	C	C					
			Gemeente Albrandswaard	C	C					
			Waterschap Hollandse Delta	A	A					
			Hoogheemraadschap van Delfland	C	C					
			Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard	C	C					
			Rijkswaterstaat	A	A					
			Metropoolregio Rotterdam-Den Haag	C	C					

Figuur 18 Krachtenveldanalyse

Uit Figuur 18 kan worden geconcludeerd dat er geen actoren bekend zijn die negatief tegenover de waterstoftransitie staan, 18 partijen staan neutraal tegenover de waterstoftransitie, 44 partijen staan positief tegenover de waterstoftransitie en van de overige 26 partijen is het onbekend wat hun standpunt is ten opzichte van de waterstoftransitie.

Stap 3: Onderlinge relaties

In deze stap zijn de onderlinge relaties tussen de actoren in kaart gebracht door het maken van een sociogram of netwerkanalyse (Figuur 19). Tevens is tijdens het uitvoeren van deze stap in kaart gebracht wat de belangen zijn van de actoren ten opzichte van de optimalisatie van kabels en buisleidingen ten behoeve van de waterstoftransitie



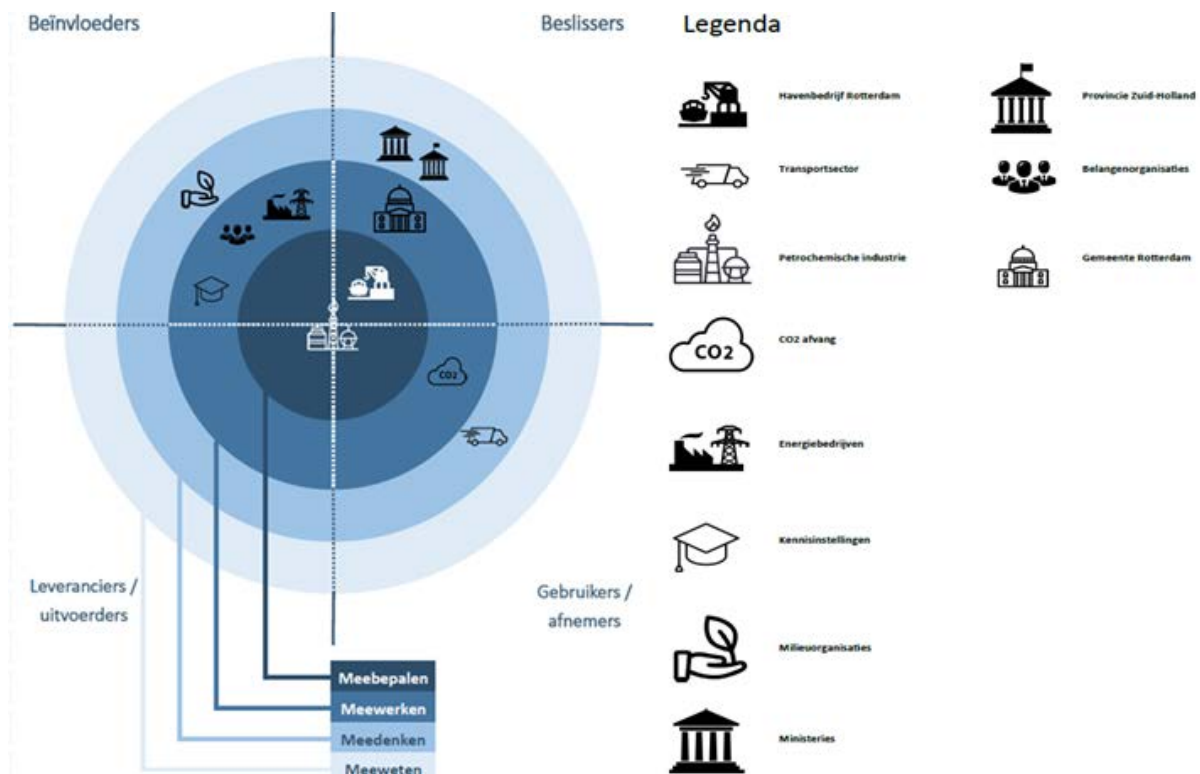
Figuur 19 Netwerkanalyse

In Figuur 19, zijn de functies van de actoren en het machtsniveau verwerkt. Ook is hier de rol van de actor aangegeven, dit is gedaan na het uitvoeren van stap 4 en om zo een overzichtelijk totaalbeeld te geven van het netwerk. Daarnaast zijn de belangen van de actoren met betrekking tot de optimalisatie van kabels en buisleidingen ten behoeve van de waterstof transitie visueel gemaakt met de (dikke) blauwe lijnen. De onderlinge relaties zijn visueel gemaakt door middel van de oranje lijnen.

In dit netwerk zijn de actoren onderling meer of minder afhankelijk van elkaar: zo is de CO₂-afvang volledig afhankelijk van de petrochemische industrie, zijn alle actoren afhankelijk van onderzoek vanuit de kennisinstellingen voor optimalisaties en innovaties en zijn bijna alle actoren afhankelijk van de wet- en regelgeving vanuit de verschillende overheidslagen. Deze afhankelijkheid kunnen in de waterstoftransitie knelpunten veroorzaken (bijvoorbeeld onvoldoende onderzoek naar de toepassing van waterstof) maar kan ook de transitie versnellen (bijvoorbeeld door middel van wet- en regelgeving).

Stap 4: Rollen van de actoren

De laatste stap van de 'factor-c' methode is het bepalen van de rollen van de stakeholders. Deze stap is uitgewerkt in de 'Ringen van invloed' (Figuur 20).



Figuur 20 Ringen van invloed

In Figuur 20 zijn de actoren aan de hand van de resultaten van stap 2: Krachtenveldanalyse en stap 3: Onderlinge relaties geplaatst binnen de ringen. Vervolgens zijn de uitkomsten van deze figuur verwerkt in de netwerkanalyse van stap 3 (Figuur 19) om duidelijk totaalbeeld te geven van het netwerk.

In de bovenstaande figuur zijn de 'meebepalers', de actoren die doorslaggevende invloed op het project en de waterstoftransitie in zijn algemeenheid hebben. De 'meewerkers' zijn de actoren die daadwerkelijk mee willen werken aan de optimalisatie van kabels en buisleidingen met betrekking tot waterstof. De 'meedenkers' zijn de actoren die inhoudelijk kunnen bijdragen aan de optimalisatie en de 'meeweters' zijn de actoren die geen actieve rol spelen, maar wel op de hoogte willen/moeten worden gehouden. Het onderscheid tussen de actoren qua rollen (gebruikers/uitvoerders/beïnvloeders/beslissers) is gemaakt en uitgevoerd op basis van de functies uit Figuur 19.

In Figuur 20 zijn de overheidslagen de beslissers die of meewerken (Gemeente Rotterdam) of meedenken (Rijksoverheid en Provincie Zuid-Holland) en is het havenbedrijf de beslisser die meebepaalt. Daarnaast is de CO₂-afvang en de transportsector gebruikers die meewerken (CO₂-afvang) of meedenken (transportsector). Uit Figuur 20 blijkt ook dat de energiebedrijven, belangenorganisaties en kennisinstellingen beïnvloeders zijn die meewerken en dat milieuorganisaties beïnvloeders zijn die meedenken. Uit Figuur 20 kan tevens worden opgemaakt dat de petrochemische industrie alsmede havenbedrijf Rotterdam de belangrijkste actoren zijn binnen de optimalisatie van de kabels en buisleidingen met betrekking tot waterstof. Naast het havenbedrijf en de petrochemische industrie, is de Gasunie een belangrijke speler in de waterstoftransitie. Ondanks dat de Gasunie uit deze stap nadrukkelijk naar voren komt, zij staan onder de kopjes 'petrochemische industrie' en 'energiebedrijven', is de Gasunie een belangrijke driver binnen de energietransitie. Deze partijen zijn dus essentieel voor het succesvol laten verlopen van de waterstoftransitie in de haven van Rotterdam.

Bijlage 2 Theorie opstellen scenario's

Bij het opstellen van scenario's ben je bezig met scenarioplanning. Scenarioplanning komt voort uit de observatie dat het onmogelijk is om precies te weten hoe de toekomst eruitziet en een goede strategie er een is die zich kan inspelen op verschillende mogelijke toekomsten. Om een robuuste strategie te vinden worden meerdere, elke ligt van elkaar afwijkende, toekomsten geschetst waarbij elke een realistisch toekomstscenario vormt. Het doel van scenarioplanning is daarbij niet om de exacte toekomst te voorspellen maar om de krachten die de toekomst sturen bloot te leggen zodat, wanneer een kracht optreedt, de beleidsbepalers hierop kunnen inspelen (Wilkinson, 1995).

In de theorie zijn een aantal mogelijke methoden voor scenario planning onderzocht:

1. Vier kwadranten matrix

Bij een vier kwadranten matrix worden drijvende factoren voor veranderingen samengevoegd in een tweetal bundels. Door deze tweetal bundelingen van onzekerheden tegen elkaar af te zetten ontstaat een matrix waarbij vier verschillende toekomstscenario's worden geschetst. Het doel is niet om een van deze toekomstscenario's tot waarheid te verklaren maar om te erkennen dat de waarschijnlijke toekomst een combinatie van één of meerdere kwadranten vormt. Vervolgens dient gekeken te worden welke maatregelen een positief effect hebben op alle toekomstscenario en deze dienen vervolgens geïmplementeerd te worden.

2. Wilson matrix

Bij scenarioplanning is het identificeren en prioriteren van onzekerheden en scenario's van groot belang (Schwartz P. , 1996). Een Wilson matrix kan helpen met het prioriteren van invloed en onzekerheid voor elke factor. De matrix verdeelt de factoren op gevolg en waarschijnlijkheid van optreden (voor een voorbeeld, zie Figuur 21). Op basis van de priorisering in de Wilson matrix kan worden besloten om op een bepaalde factor wel of niet te sturen (Amer, Daim, & Jetter, 2012).

Development Probability	High	C11, C12, C18, C19		High Priority C2
	Medium	C14	Medium Priority C3,C7,C9,C13,C16	C1, C4, C5, C8
	Low	Low Priority	C6, C15, C20	C17
		Low	Medium	High
		Potential impact		

Figuur 21: Voorbeelduitwerking van een Wilson matrix (Amer M. , 2011)

3. Morfologisch analyse

Een morfologische analyse focust voornamelijk op een opeenvolging van factoren. Door de opeenvolgende factoren worden scenario's getrokken waarop gestuurd kan worden. Deze methode helpt met het inzichtelijk krijgen van de verschillende opeenvolgende factoren en scenario's (zie Figuur 22).

Variations	C 1 Economic growth	C 2 Growing energy demand	C 4 Increasing cost of energy	C 5 Design innovations	C 8 Favoring government policies
Variation A	1A: economic growth in country	2A: Increased energy demand	4A: Increase in energy cost	5A: Design innovations in wind turbine	8A: Favoring policies for wind by the government
Variation B	1B: No economic growth	2B: No increase in energy demand	4B: energy cost remains stable	5B: No design innovations takes place	8B: Favoring policies are not adopted

Input Vector 2
1B-2B-4B-5B-8A

Input Vector 3
1B-2A-4A-5A-8B

Input Vector 1
1A-2A-4B-5B-8B

Figuur 22: Voorbeelduitwerking van een morfologische analyse (Amer M., 2011)

4. Kruis-impact analyse

Een kruis-impact analyse (zie Figuur 23) wordt gebruikt om belangrijke reeksen van mogelijke voorvallen te identificeren en de mate waarin het optreden van elke mogelijke gebeurtenis de waarschijnlijkheid van het optreden van de andere voorvallen veranderd (Enzer, 1972) (Gordon & Hayward, 1968). Het zoekt hierdoor naar de waarschijnlijkheid dat een gebeurtenis optreedt door te kijken of verschillende andere gebeurtenissen wel of niet hebben voorgevallen. Deze techniek vereist het ontwikkelen van een model waarin links tussen belangrijke gebeurtenissen worden beschreven (Enzer, 1972).

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Score
T1	3	3	3	2	3	3	2	1	2	2	22
T2	0	3	3	0	3	0	2	0	1	2	11
T3	1	1	0	0	0	2	1	0	0	0	5
T4	2	2	3	3	2	3	1	1	2	2	19
T5	0	2	3	0	0	2	1	1	1	3	12
T6	2	1	3	1	1	1	0	1	2	2	12
T7	1	2	2	2	2	1	3	2	3	3	18
T8	2	3	3	1	1	0	3	1	2	2	16
T9	2	1	0	2	1	2	2	2	1	1	13
T10	3	3	3	3	3	0	2	2	1	2	20

Highest Score: T1, T4, T7, and T10

0 Independent 1 Dependent
 2 Slight Impact 3 Strong Driver

Figuur 23: Voorbeelduitwerking van een kruis-impact analyse (Pillkahn, 2008)

Gekozen is om methode van de kruis-impact analyse toe te passen binnen dit project. Deze methode laat het toe om veel verschillende toekomstscenario's met elkaar te vergelijken en mogelijke koppelingen hiertussen uit te lichten. Voor dit project is deze toepassing interessant omdat uit van veel verschillende toekomstscenario's terug worden gebracht naar één of een aantal toekomstscenario's en het combineren van toekomstscenario's toestaat. Deze methode zal met dit proces helpen door veel verschillende scenario's op een gelijke manier met elkaar te vergelijken.

Bijlage 3 Indicatoren toepasbaarheid scenario's "waterstof benodigd voor industrie in de Rotterdamse haven"

Conform de methode worden verschillende rapporten met scenario's voor de haven van Rotterdam en de waterstoftransitie verzameld. Om te kunnen analyseren of een scenario relevant en toepasbaar is voor het onderzoek zijn indicatoren opgesteld waaraan de scenario's worden getoetst. Deze indicatoren (inclusief toelichting) zijn:

Indicator 1: Hebben de scenario's in het rapport als thema de toekomst van de haven van Rotterdam of over de waterstoftransitie? Toelichting – In het rapport moeten meerdere scenario's worden genoemd welke moeten toegespitst zijn op een thema dat voor het onderzoek van waarde is. Het onderzoek gaat over de haven van Rotterdam en de waterstoftransitie waardoor deze thema's terugkomen in de indicator.

Indicator 2: Is het scenario onderbouwd met inzichten van experts? Toelichting – De geselecteerde scenario's moeten kwalitatief voldoende onderbouwd zijn om bruikbaar te zijn voor het onderzoek. Dit houdt in dat het scenario onderbouwd moet zijn door gerenommeerde bronnen op het gebied van de haven van Rotterdam of de waterstoftransitie (denk hierbij aan kennisinstituten, havenautoriteit, experts op het gebied van waterstof etc.).

Indicator 3: Het scenario beslaat een tijdshorizon tot 2050? Toelichting – Het project focust op een tijdshorizon tot 2050. De scenario's moeten bij deze tijdshorizon passen om bruikbaar te zijn voor de verdere uitvoering van het project

Indicator 4: Het scenario is actueel? Toelichting – Scenario planning is van alle tijden. Echter zijn verouderde inzichten en scenario's niet bruikbaar voor de uitvoering van het project waardoor gekeken dient te worden of het scenario actueel is.

Indicator 5: Is het scenario voldoende onderbouwd om bruikbaar te zijn voor de geplande uitwerking? Toelichting – De scenario's moeten uitgebreid onderbouwd zijn zodat deze van toepassing kunnen zijn binnen dit onderzoek. Vooral de waterstofvraag is belangrijk omdat hierop de beslisboom verderop in het onderzoek wordt gebaseerd. Het abstractieniveau moet zo concreet mogelijk zijn om de scenario's te kunnen gebruiken voor adaptieve implementatiestrategie.

Elk rapport/ scenario wordt beoordeeld op elk van de vijf indicatoren en kan daarbij drie verschillende scores krijgen: + (voldoet aan de indicator), +/- (voldoet niet geheel aan de indicator, maar kan nog steeds nuttig of aanvullend zijn) en – (voldoet niet aan de indicator).

Bijlage 4 Inventarisatie rapporten “waterstof benodigd voor industrie in de Rotterdamse haven”

Conform de uitgewerkte methode wordt via interviews en deskresearch relevante bronnen gezocht die worden getoetst aan de indicatoren. In deze paragraaf worden de belangrijkste bronnen die zijn aangeraden door experts of online zijn gevonden beschreven:

Report 1: Energie-infrastructuur in het Rotterdamse havengebied

Bron: Port of Rotterdam (Port of Rotterdam, 2019)

Verkregen via: primaire datacollectie – aanbeveling

Dit rapport is een onderzoek van het havenbedrijf naar een CO₂ neutrale haven. Het rapport schetst voor een aantal grote transitie hoe de infrastructuur eruit gaat zien (zie Figuur 24). De infrastructuur hierbij voornamelijk gefocust op kabels en buisleidingen en daarmee geschikt voor dit project.



Figuur 24: Voorbeeld uitwerking waterstoftransitie uit het rapport

Report 2: Decarbonization Pathways for the Industrial Cluster of the Port of Rotterdam

Bron: Wuppertal Institut (Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy, 2016)

Verkregen via: secundaire datacollectie - deskresearch

In opdracht van de Port of Rotterdam heeft het Wuppertal Institute een studie gedaan naar mogelijke decarbonisatie paden voor het industriële cluster van de haven van Rotterdam. Het Wuppertal Institute heeft voor dit doel vier mogelijke scenario's ontwikkeld die elk uitgaan van een veranderde situatie waarbij verschillende doelen worden gesteld. Het rapport is erg uitgebreid en behandelt veel verschillende facetten van de decarbonisatie transitie maar is niet per se gefocust op de waterstoftransitie.

Report 3: Blue hydrogen as accelerator and pioneer for energy transition in the industry

Bron: H-vision (H-vision, 2019)

Verkregen via: secundaire datacollectie - deskresearch

Het H-vision project is een samenwerking tussen zestien verschillende bedrijven met als doelstelling een aanzienlijke bijdrage te leveren aan de realisatie van de Nederlandse klimaatdoelen door grootschalig gebruik van waterstof in de haven van Rotterdam. Het rapport schetst drie scenario's over hoe de wereld zich ontwikkelt op het gebied van duurzaamheid (de “buitenwereld” waarop geen directe invloed kan worden uitgeoefend) die worden vergeleken met vier ontwikkelingsperspectieven voor de haven van Rotterdam (“onze wereld” waarop we invloed uitoefenen). Op basis van expertkennis vallen een aantal scenario's af waardoor acht scenario's overblijven (de groen gearceerde):

Tabel 17: Overzichtstabel scenario's "Blue hydrogen as accelerator and pioneer for energy transition in the industry" rapport

Solution space		Development concepts Our world that we control, we decide			
		0. Do nothing	1. Minimum scope Refineries only	2. Reference scope No regret, accelerated CO ₂ reduction	3. Maximum scope Refineries + powerplants
Scenarios The outside world that we cannot control	A. As Usual World	A0	A1	A2	A
	B. Economical World	B0	B1	B2	B3
	C. Sustainable World	C0	C1	C2	C3

Het rapport is tevens voorzien van grove berekeningen over de benodigde waterstof en hoeveel CO₂ wordt opgevangen. Deze onderliggende getallen zijn nuttig voor een eventuele verdere uitwerking.

Rapport 4: Havenvisie Rotterdam

Bron: Port of Rotterdam, Rijksoverheid, provincie Zuid-Holland, Deltalinqs en gemeente Rotterdam (Port of Rotterdam, Rijksoverheid, provincie Zuid Holland, Deltalinqs en gemeente Rotterdam, 2019)
Verkregen via: secundaire datacollectie – deskresearch

De havenvisie fungeert als een kompas voor de ambities van de haven van Rotterdam en is opgesteld met een samenwerking tussen de overheden en de bedrijven. De visie schetst de kaders waarin de haven zich ontwikkelt en kijkt hierbij naar de economische en sociale transitie evenals het creëren van een attractieve regio.

In het rapport worden ambities uitgesproken en kaders gesteld. Het rapport creëert geen scenario's. Wel worden in het rapport veel cijfers gegeven welke mogelijk als aanvulling kunnen dienen.

Rapport 5: In drie stappen naar een duurzaam industriecluster Rotterdam-Moerdijk in 2050

Bron: Werkgroep industriecluster Rotterdam-Moerdijk (Werkgroep industriecluster Rotterdam-Moerdijk, 2018)
Verkregen via: secundaire datacollectie – deskresearch

De werkgroep industriecluster Rotterdam-Moerdijk heeft voor het ministerie van Economische Zaken en Klimaatonderzoek gedaan naar hoe het industriecluster Rotterdam – Moerdijk duurzaam kan worden gemaakt. Het onderzoek schets grofweg drie stappen waarbij naar een duurzaam industriecluster wordt gewerkt. De stappen zijn:

- 1. Efficiency, ontwikkeling van Infrastructuur en CCUS**

In deze fase (tussen 2018 en 2025) staat de levering en hergebruik van overtollige energie alsmede opslag/ gebruik van afvangbare CO₂ centraal

- 2. Naar een nieuw energiesysteem**

In deze fase (2020-2030) gaat het met name om de verduurzaming van het energiegebruik door de industrie.

- 3. Vernieuwing van het grondstoffen- en brandstoffensysteem**

Deze fase (2030-2050) vormt de afronding van het project.

Grofweg worden in deze stappen eerst het bestaande netwerk geoptimaliseerd waarna een transitie wordt ingegaan naar een energiesysteem waarin elektrificatie en waterstof de belangrijkste pijlers zullen zijn. Het rapport schetst dat vooral de overheid aan zet is om deze transitie te leiden en ook wordt als aandachtspunt gegeven dat de internationale concurrentiepositie van de industrie niet ondermijnt mag worden.

Bijlage 5 Berekening benodigde hoeveelheid waterstof

In deze bijlage wordt de berekening weergegeven hoe de maximale waterstofvraag in MWh (Mega Watt uur) is omgerekend naar Kt/jaar (Kiloton per jaar). Allereerst zal de berekening worden weergegeven waarna voor de verschillende scenario's die uitkomst wordt gegeven.

Om van MWh naar Kt/jaar te gaan zijn de volgende stappen gebruikt (de maximale waterstofvraag in MWh is in de stappen X genoemd):

- Allereerst is berekend hoeveel MWh een kilogram waterstof oplevert. Een kilogram waterstof levert 33,6 KWh op (Idealhy.eu, z.d.). In MWh is dit 0.0336.
- Het aantal benodigde kilogram dat per uur bedraagt dan $X/0.0336$ (hierna Y genaamd).
- Om de benodigde kilogrammen per uur om te rekenen naar het aantal benodigde kilogrammen per jaar is $Y*21*365$ (uitgaande van 21 uur per dag 365 dagen per jaar productie) gedaan (hierna Z genaamd)
- Om het benodigde aantal Kg/jaar om te rekenen naar het aantal Kt/jaar is $Z/10.000.000$ gedaan

Met het uitvoeren van bovenstaande berekeningen is voor de verschillende scenario's de volgende hoeveelheid benodigde maximale Kt/jaar gevonden:

- Voor scenario A0 was geen MWh benodigd, dit is geen Kt/jaar
- Voor scenario A1 was 1190 MWh benodigd, dit is 271 Kt/jaar
- Voor scenario B2 was 3210 MWh benodigd, dit is 666 Kt/jaar
- Voor scenario C3 was 5280 MWh benodigd, dit is 5280 Kt/jaar

Opmerking bij deze berekening:

Deze berekening is gedaan naar inzicht van de projectgroep. De exacte berekeningen onderliggend aan het H-vision rapport worden niet vrijgegeven. Opgemerkt is dat er een significant verschil zit tussen de enige bekende waarde uit het rapport (de 666 Kt/jaar die voor het scenario B2 is berekend wordt in het rapport op 700 gegeven). Geprobeerd is de berekening op een zo goed mogelijke manier na te doen.

Bijlage 6 Onderbouwing transport waterstof door de Rotterdamse haven in 2050

In deze bijlage wordt uitgewerkt hoe de te transporteren hoeveelheid waterstof door de Rotterdamse haven in 2050 is bepaald. Vanuit de scenario's over de benodigde hoeveelheid waterstof in de Rotterdamse industrie in 2050 was het volgende bekend (zie paragraaf 4.1):

- Voor het **scenario A0** was **0 kt/jaar** benodigd,
- Voor het **scenario A1** was **271 kt/jaar** benodigd,
- Voor het **scenario B2** was **666 kt/jaar** benodigd,
- Voor het **scenario C3** was **1205 kt/jaar** benodigd.

Tevens was bepaald dat (1) voor het scenario C3 de hoeveelheid waterstof welke door de Rotterdamse haven getransporteerd wordt vastgesteld op 20 Mt/jaar en dat (2) de percentuele verschillen tussen de hoeveelheid waterstof benodigd voor de Rotterdamse industrie ook gebruikt konden worden voor de hoeveelheid waterstof dat door de Rotterdamse haven wordt getransporteerd.

De eerste stap in de bepaling hoeveel waterstof voor elk van de scenario's door de Rotterdamse haven wordt getransporteerd, is het bepalen van de percentuele verschillen tussen de benodigde hoeveelheid waterstof in de Rotterdamse industrie in 2050. Hierbij is de benodigde hoeveelheid voor scenario C3 op 100% gesteld:

- Scenario C3 is 100%
- Scenario B2 is 55,27% van de hoeveelheid van C3 (berekening: $(666 \times 100)/1205 = 55,27\%$)
- Scenario A1 is 22,49% van de hoeveelheid van C3 (berekening: $(271 \times 100)/1205 = 22,49\%$)
- Scenario A0 is anders bepaald, hierover later meer

Met deze percentuele verschillen is vervolgens de hoeveelheid waterstof welke door de Rotterdamse haven wordt getransporteerd berekend:

- In **scenario C3** wordt **20 Mt/jaar** getransporteerd (zie bepalingen hierboven)
- In **scenario B2** wordt **11,05 Mt/jaar** getransporteerd (berekening: $20 \times (55,27/100) = 11,05$ Mt/jaar)
- In **scenario A1** wordt **4,49 Mt/jaar** getransporteerd (berekening: $20 \times (22,49/100) = 4,49$ Mt/jaar)

De hierboven beschreven methode (het omrekenen middels percentuele verschillen) is niet mogelijk voor het scenario A0 omdat de vraag hierbij vanuit de industrie op 0 kt/jaar is vastgesteld (vermenigvuldiging met 0 levert automatisch een antwoord 0 op). Het A0 scenario gaat ervan uit dat 2050 geen veranderingen heeft ten opzichte van het huidige scenario. In een andere bron van de Port of Rotterdam (havenbedrijf Rotterdam) is gevonden dat de huidige hoeveelheid waterstof welke door de Rotterdamse haven wordt getransporteerd ongeveer gelijk is aan 0,5 Mt (bron: (Port of Rotterdam, 2020)). Deze hoeveelheid wordt aangehouden als de hoeveelheid waterstof welke door de Rotterdamse haven wordt getransporteerd in het A0 scenario.

Bijlage 7 Berekeningen buisdiameter en compressor capaciteit

Scenario	Vraag	in	Debiet	in	Optimale diameter	in	in
Scenario A0	0,5 Mt/jaar		500.000.000,00 Kg/jaar		347,91 mm		13,70 inch
Scenario A1	4,761 Mt/jaar		4.761.000.000,00 Kg/jaar		1073,58 mm		42,27 inch
Scenario B2	11,716 Mt/jaar		11.716.000.000,00 Kg/jaar		1684,12 mm		66,30 inch
Scenario C3	21,05 Mt/jaar		21.050.000.000,00 Kg/jaar		2257,40 mm		88,87 inch
Stroomsnelheid waterstof	in						
15 m/s							
Soortgelijke massa waterstof	in						
0,09 kg/m ³							
Seconden in een jaar							
31556926 seconden							
vaste waarde							
Temperature (T)	0,29						
293,15 K (20 °C)							
pressure psi (P)	1160,301904	psia (80 bar)					
Velocity (V)	49,21259843	ft/s (15 m/s)					
Volume flow rate (Q)	3021,511035	ft ³ /min					
2870,82807	ft ³ /min						
70800,04657	ft ³ /min						
127205,6146	ft ³ /min						
Scenario	Diameter in feet	In mm	In inch	Scenario	Total gas flow	Optimum	In
A0	1,142171683	348,13	13,71	A0	347,91	348,13	mm
A1	3,524483465	1074,26	42,29	A1	1073,58	1074,26	mm
B2	5,528866049	1685,20	66,35	B2	1684,12	1685,20	mm
C3	7,410925318	2258,85	88,93	C3	2257,40	2258,85	mm
$d_o = \sqrt[4]{(4 \cdot Q) / (\pi \cdot v_o)}$ optimum pipeline diameter equation							
$d = 0,29 \cdot \sqrt[4]{(Q \cdot T) / (P \cdot V)}$ Total gas flow equation							

Scenario	Vraag in kg/h	capaciteit compressor in kW	capaciteit compressor in MW	Gas nieuw	gas uitbreiding	elek. nieuw	elek. Uitbr.
A0	57.077,63	29.511,0141	29,51	€ 55.237.919,40	€ 40.409.933,29	€ 75.356.226,95	€ 81.513.995,15
A1	543.493,15	281.003,8763	281,00	€ 525.975.468,48	€ 384.783.384,83	€ 717.541.993,01	€ 776.176.261,83
B2	1.337.442,92	691.502,0824	691,50	€ 1.294.334.927,27	€ 946.885.556,96	€ 1.765.747.109,88	€ 1.910.035.934,39
C3	2.402.968,04	1.242.413,6936	1.242,41	€ 2.325.516.406,53	€ 1.701.258.191,70	€ 3.172.497.154,57	€ 3.431.739.195,88
Variant		CAPEX per MW					
Gas aangedreven, nieuw		€ 1.871.773,00					
Gas aangedreven, uitbreiding		€ 1.369.317,00					
Elektrisch aangedreven, nieuw		€ 2.553.495,00					
Elektrisch aangedreven, uitbreiding		€ 2.762.155,00					
Scenario	Vraag	in	Vraag	in	Debiet	in	
Scenario A0	0,5 Mt/jaar		500.000.000,00	Kg/jaar	1,425994408	m ³ /s	
Scenario A1	4,761 Mt/jaar		4.761.000.000,00	Kg/jaar	13,57831875	m ³ /s	
Scenario B2	11,716 Mt/jaar		11.716.000.000,00	Kg/jaar	33,41390096	m ³ /s	
Scenario C3	21,05 Mt/jaar		21.050.000.000,00	Kg/jaar	60,03436456	m ³ /s	

Bijlage 8 Afweging ontwerpparameters scenario's

Scenario B2 66 inch					
Totale diameter/capaciteit					
Diameter(inch)	16	24	36	42	48
16	32	40	52	58	64
24	40	48	60	66	72
36	52	60	72	78	84
42	58	66	78	84	90
48	106	72	84	90	96
Voor 66 inch	16	24	36	42	48
16	Niet mogelijk	Niet mogelijk	Niet mogelijk	Niet mogelijk	Niet mogelijk
24	Niet mogelijk	Niet mogelijk	Niet mogelijk	Wel mogelijk	Wel mogelijk
36	Niet mogelijk	Niet mogelijk	Wel mogelijk	Wel mogelijk	Wel mogelijk
42	Niet mogelijk	Wel mogelijk	Wel mogelijk	Wel mogelijk	Wel mogelijk
48	Wel mogelijk	Wel mogelijk	Wel mogelijk	Wel mogelijk	Wel mogelijk
Optie 1	24-42	66	€ 2.021.691,20	In €/km	
Optie 2	24-48	72	€ 2.298.368,80	In €/km	
Optie 3	36-36	72	€ 2.266.524,00	In €/km	
Optie 4	36-42	78	€ 2.500.560,40	In €/km	
Optie 5	36-48	84	€ 2.777.238,00	In €/km	
Optie 6	42-42	84	€ 2.734.596,80	In €/km	
Optie 7	42-48	90	€ 3.011.274,40	In €/km	
Optie 8	48-48	96	€ 3.287.952,00	In €/km	
Scenario C3 89 inch					
Totale diameter/capaciteit					
Diameter(inch)	16	24	36	42	48
16	32	40	52	58	64
24	40	48	60	66	72
36	52	60	72	78	84
42	58	66	78	84	90
48	64	72	84	90	96
Voor 89 inch	16	24	36	42	48
16	Niet mogelijk	Niet mogelijk	Niet mogelijk	Niet mogelijk	Niet mogelijk
24	Niet mogelijk	Niet mogelijk	Niet mogelijk	Niet mogelijk	Niet mogelijk
36	Niet mogelijk	Niet mogelijk	Niet mogelijk	Niet mogelijk	Niet mogelijk
42	Niet mogelijk	Niet mogelijk	Niet mogelijk	Niet mogelijk	Wel mogelijk
48	Niet mogelijk	Niet mogelijk	Niet mogelijk	Wel mogelijk	Wel mogelijk
Optie 1	42-48	90	€ 3.011.274,40	In €/km	
Optie 2	48-48	96	€ 3.287.952,00	In €/km	

Bijlage 9 Kostenoverzicht beslisboom

Voor het bepalen van de investeringskosten en onderhoudskosten zijn percentages die opgesteld zijn als kengetallen voor het realiseren van nieuwe waterstofpijpleidingen gebruikt. Naast deze percentages zijn huidige kosten voor het aanleggen en gemiddelde investeringskosten voor een nieuwe elektrisch aangedreven compressor gebruikt. In Tabel 18 is een overzicht weergegeven van de basisgegevens die gebruikt zijn binnen de berekening voor investeringskosten en onderhoudskosten.

Tabel 18: Overzicht basisgegevens (Wang, van der Leun, Peters, & Buseman, 2020) (Cobouw Bouwkosten GWW, 2020) (Agency for the cooperation of energy regulators, 2015).

Parameter	Einheid	Waarde					
CAPEX-pijpleiding nieuw	% van nieuwe aardgas pijpleiding met overeenkomende diameter	110-150%					
CAPEX aanpassen bestaande pijpleiding	% van nieuwe waterstof pijpleiding met overeenkomende diameter	10-35%					
Vervangen kleppen en afsluitingen	€/km	€ 40.000,00					
OPEX	€/jaar als % van CAPEX	0,8-1,7%					
Aanleg- en materiaalkosten pijpleiding							
Diameter (inch)	Wanddikte (mm)	Lossen en uitrijden €/m	Leggen €/m	Stellen €/m	Materiaalkosten (buis+hulpstukken) €/m	Totaal €/m	Totaal €/km
16	6,3	4,89	20,30	6,19	272,75	304,13	304.130
24	6,3	5,68	41,90	9,36	403,9	460,84	460.840
36	10	7,34	52,40	11,70	800,3	871,74	871.740
42	10	8,81	62,85	13,40	1017,6	1102,66	1.102.660
48	11	11,00	69,85	15,60	1296,75	1393,2	1.393.200
Compressorstation			Gemiddelde investeringskosten 2005-2014 (€/MW)				
Gas aangedreven, nieuw			1.871.773				
Gas aangedreven, uitbreiding			1.369.317				
Elektrisch aangedreven, nieuw			2.553.495				
Elektrisch aangedreven, uitbreiding			2.762.155				

De percentages van de CAPEX variëren aanzienlijk. De buisdiameters voor waterstof gaan van 16-56 inch waarin de kleinere buisdiameters duurder zullen zijn en dus een hoger percentage hebben. Voor het bepalen van de OPEX is dit juist tegenovergesteld. Een kleinere buisleiding zal minder onderhoud met zich meenemen evenals het bijpassende compressor station (H-vision, 2019).

De aanlegkosten zijn inclusief arbeid (grondwerker, fitter en lasser) en materiaal (wiellaadschop, graafmachines en vonkapparatuur). Hierin zijn de kosten van de arbeid op basis van de uurtarieven die voortkomen uit de geldende Cao's (Cobouw Bouwkosten GWW, 2020). De materiaalkosten zijn de kosten van een stalen buis met een bekleding van geëxtrudeerd PE en stalen hulpstukken (Cobouw Bouwkosten GWW, 2020).

In de gemiddelde investeringskosten voor compressorstations, zijn investeringskosten voor compressorstations uit 21 verschillende EU-landen meegenomen, waaronder Nederland (Agency for the cooperation of energy regulators, 2015). In deze investeringskosten zijn tevens de kosten voor activiteiten en materiaal zoals constructie, planning en vergunningen meegenomen (Agency for the cooperation of energy regulators, 2015).

Gebruikmakend van de bovenstaande gegevens is het mogelijk om te bepalen wat de kosten zijn die gepaard gaan met de verschillende scenario's. Er wordt uitgegaan van een traject van 70 kilometer en één compressorstation elektrisch aangedreven nieuw. Tabel 19 geeft een uitleg van de gebruikte termen en de bijbehorende eenheden.

Tabel 19: Overzicht berekeningen CAPEX en OPEX

$CAPEX\%p \cdot CAPEXp \cdot L = CAPEXpt$ $CAPEXc \cdot C = CAPEXct$ $OPEX\% \cdot CAPEXp = OPEXp$ $OPEX\% \cdot CAPEXc = OPEXc$		
CAPEX%p	= CAPEX % pijpleiding waterstof nieuw	In %
CAPEXp	= CAPEX-pijpleiding aardgas	In €
L	= Lengte traject	In kilometers
CAPEXpt	= CAPEX-pijpleiding totaal	In €
CAPEXc	= CAPEX-compressor	Per MW
C	= Benodigde compressor capaciteit	In MW
CAPEXct	= CAPEX-compressor totaal	In €
OPEX%	= OPEX als percentage van CAPEX	In %
OPEXp	= OPEX-pijpleiding	In € per jaar
OPEXc	= OPEX compressor	In € per jaar

De kosten voor het aanleggen van een nieuw waterstofnetwerk zijn per scenario weergegeven in Tabel 20, Tabel 21, Tabel 22 en Tabel 23.

Tabel 20: CAPEX en OPEX scenario A0

Scenario A0 16 inch pijpleiding	Totaal voor 70 km met compressorcapaciteit van 29,51 MW	Totaal
CAPEX pijpleiding	€ 31.933.650,00	Totaal CAPEX
CAPEX Compressor	€ 75.353.637,45	€ 107.287.287,45
OPEX Pijpleiding	€ 255.469,2000	Totaal OPEX
OPEX compressor	€ 602.829,0996	€ 858.298,2996

Tabel 21: CAPEX en OPEX scenario A1

Scenario A1 42 inch pijpleiding	Totaal voor 70 km met compressorcapaciteit van 281 MW	Totaal
CAPEX pijpleiding	€ 95.710.888,00	Totaal CAPEX
CAPEX Compressor	€ 717.532.095,00	€ 813.242.983,00
OPEX Pijpleiding	€ 1.325.595,7988	Totaal OPEX
OPEX compressor	€ 9.937.819,5158	€ 11.263.415,3146

Tabel 22: CAPEX en OPEX scenario B2

Scenario B2 66 inch pijpleiding (24+42)	Totaal voor 70 km met compressorcapaciteit van 691,5 MW	Totaal
CAPEX pijpleiding	€ 141.518.384,00	Totaal CAPEX
CAPEX Compressor	€ 1.765.741.792,50	€ 1.907.260.176,50
OPEX Pijpleiding	€ 2.405.812,5280	Totaal OPEX
OPEX compressor	€ 30.017.610,4725	€ 32.423.423,0005

Tabel 23: CAPEX en OPEX scenario C3

Scenario C3 89 inch pijpleiding (42+48)	Totaal voor 70 km met compressorcapaciteit van 1242,41 MW	Totaal
CAPEX pijpleiding	€ 210.789.208,00	Totaal CAPEX
CAPEX Compressor	€ 3.172.487.722,95	€ 3.383.276.930,95
OPEX Pijpleiding	€ 3.583.416,5360	Totaal OPEX
OPEX compressor	€ 53.932.291,2902	€ 57.515.707,8262

Het aanpassen van het huidige netwerk is er één optie mogelijk. Deze optie is het aanpassen van een bestaande aardgaspijpleiding van met een diameter van 36 inch. De CAPEX en OPEX voor de pijpleiding is grotendeels op dezelfde wijze berekend als het aanleggen met van een nieuwe pijpleiding. Voor het berekenen van de CAPEX is het percentage voor het aanpassen van een bestaande buisleiding gehanteerd, is de compressor capaciteit niet nodig en is het vervangen van kleppen en afsluiting toegevoegd. In Tabel 24 zijn de kosten gepresenteerd voor het aanpassen van een bestaande 36 inch aardgaspijpleiding.

Tabel 24: CAPEX en OPEX aanpassen bestaande pijpleiding

36 inch pijpleiding	Totaal voor 70 km	Totaal
CAPEX pijpleiding	€ 17.848.876,50	Totaal CAPEX
Vervangen kleppen en afsluitingen	€ 2.800.000,00	€ 20.648.876,50
OPEX Pijpleiding	€ 223.110,9563	Totaal OPEX
OPEX compressor	€ 0,00	€ 223.110,9563

Voor het bepalen van het meest pad wat het meest economische rendabel is, moet in de beslisboom rekening gehouden worden met de pijpleidingen die al gerealiseerd zijn door de tijd heen. Hiervoor zijn ook de kosten berekend voor losse pijpleidingen die benodigd zijn voor het behalen van de benodigde capaciteit overeenkomend met de vraag in het desbetreffende scenario. Deze kosten zijn op dezelfde wijze berekend zoals dat is gedaan bij het aanleggen van een nieuwe pijpleiding. De kosten gerelateerd aan de benodigde compressor capaciteit zijn achterwege gelaten omdat deze al is meegenomen zijn in het desbetreffende scenario. In Tabel 25, Tabel 26 en Tabel 27 is een overzicht van de CAPEX en OPEX van de pijpleidingen ter aanvulling weergegeven.

Tabel 25: CAPEX en OPEX 24 inch pijpleiding nieuw

24 inch pijpleiding nieuw	Totaal voor 70 km	Totaal
CAPEX pijpleiding	€ 45.807.496,00	Totaal CAPEX € 45.807.496,00
OPEX Pijpleiding	€ 448.913,46	Totaal OPEX € 448.913,46

Tabel 26: CAPEX en OPEX 36 inch pijpleiding nieuw

36 inch pijpleiding nieuw	Totaal voor 70 km	Totaal
CAPEX pijpleiding	€ 79.328.340,00	Totaal CAPEX € 79.328.340,00
OPEX Pijpleiding	€ 991.604,25	Totaal OPEX € 991.604,25

Tabel 27: CAPEX en OPEX 48 inch pijpleiding nieuw

48 inch pijpleiding nieuw	Totaal voor 70 km	Totaal
CAPEX pijpleiding	€ 115.078.320,00	Totaal CAPEX € 115.078.320,00
OPEX Pijpleiding	€ 1.749.190,46	Totaal OPEX € 1.749.190,46

In de beslisboom is zijn transportkosten gebruikt die de minimale inkomsten voor de exploitant van de pijpleiding(en) weerspiegelen. Er is aangenomen dat de transportkosten gerekend voor het vervoeren van waterstof door een pijpleiding, evenredig zijn aan de minimale inkomsten. In Tabel 28 zijn de opbrengsten (transportkosten) weergegeven per scenario.

Tabel 28: Totale opbrengsten per scenario (Wang, van der Leun, Peters, & Buseman, 2020)

Scenario	Vraag in Kton	Opbrengsten per Kton	Totaal
AO	500	€ 10.640	€ 5.320.000
A1	4.761	€ 11.200	€ 53.323.200
B2	11.716	€ 14.000	€ 164.024.000
C3	21.050	€ 16.100	€ 338.905.000

Bijlage 10 Uitwerking beslisboommethode

Deze bijlage geeft een uitgebreide uitwerking van de beslisboommethode die is gehanteerd binnen dit onderzoek. In hoofdstuk 6 van het hoofdrapport wordt hier enkel de conclusie gepresenteerd. Binnen deze uitwerking wordt de methode stap voor stap doorlopen, worden de uitkomsten gevalideerd en wordt er een sensitiviteitsanalyse uitgevoerd. Deze bijlage zal alleen de methode voor het opzetten en uitwerken van de beslisboom behandelen. De onderbouwing en bronnen van cijfers en prijzen zijn te vinden in het hoofdrapport.

Stap 1: Ontwikkel Scenario's

Als basis voor de beslisboom zijn scenario's ontwikkeld die de vraag naar waterstof vertegenwoordigen. Deze zijn overgenomen in de Excel-sheet. Binnen de scenario's wordt opgenomen welke volumes waterstof er gevraagd in de toekomst (Tabel 30), wat een verkochte kilogram waterstof oplevert (Tabel 29) en wat het kost om deze te transporteren (Tabel 31). Deze gegevens vormen de basis-input voor de beslisboom. Binnen de beslisboom wordt gerekend met inkomsten uit de transportkosten (Tabel 31) van waterstof die doorberekend worden aan de afnemer.

Tabel 29: Consumentenprijzen waterstof per tijdsinterval per kilogram.

Year	Consumer price H2	Unit
2020-2030	€ 8	Kg
2030-2040	€ 7	Kg
2040-2050	€ 5	Kg
>2050	€ 3	Kg

Tabel 30: Waterstofvraag per scenario in kilotonnen (in welk jaar?)

Scenario	Demand	Unit
Scenario A0	500	Kt
Scenario C3	21050	Kt
Scenario B2	11716	Kt
Scenario A1	4761	Kt

Tabel 31: Inkomsten uit waterstof per geleverde kiloton waterstof

Scenario	Unit income	Per
Scenario A0	€ 10.640	Demand supplied(Kt)
Scenario C3	€ 16.100	Demand supplied(Kt)
Scenario B2	€ 14.000	Demand supplied(Kt)
Scenario A1	€ 11.200	Demand supplied(Kt)
Discount rate	8,00%	Year

Stap 2: Teken de beslisboom uit

Om inzicht te krijgen in welke mogelijke paden er zijn om in de toekomst de waterstoflevering op te schalen wordt de beslisboom getekend (Figuur 25). Deze bestaat uit punten en lijnen. Punten staan symbool voor beslismomenten(nodes) waarin uit verschillende acties gekozen kan worden. De lijnen die vertrekken uit een punt staan symbool één van deze acties en leiden naar een volgend punt waarop weer een beslissing genomen kan worden uit meerdere acties. (De punten worden hierna

nodes genoemd en de lijnen zijn paden genoemd.) De tijdsduur tussen beslismomenten is 10 jaar om de beslisboom niet te veel uit te laten waaiëren. Bij iedere lijn die een actie vertegenwoordigt tussen twee beslismomenten horen kosten. Bij een investeringsactie nemen we rekenkundig aan dat de investering direct plaatsvindt na het nemen van de actie en dat jaarlijks exploitatiekosten optreden tot aan het volgende beslispunt. De basis van de boom ligt in de huidige vraag naar waterstof. In praktijk betekent dit voor de beslisboom dat bij een toenemende vraag naar waterstof er nieuwe transportleidingen en compressoren aangelegd moeten worden. Dit betekent ook dat er meerdere buiscombinaties mogelijk zijn om te voldoen aan een waterstofvraag in de toekomst (zie Voorbeeld 1 en Figuur 25).

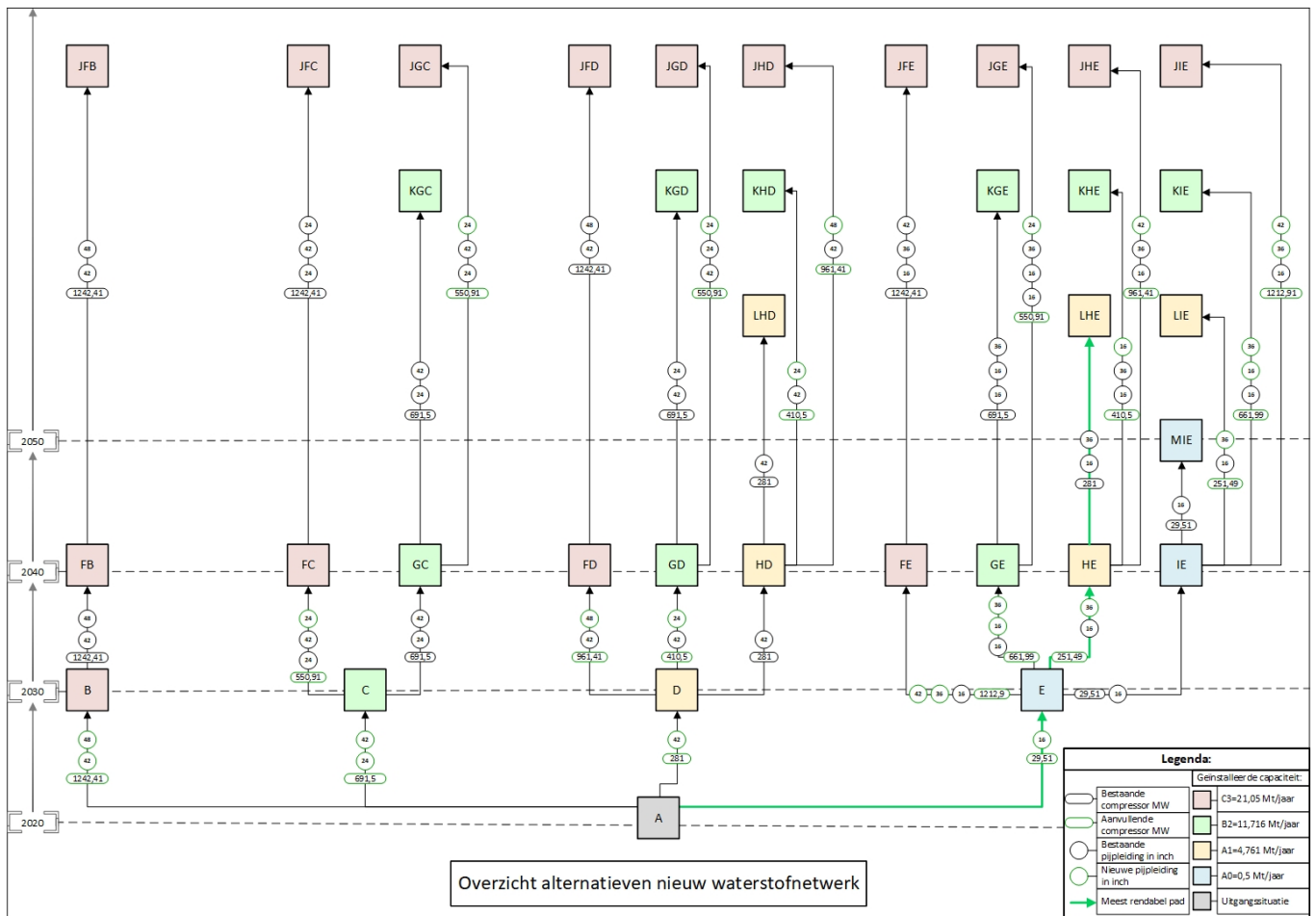
Altijd de meest optimale diametercombinaties

Om van node A (2020, waterstofvraag = 0) naar node D (2030, waterstofvraag = 4.7Mt, scenario A1) te gaan kan bijvoorbeeld in 2020 een 42inch buisleiding worden aangelegd. Om dan van node D (waterstofvraag = 4.7Mt) naar node FD (2040, waterstofvraag = 21.05Mt, scenario C3) te gaan wordt er in 2030 een 48inch buisleiding bijgelegd inclusief een verhoging van de compressorcapaciteit. De combinatie is in dit geval (A->D->FD) een 42inch en 48inch buisleiding en twee compressoren van 281MW en 961,42MW. In node FD is nu aan de maximale mogelijke vraag voldaan (scenario C3 vertegenwoordigt de maximale vraag). Het pad naar node JFD (2050, waterstofvraag is 21.05 Mt) kent daarom geen nieuwe investering, alleen exploitatiekosten van de 42inch en 48inch buisleidingen die in resp. 2020 en 2030 zijn aangelegd. Aan deze investeringsstrategie zijn kosten en opbrengsten verbonden.

Ook is het mogelijk om via een andere route dezelfde waterstofvraag van 21.05Mt in 2050 te leveren. Zo kan in 2020 in node A ook eerst een investering gedaan worden om in node E aan een waterstofvraag van 0.5Mt te voldoen, vervolgens een investering in 2030 om in node HE aan een waterstofvraag van 4.7Mt te voldoen en daarna in 2040 een investering om in node LHE aan een waterstofvraag van 21.05Mt te voldoen. Het pad is dan A> E->HE->LHE. In node A wordt geïnvesteerd in een 16inch leiding, in node E in een 36inch buisleiding om naar HE te gaan en in node HE in een 29inch leiding om naar JHE te gaan, samen met een 29.51MW, 251.49MW en een 961.42MW compressoren.

Behorende bij de verschillende buisdiameter- en compressorcombinaties zijn verschillende investeringskosten, onderhoudskosten en opbrengsten. Bij de eindnodes in 2050 zijn alle investeringen gedaan en wordt als eindafrekening voor toekomstige kosten en opbrengen, een continue exploitatie verondersteld. De benodigde herinvesteringen in de verre toekomst zijn door het contant maken verwaarloosbaar. Wel verschillen door de verschillende buisdiametercombinaties de exploitatiekosten in de eindnodes bij eenzelfde waterstof levering. Hier is rekening mee gehouden in eindafrekening.

Voorbeeld 1: Verschil in buiscombinaties afhankelijk van de waterstofvraag



Figuur 25: Concepttekening beslisboom.

Stap 3: Definieer en kwantificeer onzekerheid

Binnen de beslisboom wordt gewerkt met verschillende scenario's voor de vraagontwikkeling naar waterstof. Elk scenario heeft een bepaalde kans dat deze uitkomt binnen een tijdsinterval. Deze kansen zijn erg onzeker en worden volgens logische redenering vastgesteld die verderop wordt beschreven. Na het doorrekenen van de beslisboom worden deze kansen gevalideerd om te achterhalen binnen welke marge er aanzienlijke afwijkingen ontstaan binnen de beslisboom.

Binnen het onderzoek en de beslisboom wordt gewerkt met vier verschillende scenario's voor de vraag naar waterstof. Het daadwerkelijk uitkomen van een scenario heeft een bepaalde kans van optreden. Om te kunnen omgaan met deze onzekerheid wordt binnen de beslisboom gewerkt met probability scores per tijdsinterval per scenario.

In de beslisboom zijn de mogelijke investeringsstrategieën uitgewerkt. De kosten en opbrengsten die bij deze strategieën horen hangen af van de actie die in een beslisnode genomen wordt en vervolgens van de ontwikkeling van de waterstofvraag die gerelateerd is aan een kans van optreden. Immers de capaciteit van de aangelegde leidingen bepaalt of aan de waterstofvraag kan worden voldaan. Deze kansberekening voor de ontwikkeling van de waterstofvraag is onderdeel van het doorrekenen van de beslisboom. Tabel 59 laat zien wat de kans is dat een bepaalde waterstofvraag in een bepaald tijdsframe optreedt.

Tabel 32: Tabel uit de beslisboom met probability scores

Probabilities for demand P(D)					
Demand:	2020-2030	2030-2040	2040-2050	>2050	
500Kt	40%	20%	5%	1%	
4761Kt	45%	40%	35%	30%	
11716Kt	10%	30%	35%	40%	
21050Kt	5%	10%	25%	29%	
Total	100%	100%	100%	100%	

Tijdspanne 2020-2030

Voor de tijdsperiodes 2020-2030 is de kans voor het optreden van de scenario's als volgt:

- Scenario A0 (waterstofvraag ontwikkelt naar 0.5Mt) 40%
- Scenario A1 (waterstofvraag ontwikkelt naar 4.7Mt) 45%
- Scenario B2 (waterstofvraag ontwikkelt naar 11.7Mt) 10%
- Scenario C3 (waterstofvraag ontwikkelt naar 21.1Mt) 5%

Onderbouwing:

Op dit moment wordt een begin gemaakt met de waterstoftransitie. Eerste projecten en doelen verschijnen en het klimaatakkoord van Parijs is een stok achter de deur om op zoek te gaan naar minder vervuilende manieren van energieproductie. De transitie staat hiermee echt aan het begin en het is in de huidige tijd dan ook moeilijk om één van de meest ambitieuze scenario's als eindresultaat te zien.

In de huidige tijd is het voorspelbaarder dat het scenario A0 of A1 uitkomt. Momenteel zijn er nog niet veel innovatieve technieken die grootschalige veranderingen binnen de transitie te weeg gaan brengen en daarmee de ambitieuzere scenario's lijken te gaan halen. Ook lijken er vanuit de haven

van Rotterdam nog geen duidelijke signalen te komen van een opschaling zoals deze voorspeld wordt in het rapport van H-vision.

Tijdperiode 2030-2040

Voor de tijdsperioden 2030-2040 is de kans voor het optreden van de scenario's als volgt:

- Scenario A0 (waterstofvraag ontwikkelt naar 0.5Mt) 20%
- Scenario A1 (waterstofvraag ontwikkelt naar 4.7Mt) 40%
- Scenario B2 (waterstofvraag ontwikkelt naar 11.7Mt) 30%
- Scenario C3 (waterstofvraag ontwikkelt naar 21.1Mt) 10%

Onderbouwing:

Over tien jaar wordt verwacht dat de eerste doorbraken binnen de transitie bereikt zijn. Partijen gaan zich steeds meer bezighouden met de transitie en zorgen daarvoor voor nieuwe inzichten en technieken. Hierdoor wordt de kans op het scenario A0 (waarbij door wordt gegaan op de huidige manier zonder ingrepen) aanzienlijk kleiner.

Tegelijkertijd neemt de kans om uiteindelijk in een ambitieuzer scenario (de scenario's B2 en C3) door deze nieuwe ontwikkelingen en vergrote interesse toe. Het meeste ambitieuze scenario (C3) is echter nog steeds lastig te behalen vanwege de zwaarte van dit scenario.

Tijdperiode 2040-2050

Voor de tijdsperioden 2040-2050 is de kans voor het optreden van de scenario's als volgt:

- Scenario A0 (waterstofvraag ontwikkelt naar 0.5Mt) 5%
- Scenario A1 (waterstofvraag ontwikkelt naar 4.7Mt) 35%
- Scenario B2 (waterstofvraag ontwikkelt naar 11.7Mt) 35%
- Scenario C3 (waterstofvraag ontwikkelt naar 21.1Mt) 25%

Onderbouwing:

In de verre toekomst is de kennis, innovaties en bereidheid om deel te nemen aan de transitie merkbaar gegroeid. De gevolgen van klimaatverandering worden steeds duidelijker en er moet iets gebeuren om dit tegen te gaan.

De verwachting hierbij is dat de focus steeds meer van de minder ambitieuzere scenario's naar de ambitieuzere scenario's verschuift. Rond deze tijd zal het gemiddelde scenario bijna even denkbaar zijn als het minimale scenario en ook het maximale scenario begint steeds meer werkelijkheid te worden. Daarentegen neemt de kans dat het scenario waarbij weinig tot niks verandert ten opzichte van de huidige realiteit steeds verder af tot dat het bijna niet meer realistisch is.

Tijdperiode >2050

Voor de tijdperiode >2050 is de kans voor het optreden van de scenario's als volgt:

- Scenario A0 (waterstofvraag ontwikkelt naar 0.5Mt) 1%
- Scenario A1 (waterstofvraag ontwikkelt naar 4.7Mt) 30%
- Scenario B2 (waterstofvraag ontwikkelt naar 11.7Mt) 40%
- Scenario C3 (waterstofvraag ontwikkelt naar 21.1Mt) 29%

Onderbouwing:

Als na 2050 wordt gekeken zal de transitie steeds meer richting de ambitieuzere scenario's gaan. De gevolgen van de klimaatveranderingen, de veranderde mentaliteit en innovaties binnen deze transitie maken dit mogelijk. De kans dat scenario A0 optreedt is in dit stadium verwaarloosbaar klein.

Stap 4: Definieer (misgelopen)inkomsten per jaar en scenario

Per jaar wordt vastgesteld wat er mogelijk aan jaarlijkse inkomsten gegenereerd kunnen worden. Het uitgangspunt is de aanlegde capaciteit in relatie tot de ontwikkeling van de vraag naar waterstof. Dit wordt per tijdsinterval en voor elk scenario uitgewerkt. Er zijn opbrengsten als de aangelegde capaciteit voldoende is om aan de vraag te voldoen. Er zijn gederfde inkomsten als de aangelegde capaciteit minder is dan de vraag naar waterstof (opportunity costs of benefits foregone). In deze uitwerking zit het kansaspect van de ontwikkeling van de waterstofvraag zoals in Voorbeeld 2 is toegelicht:

(Misgelopen)Inkomsten vanuit de scenario's (voorbeeldberekening tabel 5, kolom 4)

In tabel 5 worden de jaarlijkse opbrengsten berekend voor de periode 2020-2030. Deze opbrengsten zijn een combinatie van waterstof die geleverd is en mogelijke misgelopen inkomsten wanneer de vraag groter was dan het aanbod.

Hieronder volgt een voorbeeld om de berekeningen in tabel 5 toe te lichten. De 4e kolom wordt gebruikt voor dit voorbeeld. Deze geeft een situatie weer waarbij is geïnvesteerd in een capaciteit die 11.7Mt waterstof kan leveren. Dan zijn er vier mogelijke uitkomsten. De vraag ontwikkelt zich tot 0.5Mt, 4.7Mt, 11.7Mt of 21.1Mt) met resp. kansen 40%, 45%, 10% en 5%. Het is duidelijk dat met een geïnstalleerde capaciteit van 11.7Mt aan de eerste drie vraagontwikkelingen kan worden voldaan maar de laatste niet. Als de vraag zich ontwikkelt tot 21.1Mt zijn er misgelopen inkomsten.

De volgende berekeningen worden nu uitgevoerd in de 5^e kolom van tabel 5.

Geïnstalleerde capaciteit is 11.716; Kans op waterstofvraag 500Kt is 40%

Gemiddelde jaarlijkse inkomsten: $40\% * (500Kt * €14.000) = €2.800.000$

Geïnstalleerde capaciteit is 11.716; Kans op waterstofvraag 4700Kt is 45%

Gemiddelde jaarlijkse inkomsten: $45\% * (4.671Kt * €14.000) = €29.994.300$

Geïnstalleerde capaciteit is 11.716; Kans op waterstofvraag 11.700 is 10%

Gemiddelde jaarlijkse inkomsten: $10\% * (11.716Kt * €14.000) = €16.402.400$

Geïnstalleerde capaciteit is 11.716; Kans op waterstofvraag 21.1 is 5%

Gemiddelde jaarlijkse inkomsten: $5\% * ((11.716Kt * €14.000) - ((21.050Kt - 11.716Kt) * €14.000)) = €1.667.400$. Merk op dat in deze berekening de hoeveelheid waterstof die wordt gevraagd maar niet wordt geleverd omdat er onvoldoende capaciteit is aangelegd als gederfde inkomsten worden gezien.

Het totaal verwachte jaarlijkse inkomen bij een geïnstalleerde capaciteit van 11.716Kt is nu $2.800.000 + 29.994.300 + 16.402.400 + 1.667.400 = € 50.864.100$

Voorbeeld 2: Inkomstenberekening per tijdsinterval en scenario.

De inkomstenderving die plaatsvindt door het niet kiezen van een hoger gelegen scenario wordt ook meegerekend in de jaarlijkse inkomsten (zie Voorbeeld 2). Tabel 33 geeft de tabel voor het eerste tijdsinterval. Deze tabel is opgesteld voor elke tijdsinterval en dient als inkomsten-input voor de duur van het tijdsinterval.

Tabel 33: Tabel met jaarlijkse inkomsten behorende bij tijdsinterval 2020-2030

Probability P(D):	Average annual revenues 2020-2030			
	500Kt	4761Kt	11716Kt	21050Kt
P(D=500) 40%	€ 2.128.000	€ 2.240.000	€ 2.800.000	€ 3.220.000
P(D=4761) 45%	€ -18.007.668	€ 23.995.440	€ 29.994.300	€ 34.493.445
P(D=11716) 10%	€ -11.401.824	€ -2.457.280	€ 16.402.400	€ 18.862.760
P(D=21050) 5%	€ -10.666.600	€ -6.455.680	€ 1.667.400	€ 16.945.250
Total	€ -37.948.092	€ 17.322.480	€ 50.864.100	€ 73.521.455

Stap 5: Bereken kosten en contante waarde bij elke node

Er zijn twee kosten die gemaakt worden bij het doen van een actie. Eenmalige investeringskosten en jaarlijks terugkerende operationele kosten zoals onderhoud. Deze zijn voor elke mogelijk actie bepaald op basis van de kosten zoals deze beschreven zijn in Bijlage 9. Tabel 34 geeft het overzicht van deze kosten. De investeringskosten bestaan uit de kosten voor het aanleggen van de leidingen en het installeren van compressoren (CAPEX). De onderhoudskosten bestaan uit de kosten voor het onderhouden en operationeel houden van de compressoren en de leidingen (OPEX). Door verschillende combinaties van buisleidingen is er een verschil in CAPEX en OPEX kosten.

Tabel 34: Operationele kosten en investeringskosten per actie voor een nieuw waterstofnetwerk (van Node naar Node)

Year	From Cap. Kt H2	To Cap. Kt H2	From node	To node	Investment	Annual O & M
2020	0	21050	A	B	€ 3.383.276.931	€ 57.515.708
	0	11716	A	C	€ 1.907.260.177	€ 32.423.423
	0	4761	A	D	€ 813.242.983	€ 11.263.415
	0	500	A	E	€ 107.287.287	€ 858.298
	21050	21050	B	FB	€ 0	€ 57.515.708
2030	11716	21050	C	FC	€ 1.452.553.426	€ 56.787.017
	11716	11716	C	GC	€ 0	€ 32.423.423
	4761	21050	D	FD	€ 2.570.033.948	€ 54.746.851
	4761	11716	D	GD	€ 1.094.017.194	€ 29.531.894
	4761	4761	D	HD	€ 0	€ 11.263.415
	500	21050	E	FE	€ 3.272.173.314	€ 55.826.778
	500	11716	E	GE	€ 1.801.650.145	€ 30.586.501
	500	4761	E	HE	€ 721.506.798	€ 10.744.074
	500	500	E	IE	€ 0	€ 858.298
	2040	21050	21050	FB	JFB	€ 0
21050		21050	FC	JFC	€ 0	€ 56.787.017
21050		21050	FD	JFD	€ 0	€ 54.746.851
21050		21050	FE	JFE	€ 0	€ 55.826.778
11716		21050	GC	JGC	€ 1.452.553.426	€ 56.787.017
11716		21050	GD	JGD	€ 1.452.553.426	€ 53.895.488
11716		21050	GE	JGE	€ 1.452.553.426	€ 54.950.095
11716		11716	GC	KGC	€ 0	€ 32.423.423
11716		11716	GD	KGD	€ 0	€ 29.531.894
11716		11716	GE	KGE	€ 0	€ 30.586.501
4761		21050	HD	JHD	€ 2.570.033.948	€ 54.746.851
4761		4761	HD	LHD	€ 0	€ 11.263.415
4761		11716	HD	KHD	€ 1.094.017.194	€ 29.531.894
4761		21050	HE	JHE	€ 2.550.666.516	€ 53.803.916
4761		4761	HE	LHE	€ 0	€ 10.744.074
4761		11716	HE	KHE	€ 1.080.143.348	€ 28.819.108
500		500	IE	MIE	€ 0	€ 858.298
500		4761	IE	LIE	€ 721.506.798	€ 10.744.074
500		11716	IE	KIE	€ 1.801.650.145	€ 30.841.970
500		21050	IE	JIE	€ 3.272.173.314	€ 55.826.778

Na het vaststellen van de verschillende kosten, is berekend wat de contante waarde in elke node is. Voor de doorrekening van de beslisboom wordt achterwaartse recursie toegepast. De berekening begint bij de eind nodes. De contante waarde van de eindnodes is bepaald door te veronderstellen dat de situatie na 2050 zich blijft continueren. Dit geldt voor de inkomsten en exploitatie uitgaven. Omdat de investeringsuitgaven al gedaan zijn, en herinvesteringen in de verre toekomst vallen, zijn deze bij het contant maken verwaarloosbaar. Daarom worden herinvesteringen in de eindafrekening weggelaten. Vervolgens zijn contante waarden van de voorgaande nodes berekend met een looptijd van 10 jaar en een discontovoet van 8% (Van den Berg, 2020). De definitieve contante waarde voor een tussennode is de hoogst berekende contante waarde van de paden die vertrekken uit zo'n node (zie Voorbeeld 3). Tabel 35 geeft de tabel met alle contante waarden voor de nodes binnen de beslisboom.

Tabel 35: Contante waarden na de nodes bij een nieuw waterstofnetwerk

	2050		2040		2030		2020	
JFB	€ 1.741.173.902	FB-JFB	€ 1.614.803.107	B	€ 1.185.691.144	A-B	€ -2.726.672.648	
JFC	€ 1.750.282.594	FC-JFC	€ 1.623.911.739	C-FC	€ -257.753.650	A-C	€ -1.473.549.684	
JFD	€ 1.775.784.607	FD-JFD	€ 1.649.413.812	D-GC	€ 669.206.405	A-D	€ -734.268.386	
JFE	€ 1.762.285.527	FE-JFE	€ 1.635.914.732	D-FD	€ -1.349.732.099	A-E	€ -640.553.853	
JGC	€ 1.750.282.534	GC-JGC	€ 171.358.312	D-GD	€ -388.666.671			
JGD	€ 1.786.426.651	GD-JGD	€ 207.502.429	D-HD	€ 82.725.212			
JGE	€ 1.773.244.057	GE-JGE	€ 194.319.835	E-FE	€ -2.065.370.544			
JHD	€ 1.775.784.607	HD-JHD	€ -920.620.136	E-GE	€ -1.109.482.217			
JHE	€ 1.787.571.304	HE-JHE	€ -889.466.007	E-HE	€ -632.289.821			
JIE	€ 1.762.285.527	IE-JIE	€ -1.636.258.581	E-IE	€ -858.703.859			
KGC	€ 786.541.212	GC-KGC	€ 746.801.292					
KGD	€ 822.685.330	GD-KGD	€ 782.945.409					
KGE	€ 809.502.735	GE-KGE	€ 769.762.815					
KHD	€ 822.685.330	HD-KHD	€ -311.071.784					
KHE	€ 831.595.147	HE-KHE	€ -288.288.121					
KIE	€ 806.309.370	IE-KIE	€ -1.035.080.695					
LHD	€ -141.551.491	HD-LHD	€ -105.393.923					
LHE	€ -135.059.727	HE-LHE	€ -98.902.158					
LIE	€ -135.059.727	IE-LIE	€ -820.408.956					
MIE	€ -1.501.547.329	IE-MIE	€ -1.420.032.716					
		MAX		MAX		MAX		
		FB	€ 1.614.803.107	B	€ 1.185.691.144	A	€ -640.553.853	Route 2020-2030
		FC	€ 1.623.911.739	C	€ 669.206.405			Route 2030-2040
		FD	€ 1.649.413.812	D	€ 82.725.212			Route 2040-2050
		FE	€ 1.635.914.732	E	€ -632.289.821			FB
		GC	€ 746.801.292					JFC
		GD	€ 782.945.409					JFD
		GE	€ 769.762.815					JFE
		HD	€ -105.393.923					KGC
		HE	€ -98.902.158					KGD
		IE	€ -820.408.956					KGE
								LHD
								LHE
								LIE

Contant maken van nodes

Onderstaand worden twee nodes als voorbeeld uitgewerkt.

Voorbeeld eindnodes

Contante waarde in eindnode JFB is de contante waarde van de gecontinueerde jaarlijkse inkomsten – gecontinueerde jaarlijkse exploitatiekosten:

Contante waarde in eindnode JFB (>2050) = $(\text{€ } 196.809.620 - \text{€}57.515.708)/8\% = \text{€}1.741.173.902$

Voorbeeld tussennodes

Contante waarde tussennode HD = Maximale waarde uit contante waarde vanuit JHD, KHD en LHD)

HD vanuit JHD:

$(-\text{Investering vanuit HD naar JHD} = \text{€ } 2.570.033.948) + (\text{Inkomsten in 2040-}>2050 \text{ in scenario A1} = \text{€ } 5.327.840 - \text{OPEX JHD} = \text{€}54.746.851) / ((1 + \text{Discontovoet} = 8\%)^1 + (\text{Inkomsten in 2040-}>2050 \text{ in scenario A1} = \text{€ } 5.327.840 - \text{OPEX JHD} = \text{€}54.746.851) / ((1 + \text{Discontovoet} = 8\%)^2 + \dots (\text{herhalen voor elk jaar tot volgende interval}) \dots (\text{Inkomsten in 2040-}>2050 \text{ in scenario A1} = \text{€ } 5.327.840 - \text{OPEX JHD} = \text{€}54.746.851) / ((1 + \text{Discontovoet} = 8\%)^{10} + (\text{Contante waarde JHD} = \text{€ } 1.775.784.607) / ((1 + \text{Discontovoet} = 8\%)^{10}))$

Contante waarde HD vanuit JHD = $\text{€} -2.079.107.671$

HD vanuit KHD

$(-\text{Investering vanuit HD naar KHD} = \text{€ } 1.094.017.194) + (\text{Inkomsten in 2040-}>2050 \text{ in scenario A1} = \text{€ } 5.327.840 - \text{OPEX KHD} = \text{€}29.531.894) / ((1 + \text{Discontovoet} = 8\%)^1 + (\text{Inkomsten in 2040-}>2050 \text{ in scenario A1} = \text{€ } 5.327.840 - \text{OPEX KHD} = \text{€}29.531.894) / ((1 + \text{Discontovoet} = 8\%)^2 + \dots (\text{herhalen voor elk jaar tot volgende interval}) \dots (\text{Inkomsten in 2040-}>2050 \text{ in scenario A1} = \text{€ } 5.327.840 - \text{OPEX KHD} = \text{€}29.531.894) / ((1 + \text{Discontovoet} = 8\%)^{10} + (\text{Contante waarde KHD} = \text{€ } 822.685.330) / ((1 + \text{Discontovoet} = 8\%)^{10}))$

Contante waarde HD vanuit KHD = $\text{€} -875.365.876$

HD vanuit LHD

$(-\text{Investering vanuit HD naar LHD} = \text{€}0) + (\text{Inkomsten in 2040-}>2050 \text{ in scenario A1} = \text{€ } 5.327.840 - \text{OPEX LHD} = \text{€}11.263.415) / ((1 + \text{Discontovoet} = 8\%)^1 + (\text{Inkomsten in 2040-}>2050 \text{ in scenario A1} = \text{€ } 5.327.840 - \text{OPEX LHD} = \text{€}11.263.415) / ((1 + \text{Discontovoet} = 8\%)^2 + \dots (\text{herhalen voor elk jaar tot volgende interval}) \dots (\text{Inkomsten in 2040-}>2050 \text{ in scenario A1} = \text{€ } 5.327.840 - \text{OPEX LHD} = \text{€}11.263.415) / ((1 + \text{Discontovoet} = 8\%)^{10} + (\text{Contante waarde LHD} = \text{€ } 141.551.491) / ((1 + \text{Discontovoet} = 8\%)^{10}))$

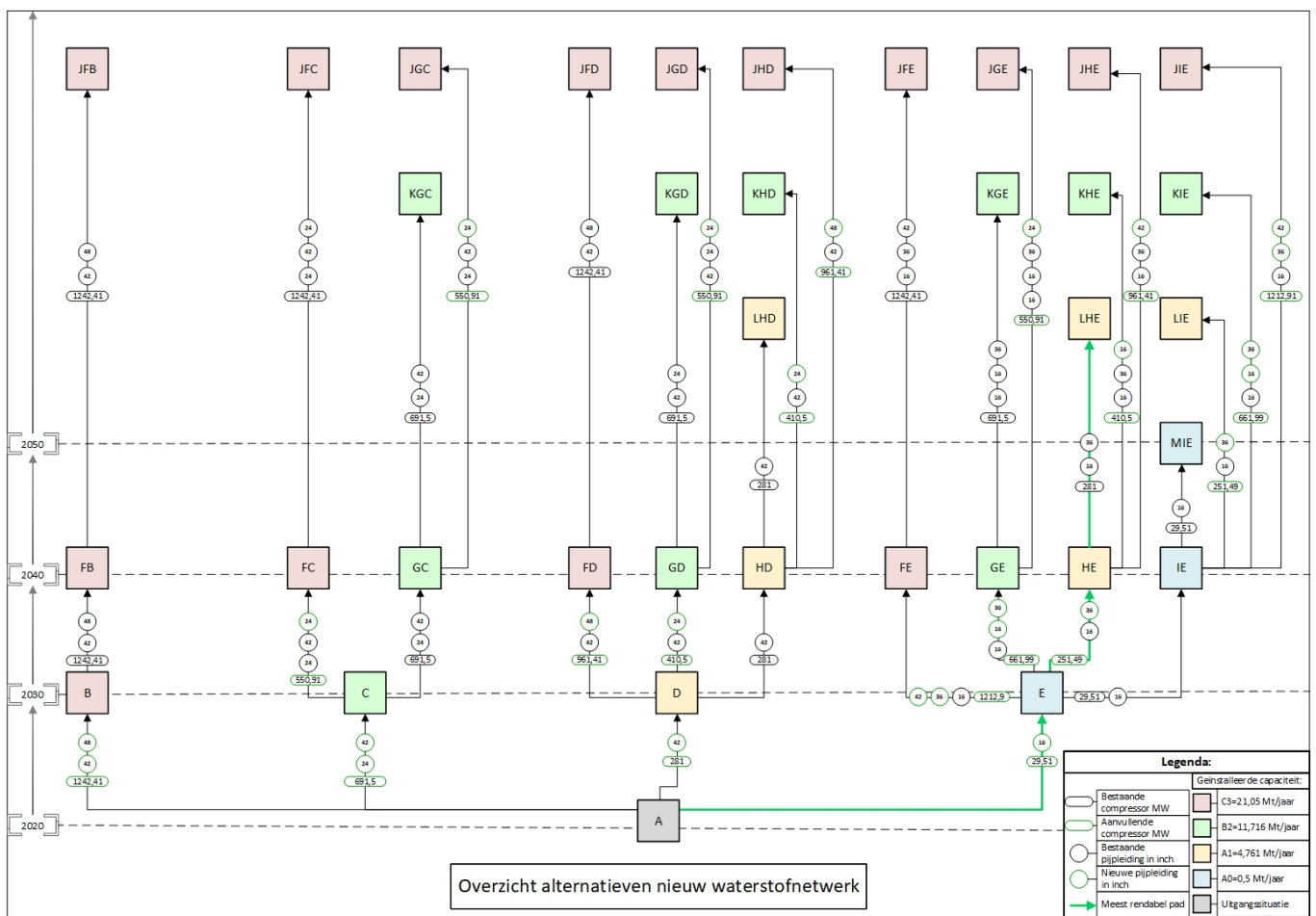
Contante waarde HD vanuit LHD = $\text{€} -105.393.923$

De contante waarde voor node HD is de maximale waarde die berekend is = $\text{€} -105.393.923$

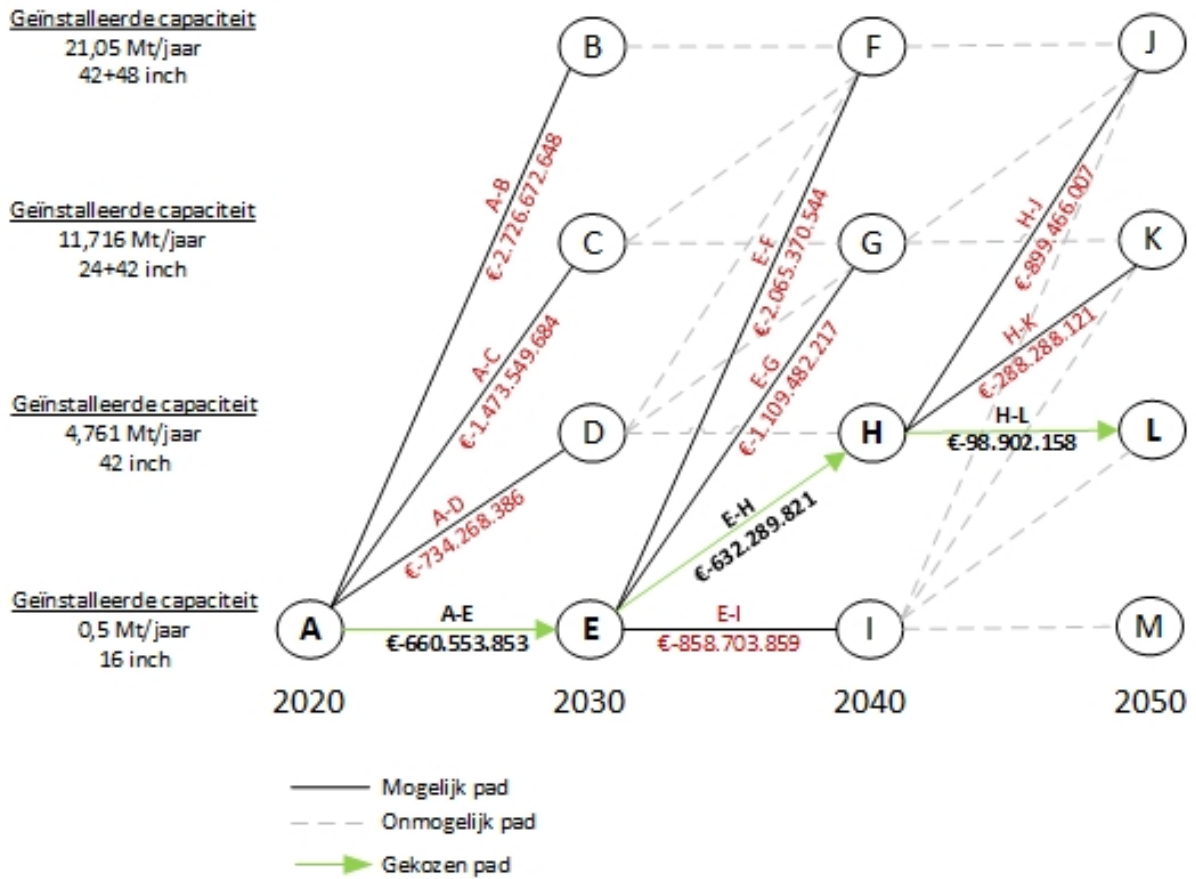
Voorbeeld 3: Contant maken en maximaliseren van nodes

Stap 6 Bepalen van het meest optimale pad

Vanuit Tabel 35 kan ook de meest optimale route afgelezen worden. Van rechts naar links in de Max kolommen begint het pad bij A. De bijbehorende hoogste contante waarde binnen node A is de waarde vanuit node E. Dit betekent dat het eerste pad loop van node A naar node E. Als daarna gekeken wordt naar node E en de bijbehorende hoogste contante waarde wordt gezocht komt deze uit node HE. Dat betekent dat het volgende pad loopt van node E naar node HE. Ditzelfde wordt gedaan voor node HE. De hoogste contante waarde in node HE komt uit LHE. Het volgende pad loopt dan van HE naar LHE. Figuur 26 geeft dit pad weer, met daarbij de bijbehorende acties. Deze acties bestaan uit buisdiametercombinaties die door de tijd heen gemaakt moeten worden en extra compressorcapaciteit die geïnstalleerd moet worden. Een versimpeling van deze route, inclusief de bijbehorende contante waarden, is weergegeven in Figuur 27.



Figuur 26: Beslisboom met meest optimale pad en bijbehorende acties



Figuur 27: Versimpelde weergave optimaal pad door beslisboom huidige prijzen

Stap 5B: Bereken kosten en contante waarde bij elke node (bij het gebruik van een bestaande aardgasleiding.)

Binnen het onderzoek is naar voren gekomen dat er een mogelijkheid is om een aardgasleiding met een diameter van 36inch vanaf 2030 om te vormen en in gebruik te nemen ten behoeve van het transport van waterstof. De beslisboom is hiervoor nogmaals ingevuld met andere investerings- en onderhoudskosten. Tabel 36 geeft een overzicht met daarin de investeringskosten en operationele en onderhoudskosten bij het gebruik van een bestaande 36inch aardgas buisleiding vanaf 2030.

Tabel 36: Operationele kosten en investeringskosten per actie bij gebruik van bestaande aardgasleiding (van node naar node)

Year	From Cap.	To Cap.	From node	To node	Investment	Annual O & M
2020	0	21050	A	B	€ 3.383.276.931	€ 57.515.708
	0	11716	A	C	€ 1.907.260.177	€ 32.423.423
	0	4761	A	D	€ 813.242.983	€ 11.263.415
	0	500	A	E	€ 107.287.287	€ 858.298
2030	21050	21050	B	FB	€ 0	€ 57.515.708
	11716	21050	C	FC	€ 1.424.594.807	€ 56.561.215
	11716	11716	C	GC	€ 0	€ 32.423.423
	4761	21050	D	FD	€ 2.570.033.948	€ 54.746.851
	4761	11716	D	GD	€ 1.066.058.574	€ 29.306.091
	4761	4761	D	HD	€ 0	€ 11.263.415
	500	21050	E	FE	€ 3.210.693.850	€ 55.058.285
	500	11716	E	GE	€ 1.740.170.682	€ 29.818.008
	500	4761	E	HE	€ 660.027.334	€ 9.975.581
	500	500	E	IE	€ 0	€ 858.298
2040	21050	21050	FB	JFB	€ 0	€ 57.515.708
	21050	21050	FC	JFC	€ 0	€ 56.561.215
	21050	21050	FD	JFD	€ 0	€ 54.746.851
	21050	21050	FE	JFE	€ 0	€ 55.058.285
	11716	21050	GC	JGC	€ 1.424.594.807	€ 56.561.215
	11716	21050	GD	JGD	€ 1.452.553.426	€ 53.669.685
	11716	21050	GE	JGE	€ 1.452.553.426	€ 54.181.602
	11716	11716	GC	KGC	€ 0	€ 32.423.423
	11716	11716	GD	KGD	€ 0	€ 29.306.091
	11716	11716	GE	KGE	€ 0	€ 29.818.008
	4761	21050	HD	JHD	€ 2.570.033.948	€ 54.746.851
	4761	4761	HD	LHD	€ 0	€ 11.263.415
	4761	11716	HD	KHD	€ 1.066.058.574	€ 29.306.091
	4761	21050	HE	JHE	€ 2.550.666.516	€ 53.035.422
	4761	4761	HE	LHE	€ 0	€ 9.975.581
	4761	11716	HE	KHE	€ 1.080.143.348	€ 28.050.615
	500	500	IE	MIE	€ 0	€ 858.298
	500	4761	IE	LIE	€ 660.027.334	€ 9.975.581
	500	11716	IE	KIE	€ 1.740.170.682	€ 30.073.477
	500	21050	IE	JIE	€ 3.210.693.850	€ 55.058.285

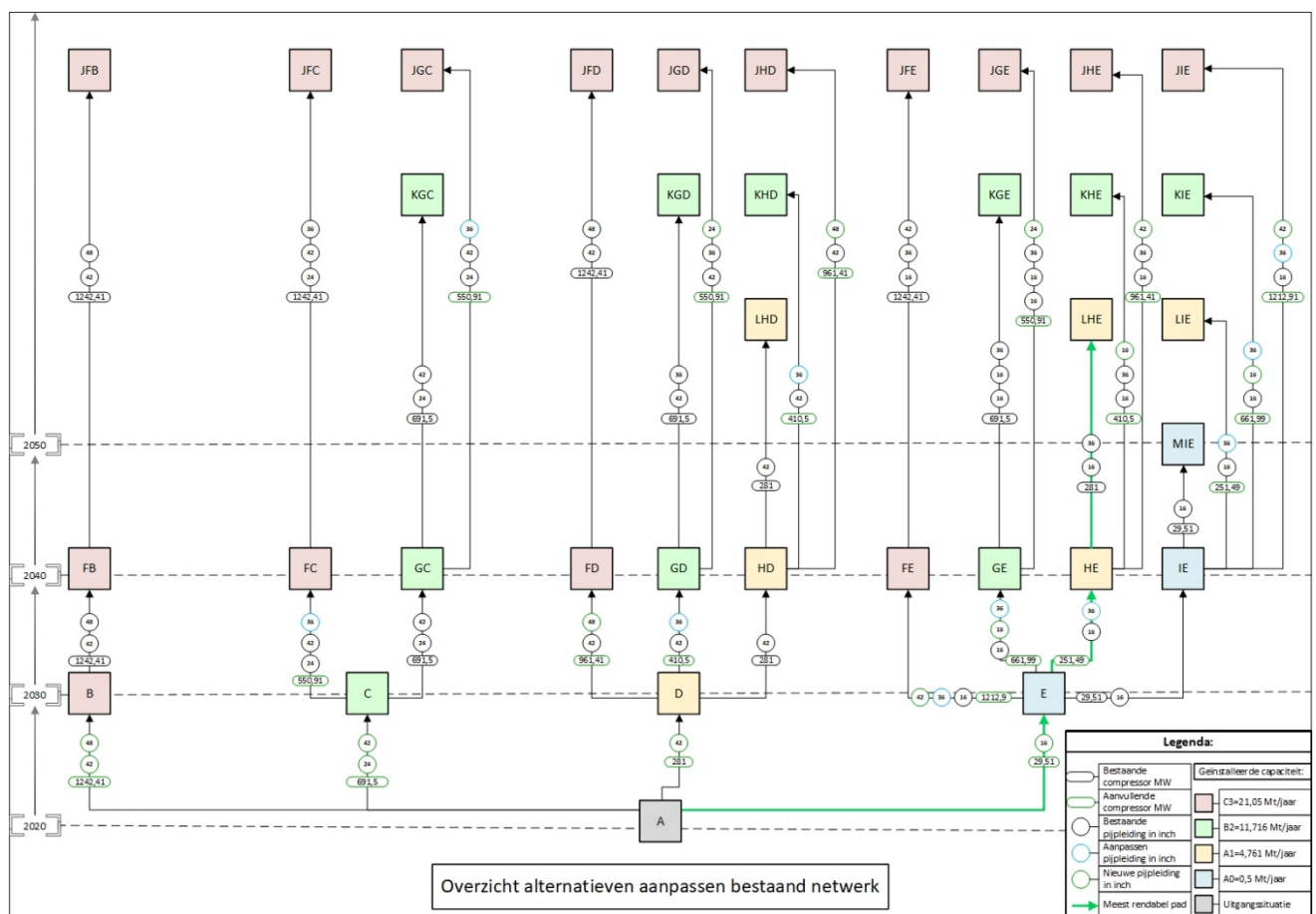
Omdat de investeringskosten en operationele en onderhoudskosten in deze situatie wijzigen moet de beslisboom nogmaals doorgerekend worden. Dit gebeurt aan de hand van dezelfde wijze zoals in stap 5 uitgelegd is. Tabel 37 geeft de contante waarden van de nodes bij het gebruik van een bestaande aardgasleiding.

Tabel 37: Contante waarden van de nodes bij het gebruik van een bestaande aardgasleiding

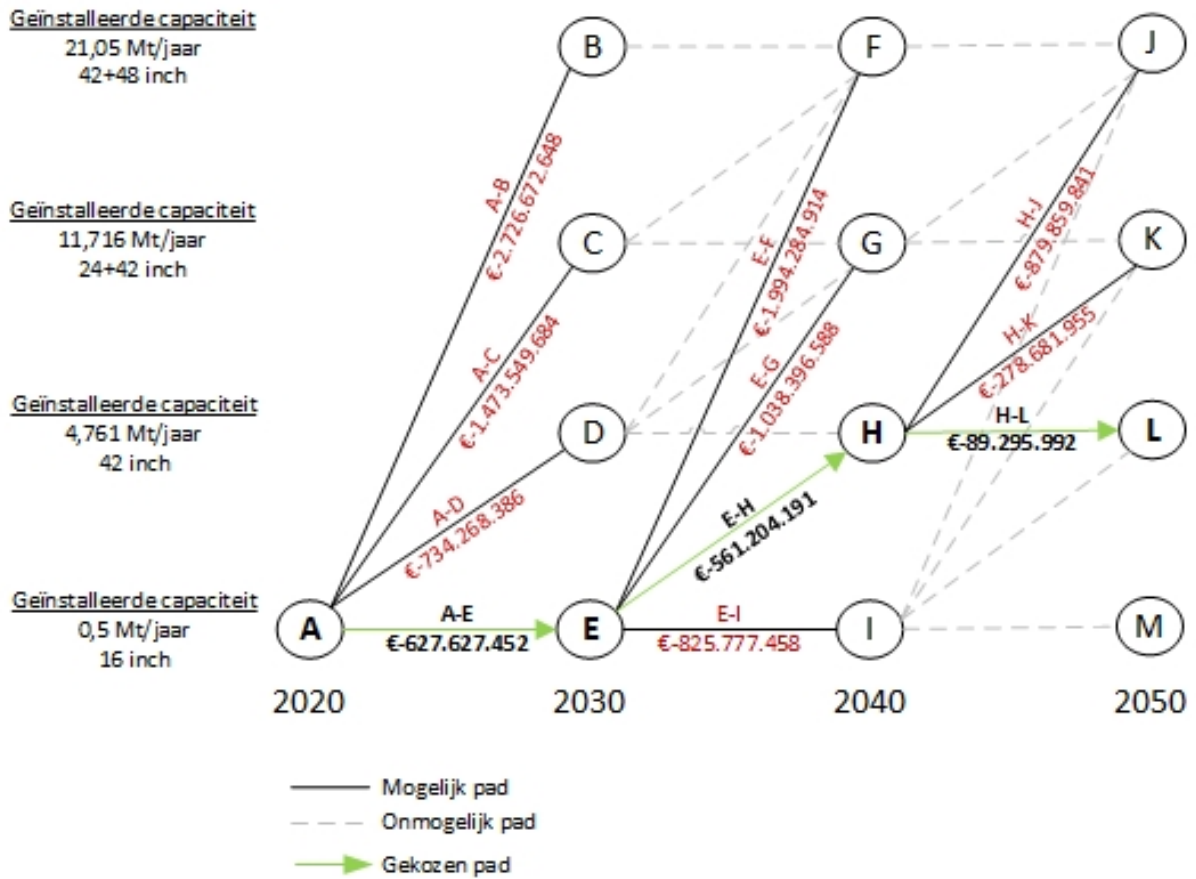
	2050		2040		2030		2020				
JFB	€ 1.741.179.902	FB-JFB	€ 1.614.803.107	B	€ 1.185.691.144	A-B	€ -2.726.672.648				
JFC	€ 1.753.105.065	FC-JFC	€ 1.626.734.270	C-FC	€ -226.972.499	A-C	€ -1.479.549.684				
JFD	€ 1.775.784.607	FD-JFD	€ 1.649.413.812	C-GC	€ 669.206.405	A-D	€ -734.268.386				
JFE	€ 1.771.891.694	FE-JFE	€ 1.645.520.898	D-FD	€ -1.349.732.099	A-E	€ -627.627.452				
JGC	€ 1.753.105.065	GC-JGC	€ 202.139.463	D-GD	€ -357.885.521						
JGD	€ 1.789.249.182	GD-JGD	€ 210.324.961	D-HD	€ 82.725.212						
JGE	€ 1.782.850.223	GE-JGE	€ 203.926.001	E-FE	€ -1.994.284.914						
JHD	€ 1.775.784.607	HD-JHD	€ -920.620.136	E-GE	€ -1.038.396.588						
JHE	€ 1.797.177.470	HE-JHE	€ -879.859.841	E-HE	€ -561.204.191						
JIE	€ 1.771.891.694	IE-JIE	€ -1.565.172.952	E-IE	€ -825.777.458						
KGC	€ 786.541.212	GC-KGC	€ 746.801.292								
KGD	€ 825.507.861	GD-KGD	€ 785.767.941								
KGE	€ 819.108.901	GE-KGE	€ 779.368.981								
KHD	€ 825.507.861	HD-KHD	€ -280.290.633								
KHE	€ 841.201.313	HE-KHE	€ -278.681.955								
KIE	€ 815.915.536	IE-KIE	€ -963.995.065								
LHD	€ -141.551.491	HD-LHD	€ -105.393.923								
LHE	€ -125.453.561	HE-LHE	€ -89.295.992								
LIE	€ -125.453.561	IE-LIE	€ -749.323.326								
MIE	€ -1.503.547.329	IE-MIE	€ -1.420.032.716								
		MAX		MAX		MAX		Route 2020-2030	Route 2030-2040	Route 2040-2050	
		FB	€ 1.614.803.107	B	€ 1.185.691.144	A	€ -627.627.452	E	FB	JFB	
		FC	€ 1.626.734.270	C	€ 669.206.405				GC	JFC	
		FD	€ 1.649.413.812	D	€ 82.725.212				HD	JFD	
		FE	€ 1.645.520.898	E	€ -561.204.191				HE	JFE	
		GC	€ 746.801.292							KGC	
		GD	€ 785.767.941							KGD	
		GE	€ 779.368.981							KGE	
		HD	€ -105.393.923							LHD	
		HE	€ -89.295.992							LHE	
		IE	€ -749.323.326							LIE	

Stap 6b Bepalen van het meest optimale pad (Bij het gebruik van een bestaande aardgasleiding.)

Volgens dezelfde wijze zoals in stap 6 wordt het voorkeurspad bepaald voor de situatie waar een bestaande 36inch aardgasleiding overgenomen wordt in 2030. Figuur 28 geeft de voorkeursroute door de beslisboom bij het gebruik van een bestaande aardgasbuisleiding. Hierbij wordt ook aangegeven wanneer en in welke situatie de bestaande buisleiding over te nemen is en toegevoegd kan worden aan de buisleidingcombinaties ten behoeve van transport van waterstof. Uit Figuur 28 is af te lezen dat de voorkeursroute A-E-HE-LHE is, hetzelfde pad dat de voorkeur geniet bij het nieuw realiseren van een waterstoftransportnetwerk. Hetzelfde pad is weergegeven in Figuur 29 in een versimpelde weergave van de beslisboom met contante waarden. Zoals is af te lezen zijn de contante waarden, in vergelijking met Figuur 27 behorende bij een nieuw aan te leggen netwerk, tussen E-G en H-K aanzienlijk gestegen maar door de hoge investeringskosten niet genoeg om het voorkeurspad over te nemen.



Figuur 28: Voorkeurspad bij het gebruik van een bestaande 36inch aardgasleiding in 2030



Figuur 29: Versimpeling van de beslisboom met contante waarden bij het gebruik van een bestaande 36inch aardgasleiding in 2030.

Stap 7 Test sensitiviteit en robuustheid (validatie).

Deze stap bestaat uit twee delen. Het eerste deel is het testen van de methode op validiteit waarbij drie vragen gesteld worden: 1) Zijn de inputgegevens juist? 2) Zijn deze op de juiste manier doorgerekend? en 3) Is het resultaat waarheidsgetrouw? Het tweede deel is het uitvoeren van een sensitiviteitsanalyse om te achterhalen voor welke veranderingen binnen de scenario's, de kosten en inkomsten de beslisboom gevoelig is. Aan de hand van een aantal op voorhand opgestelde denkbare aanpassingen wordt de beslisboom aangepast en wordt het voorkeurspad opnieuw bepaald.

Validiteit van de methode

De methode wordt gevalideerd aan de hand van drie vragen:

- Zijn de inputgegevens juist (inhoudsvaliditeit)?
- Zijn deze op de juiste manier doorgerekend (indruksvaliditeit)?
- Is het resultaat waarheidsgetrouw (ecologische validiteit)?

Om te bepalen of de inputgegevens juist zijn worden deze per gegevenssoort gevalideerd.

Om te achterhalen of de beslisboom op de juiste manier doorgerekend is, is deze nagerekend met een controlefunctie binnen Excel. Daarnaast is het originele Excel-bestand gecontroleerd door een expert.

Om te bepalen of de resultaten waarheidsgetrouw zijn, is een analyse van de resultaten uitgevoerd. Dit geeft een inzicht in de manier waarop conclusies vanuit de beslisboom getrokken zijn. Deze is uitgevoerd aan de hand van een sensitiviteitsanalyse.

Om te achterhalen voor welke veranderingen binnen de inputgegevens de beslisboom sensitief is worden een aantal vragen gesteld omtrent deze gegevens. Om deze vragen te beantwoorden is de beslisboom opnieuw doorgerekend met verschillende acties en bandbreedtes voor de inputgegevens.

Inhoudsvaliditeit

De beslisboommethode vereist veel variabelen waarop een voorkeurspad berekend wordt. Dit betekent dat er gekeken moet worden of alle benodigde en de juiste variabelen gebruikt zijn binnen het onderzoek (Benders, 2020).

De volgende variabelen liggen ten grondslag aan de beslisboom:

- De waterstofvraag van de scenario's
- De probabilityscores van de scenario's
- De benodigde leidingdiameters voor waterstoftransport
- De benodigde compressorcapaciteit voor waterstoftransport
- De investeringskosten voor buisleidingen
- De investeringskosten voor compressoren
- De onderhoudskosten voor buisleidingen
- De onderhoudskosten voor compressoren
- De transportkosten van waterstof
- De verkoopprijzen van waterstof
- De discontovoet voor het contant maken van de kosten en opbrengsten

In essentie wordt er door middel van de beslisboom een adaptieve kosten-baten analyse uitgevoerd. Een kosten-baten analyse wordt opgezet aan de hand van een aantal stappen. (Boardman, Greenberg, Vining, & Weimer, 2018) geeft een basisinterpretatie van een kosten-baten analyse, zie Tabel 38.

Tabel 38: Stappen voor het maken van een Kosten-baten analyse (Boardman, Greenberg, Vining, & Weimer, 2018)

Table 1.1 *The Major Steps in CBA*

1. Explain the purpose of the CBA
2. Specify the set of alternative projects
3. Decide whose benefits and costs count (specify standing)
4. Identify the impact categories, catalogue them, and select metrics
5. Predict the impacts quantitatively over the life of the project
6. Monetize (attach dollar values to) all impacts
7. Discount benefits and costs to obtain present values
8. Compute the net present value of each alternative
9. Perform sensitivity analysis
10. Make a recommendation

Voor het opzetten van een kosten-baten analyse zijn binnen de beslisboom stap 5 tot en met 8 uit (Boardman, Greenberg, Vining, & Weimer, 2018) uitgevoerd:

5 Predict the impacts quantitatively over the life of the project:

- *De waterstofvraag van de scenario's*
- *De probabilityscores van de scenario's*

6 Monetize (attach dollar values to) all impacts

- *De benodigde leidingdiameters voor waterstoftransport*
- *De benodigde compressorcapaciteit voor waterstoftransport*
- *De investeringskosten voor buisleidingen*
- *De investeringskosten voor compressoren*
- *De onderhoudskosten voor buisleidingen*
- *De onderhoudskosten voor compressoren*

- *De transportkosten van waterstof*
- *De verkoopprijzen van waterstof*
- *De discontovoet voor het contant maken van de kosten en opbrengsten*

7 Discount benefits and costs to obtain present values

Deze stap is verwerkt binnen de beslisboom waarde voor alle acties en tijdsindicaties de contante waarden is bepaald.

8 Compute the net present value of each alternative

Uiteindelijk wordt de totale contante waarde van de acties doorgerekend in de eerste node en wordt hieruit het beste alternatief gekozen.

Er kan geconcludeerd worden dat de juiste inputgegevens gebruikt zijn voor het berekenen van de kosten en baten. Alle variabele, behalve de discontovoet zijn overgenomen uit bestaande en gerenommeerde literatuur. De discontovoet is een aanname die gedaan is vanuit de literatuur.

Missende variabele binnen de berekening zijn sociale kosten en baten (Boardman, Greenberg, Vining, & Weimer, 2018). De waterstoftransitie wordt niet alleen vanuit de private sector gefinancierd maar zal voor een groot deel publiek geld bevatten via subsidiering. Binnen de beslisboom zijn deze kosten en baten niet meegenomen.

Indruksvaliditeit

De indruksvaliditeit geeft aan of het resultaat van de methode de juist indruk geeft van de situatie (Benders, 2020). Er zijn meerdere methoden om te gaan met onzekerheid. Vaak zijn dilemma's kwantitatief of kwalitatief van aard. Dit vraagt om verschillende benaderingen. De beslisboommethode is een kwantitatieve benadering die op een monetaire manier inzicht geeft in keuzes en voorkeurspaden door de tijd. De kosten en baten van de projecten kunnen met deze methode onderhevig gesteld worden aan veranderingen in de tijd door middel van het invoegen van scenario's. Als het basisprincipe van de beslisboom begrepen wordt, geeft deze de juiste indruk van realistische uitkomsten binnen het project.

Om te achterhalen of deze indruk op juiste manier vervaardigd is, is gecontroleerd of de beslisboom op de juiste manier is ingevuld (expert judgement) en of de conclusies op de juiste manier getrokken zijn.

Is de beslisboom op je juiste manier ingevuld?

De beslisboom is ter controle opgestuurd naar een expert. In dit geval is dit de begeleider van het onderzoek, Martine van den Boomen. Zij heeft het originele Excel bestand doorgelopen en heeft geconcludeerd dat de berekening op de juiste wijze is uitgevoerd.

Ecologische validiteit

De ecologische validiteit is vastgesteld aan de hand van een sensitiviteitsanalyse. Deze analyse is enkel uitgevoerd op de situatie waarbij er een nieuw waterstoftransportnetwerk aangelegd wordt en niet voor de situatie waarbij een bestaande 36inch waterstofleiding wordt overgenomen in 2030.

De volgende vragen zijn gesteld en bijbehorende acties zijn uitgevoerd:

Omdat de compressoren verreweg de hoogste investerings- en onderhoudskosten kennen, hebben deze grote invloed op het voorkeurspad. Momenteel zijn er veel ontwikkelingen op het gebied van compressoren en de bijbehorende investerings- en onderhoudskosten voor de toekomst zijn zeer onzeker. Er is

6. Wat is de invloed van veranderingen in prijzen voor het realiseren van compressoren.

Omdat de compressoren verreweg de hoogste investerings- en onderhoudskosten kennen, hebben deze grote invloed op het voorkeurspad. Momenteel zijn er veel ontwikkelingen op het gebied van compressoren en de bijbehorende investerings- en onderhoudskosten voor de toekomst zijn zeer onzeker. Er is daarom gekozen om de beslisboom nog tweemaal door te rekenen. Eén keer in een situatie waarbij compressoren algeheel buiten beschouwing worden gelaten en één situatie waarbij, door technologische ontwikkeling en schaalvergroting, de investeringskosten voor compressoren elke tijdsinterval halveren.

a. De prijzen voor compressoren zijn in zijn geheel uit de beslisboom gehaald.

Tabel 39 geeft het resultaat van de doorrekening in deze situatie. Het voorkeurspad dat zich vormt is **A-B-FB-JFB**. Dit betekent dat er in 2020 direct opgeschaald wordt naar een capaciteit van 21.05Mt.

Tabel 39: Doorrekening beslisboom zonder compressoren

	2050		2040		2030		2020				
JFB	€ 2.415.327.543	FB-JFB		€ 2.288.956.748	B	€ 1.859.844.785	A-B	€ 1.119.968.716			
JFC	€ 2.424.436.175	FC-JFC		€ 2.298.065.380	C	€ 1.823.145.921	A-C	€ 1.028.109.988			
JFD	€ 2.421.685.422	FD-JFD		€ 2.295.314.626	D	€ 1.567.944.704	A-D	€ 822.738.900			
JFE	€ 2.427.961.884	FE-JFE		€ 2.301.591.089	E	€ 1.751.124.344	A-E	€ 497.960.452			
JGC	€ 2.424.436.175	GC-JGC		€ 2.252.257.884	D-GD	€ 1.530.028.499					
JGD	€ 2.432.327.466	GD-JGD		€ 2.260.149.175	D-HD	€ 1.208.097.828					
JGE	€ 2.438.920.414	GE-JGE		€ 2.266.742.122	E-FE	€ 1.697.439.899					
JHD	€ 2.421.685.422	HD-JHD		€ 2.180.236.306	E-GE	€ 1.471.166.953					
JHE	€ 2.427.961.884	HE-JHE		€ 2.205.880.201	E-HE	€ 1.341.174.465					
JIE	€ 2.427.961.884	IE-JIE		€ 2.126.551.861	E-IE	€ 510.354.233					
KGC	€ 1.161.761.343	GC-KGC		€ 1.122.021.423							
KGD	€ 1.169.652.634	GD-KGD		€ 1.129.912.714							
KGE	€ 1.176.245.562	GE-KGE		€ 1.136.505.662							
KHD	€ 1.169.652.634	HD-KHD		€ 1.084.105.218							
KHE	€ 1.173.052.217	HE-KHE		€ 1.101.378.647							
KIE	€ 1.173.052.217	IE-KIE		€ 1.022.050.307							
LHD	€ -17.328.747	HD-LHD		€ 18.828.821							
LHE	€ -16.347.218	HE-LHE		€ 19.810.351							
LIE	€ -16.347.218	IE-LIE		€ -59.517.989							
MIE	€ -1.496.011.965	IE-MIE		€ -1.412.497.352							
		MAX		MAX		MAX		Route 2020-2030	Route 2030-2040	Route 2040-2050	
		FB		B		A		€ 1.119.968.716	B	FB	JFB
		FC		C						FC	JFC
		FD		D						FD	JFD
		FE		E						FE	JFE
		GC									JGC
		GD									JGD
		GE									JGE
		HD									JHD
		HE									JHE
		IE									JIE

b. De prijzen voor compressoren zijn elke tijdsinterval gehalveerd.

Tabel 40 geeft het resultaat van de doorrekening in deze situatie. Het voorkeurspad dat zich vormt is **A-E-HE-JHE**. Dit betekent dat er in 2020 niet opgeschaald wordt, dat er in 2030 opgeschaald wordt naar een capaciteit 4,7Mt en dat er in 2040 opgeschaald wordt naar een capaciteit van 21.05Mt.

Tabel 40: Doorrekening beslisboom met gehalveerde compressor kosten per tijdsinterval

	2050		2040		2030		2020				
JFB	€ 1.741.173.902	FB-JFB	€ 1.614.803.107	B	€ 1.185.691.144	A-B	€ -2.726.672.648				
JFC	€ 1.750.282.534	FC-JFC	€ 1.623.911.739	C-FC	€ 445.619.315	A-C	€ -1.370.648.830				
JFD	€ 1.775.784.607	FD-JFD	€ 1.649.413.812	C-GC	€ 891.361.630	A-D	€ -514.143.962				
JFE	€ 1.762.285.527	FE-JFE	€ 1.635.914.732	D-FD	€ -122.254.285	A-E	€ -286.411.723				
JGC	€ 1.750.282.534	GC-JGC	€ 1.226.417.760	D-GD	€ 357.593.402						
JGD	€ 1.786.426.651	GD-JGD	€ 1.262.561.877	D-HD	€ 557.957.334						
JGE	€ 1.773.244.057	GE-JGE	€ 1.249.379.283	E-FE	€ -516.803.501						
JHD	€ 1.775.784.607	HD-JHD	€ 920.596.585	E-GE	€ -42.132.915						
JHE	€ 1.787.571.304	HE-JHE	€ 951.750.714	E-HE	€ 175.454.976						
JIE	€ 1.762.285.527	IE-JIE	€ 686.591.983	E-IE	€ -160.670.838						
KGC	€ 786.541.212	GC-KGC	€ 746.801.292								
KGD	€ 822.685.330	GD-KGD	€ 782.945.409								
KGE	€ 809.502.735	GE-KGE	€ 769.762.815								
KHD	€ 822.685.330	HD-KHD	€ 475.085.489								
KHE	€ 831.595.147	HE-KHE	€ 497.869.152								
KIE	€ 806.309.370	IE-KIE	€ 232.710.421								
LHD	€ -141.551.491	HD-LHD	€ -105.393.923								
LHE	€ -135.059.727	HE-LHE	€ -98.902.158								
LIE	€ -135.059.727	IE-LIE	€ -338.775.113								
MIE	€ -1.503.547.329	IE-MIE	€ -1.420.032.716								
		MAX		MAX		MAX			Route 2020-2030	Route 2030-2040	Route 2040-2050
		FB	€ 1.614.803.107	B	€ 1.185.691.144	A	€ -286.411.723	E	FB	JFB	
		FC	€ 1.623.911.739	C	€ 891.361.630				GC	JFC	
		FD	€ 1.649.413.812	D	€ 557.957.334				HD	JFD	
		FE	€ 1.635.914.732	E	€ 175.454.976				HE	JFE	
		GC	€ 1.226.417.760							JGC	
		GD	€ 1.262.561.877							JGD	
		GE	€ 1.249.379.283							JGE	
		HD	€ 920.596.585							JHD	
		HE	€ 951.750.714							JHE	
		IE	€ 686.591.983							JIE	

7. **Wat is de invloed van veranderingen binnen de probabilityscores behorende een grotere groei van de hogere scenario's?**

De invulling van probabilityscores berust op logische redentatie in relatie tot de scenario variabelen. Om de gevoeligheid te testen die gemeoid gaat met de beslisboom en deze scores, worden de scores tweemaal veranderd gerelateerd aan en grotere groei van de hogere scenario's en matigere groei van de lagere scenario's, ofwel een snelle ontwikkeling van de demand. In het geval van een negatieve aftrekking, wordt het verschil verdeeld over de hogere scenario's.

- a. De probabilityscores van de scenario's A0 en A1 zijn met 10% verlaagd en de probabilityscores voor de scenario's B1 en C3 zijn met 10% verhoogd.

Tabel 41 geeft de probabilityscores waarbij gerekend wordt met een 10% hogere groei van de hoogste scenario's en een 10% lagere groei van de lagere scenario's.

Tabel 41: Probabilityscores snellere groei waterstofvraag +-10%

Probabilities for demand P(D)					
Demand:	2020-2030	2030-2040	2040-2050	>2050	
500Kt	30%	10%		1%	1%
4761Kt	35%	30%		19%	10%
11716Kt	20%	40%		45%	50%
21050Kt	15%	20%		35%	39%
Total	100%	100%		100%	100%

Tabel 42 geeft de herberekening van de beslisboom met de aangepaste probabilityscores. Het voorkeurspad dat zich vormt is **A-E-HE-KHE**. Dit betekend dat er in 2020 niet opgeschaald wordt, dat er in 2030 opgeschaald wordt naar een capaciteit 4,7Mt en dat er in 2040 opgeschaald wordt naar een capaciteit van 11.716Mt.

Tabel 42: Doorrekening beslisboom met probabilityscores snellere groei waterstofvraag +-10%

2050		2040		2030		2020				
JFB	€ 2.208.959.402	FB-JFB	€ 2.101.001.634	B	€ 1.708.038.006	A-B	€ -2.187.582.113			
JFC	€ 2.218.068.034	FC-JFC	€ 2.110.110.266	C-FC	€ 264.593.211	A-C	€ -1.331.465.306			
JFD	€ 2.243.570.107	FD-JFD	€ 2.135.612.339	C-GC	€ 796.731.067	A-D	€ -975.459.034			
JFE	€ 2.230.071.027	FE-JFE	€ 2.122.113.259	D-FD	€ -827.385.237	A-E	€ -951.959.010			
JGC	€ 2.218.068.034	GC-JGC	€ 657.556.839	D-GD	€ -261.142.009					
JGD	€ 2.254.212.151	GD-JGD	€ 693.700.936	D-HD	€ -129.989.081					
JGE	€ 2.241.029.557	GE-JGE	€ 680.518.362	E-FE	€ -1.543.023.682					
JHD	€ 2.243.570.107	HD-JHD	€ -434.421.609	E-GE	€ -981.957.555					
JHE	€ 2.255.356.804	HE-JHE	€ -403.267.480	E-HE	€ -837.457.813					
JIE	€ 2.230.071.027	IE-JIE	€ -1.150.060.054	E-IE	€ -1.110.002.213					
KGC	€ 866.621.212	GC-KGC	€ 842.892.620							
KGD	€ 902.765.330	GD-KGD	€ 879.036.737							
KGE	€ 889.582.735	GE-KGE	€ 865.854.143							
KHD	€ 902.765.330	HD-KHD	€ -214.980.456							
KHE	€ 911.675.147	HE-KHE	€ -192.196.793							
KIE	€ 886.389.370	IE-KIE	€ -938.989.367							
LHD	€ -369.597.491	HD-LHD	€ -320.630.860							
LHE	€ -363.105.727	HE-LHE	€ -314.139.096							
LIE	€ -363.105.727	IE-LIE	€ -1.035.645.894							
MIE	€ -1.812.692.529	IE-MIE	€ -1.741.346.525							
		MAX		MAX		MAX		Route 2020-2030	Route 2030-2040	Route 2040-2050
		FB	€ 2.101.001.634	B	€ 1.708.038.006	A	€ -951.959.010	E	FB	JFB
		FC	€ 2.110.110.266	C	€ 796.731.067				GC	JFC
		FD	€ 2.135.612.339	D	€ -129.989.081				HD	JFD
		FE	€ 2.122.113.259	E	€ -837.457.813				HE	JFE
		GC	€ 842.892.620							KGC
		GD	€ 879.036.737							KGD
		GE	€ 865.854.143							KGE
		HD	€ -214.980.456							KHD
		HE	€ -192.196.793							KHE
		IE	€ -938.989.367							KIE

- b. De probabilityscores van de scenario's A0 en A1 zijn met 20% verlaagd en de probabilityscores voor de scenario's B1 en C3 zijn met 20% verhoogd.
Tabel 43 geeft de probabilityscores waarbij gerekend wordt met een 20% hogere groei van de hoogste scenario's en een 20% lagere groei van de lagere scenario's.

Tabel 43: Probabilityscores snellere groei waterstofvraag +/-20%

Probabilities for demand P(D)					
Demand:	2020-2030	2030-2040	2040-2050	>2050	
500Kt	20%	1%	1%	1%	1%
4761Kt	25%	19%	1%	1%	1%
11716Kt	30%	50%	53%	49%	49%
21050Kt	25%	30%	45%	49%	49%
Total	100%	100%	100%	100%	100%

Tabel 44 geeft de herberekening van de beslisboom met de aangepaste probabilityscores. Het voorkeurspad dat zich vormt is **A-D-GD-JGD**. Dit betekent dat er in 2020 opgeschaald wordt naar 4.761Mt, dat er in 2030 opgeschaald wordt naar een capaciteit 11.716Mt en dat er in 2040 opgeschaald wordt naar een capaciteit van 21.05Mt.

Tabel 44: Doorrekening beslisboom met probabilityscores snellere groei waterstofvraag +/-20%

2020		2040		2030		2020				
JFB	€ 2.522.778.590	FB-JFB	€ 2.482.443.646	B	€ 2.177.259.076	A-B	€ -1.673.099.099	JFB	FB	B
JFC	€ 2.531.887.222	FC-JFC	€ 2.491.552.278	C-FC	€ 735.814.281	A-C	€ -1.169.776.999	JFC	FC	C
JFD	€ 2.557.389.294	FD-JFD	€ 2.517.054.351	C-GC	€ 966.579.150	A-D	€ -1.100.198.462	JFD	GC	D
JFE	€ 2.543.890.215	FE-JFE	€ 2.503.555.272	D-FD	€ 358.184.188	A-E	€ -1.136.990.509	JFE	FD	E
JGC	€ 2.531.887.222	GC-JGC	€ 1.038.998.852	D-GD	€ -91.293.927			JGC	GD	
JGD	€ 2.568.031.329	GD-JGD	€ 1.075.142.969	D-HD	€ -223.686.158			JGD	HD	
JGE	€ 2.554.848.744	GE-JGE	€ 1.061.960.374	E-FE	€ -1.073.802.613			JGE	FE	
JHD	€ 2.557.389.294	HD-JHD	€ -52.979.597	E-GE	€ -812.109.473			JHD	GE	
JHE	€ 2.569.175.992	HE-JHE	€ -21.825.468	E-HE	€ -927.277.745			JHE	HE	
JIE	€ 2.543.890.215	IE-JIE	€ -768.618.042	E-IE	€ -1.224.417.851			JIE	IE	
KGK	€ 812.817.462	GC-KGC	€ 847.891.326					KGK		
KGD	€ 848.961.580	GD-KGD	€ 884.035.443					KGD		
KGE	€ 835.778.585	GE-KGE	€ 870.852.849					KGE		
KHD	€ 848.961.580	HD-KHD	€ -209.981.750					KHD		
KHE	€ 857.871.397	HE-KHE	€ -187.198.087					KHE		
KIE	€ 832.585.620	IE-KIE	€ -933.990.661					KIE		
LHD	€ -597.643.491	HD-LHD	€ -548.676.860					LHD		
LHE	€ -591.151.727	HE-LHE	€ -542.185.096					LHE		
LIE	€ -591.151.727	IE-LIE	€ -1.263.691.894					LIE		
MIE	€ -2.020.086.079	IE-MIE	€ -1.993.429.942					MIE		
	MAX		MAX		MAX			Route 2020-2030	Route 2030-2040	Route 2040-2050
	FB		€ 2.482.443.646	B	€ 2.177.259.076	A	€ -1.100.198.462	D	FB	JFB
	FC		€ 2.491.552.278	C	€ 966.579.150				GC	JFC
	FD		€ 2.517.054.351	D	€ -91.293.927				GD	JFD
	FE		€ 2.503.555.272	E	€ -812.109.473				GE	JFE
	GC		€ 1.038.998.852							JGC
	GD		€ 1.075.142.969							JGD
	GE		€ 1.061.960.374							JGE
	HD		€ -52.979.597							JHD
	HE		€ -21.825.468							JHE
	IE		€ -768.618.042							JIE

8. Wat is de invloed van veranderingen binnen de probabilityscores behorende een gematigde groei van de hogere scenario's?

De invulling van probabilityscores berust op logische redentatie in relatie tot de scenario variabelen. Om de gevoeligheid te testen die gemeoid gaat met de beslisboom en deze scores, worden de scores tweemaal veranderd gerelateerd aan en gematigdere groei van de hogere scenario's en snellere groei van de lagere scenario's, ofwel een gematigdere ontwikkeling van de demand. In het geval van een negatieve aftrekking, wordt het verschil verdeeld over de hogere scenario's.

- a. De probabilityscores van de scenario's A0 en A1 zijn met 10% verhoogd en de probabilityscores voor de scenario's B1 en C3 zijn met 10% verlaagd. Tabel 45 geeft de probabilityscores waarbij gerekend wordt met een 10% lagere groei van de hoogste scenario's en een 10% hogere groei van de lagere scenario's.

Tabel 45: Probabilityscores gematigdere groei waterstofvraag +-10%

Probabilities for demand P(D)					
Demand:	2020-2030	2030-2040	2040-2050	>2050	
500Kt	50%	30%	15%	11%	
4761Kt	48%	50%	45%	40%	
11716Kt	1%	19%	25%	30%	
21050Kt	1%	1%	15%	19%	
Total	100%	100%	100%	100%	

Tabel 46 geeft de herberekening van de beslisboom met de aangepaste probabilityscores. Het voorkeurspad dat zich vormt is **A-E-HE-LHE**. Dit betekend dat er in 2020 niet opgeschaald wordt, dat er in 2030 opgeschaald wordt naar een capaciteit 4.761Mt en dat er in 2040 niet verder opgeschaald wordt.

Tabel 46: Doorrekening beslisboom met probabilityscores gematigdere groei waterstofvraag +-10%

	2050	2040	2030	2020				
JFB	€ 1.187.633.777	FB-JFB	€ 1.061.264.982	B	€ 642.236.755	A-B	€ -3.162.442.106	
JFC	€ 1.196.744.409	FC-JFC	€ 1.070.373.614	C	€ 801.208.039	A-C	€ -1.639.134.232	
JFD	€ 1.222.246.482	FD-JFD	€ 1.095.875.687	D	€ 505.790.439	A-D	€ -563.150.899	
JFE	€ 1.208.747.402	FE-JFE	€ 1.082.376.607	E	€ -1.893.186.458	A-E	€ -411.792.617	
JGC	€ 1.196.744.409	GC-JGC	€ -382.178.813	D-GD	€ -552.082.637			
JGD	€ 1.232.888.526	GD-JGD	€ -346.035.696	D-HD	€ 314.014.187			
JGE	€ 1.219.705.932	GE-JGE	€ -359.218.290	E-FE	€ -2.608.824.933			
JHD	€ 1.222.246.482	HD-JHD	€ -1.474.158.261	E-GE	€ -1.272.898.183			
JHE	€ 1.234.033.179	HE-JHE	€ -1.441.004.132	E-HE	€ -401.000.846			
JIE	€ 1.208.747.402	IE-JIE	€ -2.189.796.706	E-IE	€ -590.997.136			
KGC	€ 631.893.712	GC-KGC	€ 592.153.792					
KGD	€ 668.037.830	GD-KGD	€ 628.297.909					
KGE	€ 654.835.235	GE-KGE	€ 615.115.315					
KHD	€ 668.037.830	HD-KHD	€ -465.719.284					
KHE	€ 676.547.647	HE-KHE	€ -442.935.621					
KIE	€ 651.661.870	IE-KIE	€ -1.189.728.195					
LHD	€ 26.840.509	HD-LHD	€ 62.998.077					
LHE	€ 33.332.273	HE-LHE	€ 69.489.842					
LIE	€ 33.332.273	IE-LIE	€ -652.016.956					
MIE	€ -1.137.730.629	IE-MIE	€ -1.054.216.216					
	MAX	MAX	MAX		Route 2020-2030	Route 2030-2040	Route 2040-2050	
	FB	€ 1.061.264.982	B	€ 642.236.755	A	E	HE	JFB
	FC	€ 1.070.373.614	C	€ 505.790.439		GC	JFC	
	FD	€ 1.095.875.687	D	€ 314.014.187		HD	JFD	
	FE	€ 1.082.376.607	E	€ -401.000.846		HE	JFE	
	GC	€ 592.153.792					KGC	
	GD	€ 628.297.909					KGD	
	GE	€ 615.115.315					KGE	
	HD	€ 62.998.077					LHD	
	HE	€ 69.489.842					LHE	
	IE	€ -652.016.956					LIE	

- b. De probabilityscores van de scenario's A0 en A1 zijn met 20% verhoogd en de probabilityscores voor de scenario's B1 en C3 zijn met 20% verlaagd.

Tabel 47 geeft de probabilityscores waarbij gerekend wordt met een 20% lagere groei van de hoogste scenario's en een 20% hogere groei van de lagere scenario's.

Tabel 47: Probabilityscores gematigdere groei waterstofvraag +/-20%

Probabilities for demand P(D)					
Demand:	2020-2030	2030-2040	2040-2050	>2050	
500Kt	45%	40%	25%	21%	
4761Kt	53%	58%	55%	50%	
11716Kt	1%	1%	15%	20%	
21050Kt	1%	1%	5%	9%	
Total	100%	100%	100%	100%	

Tabel 48 geeft de herberekening van de beslisboom met de aangepaste probabilityscores. Het voorkeurspad dat zich vormt is **A-E-HE-LHE**. Dit betekent dat er in 2020 niet opgeschaald wordt, dat er in 2030 opgeschaald wordt naar een capaciteit 4.761Mt en dat er in 2040 niet verder opgeschaald wordt.

Tabel 48: Doorrekening beslisboom met probabilityscores gematigdere groei waterstofvraag +/-20%

	2050	2040	2030	2020				
JFB	€ 634.097.652	FB-JFB	€ 507.726.857	B	€ 204.563.283	A-B	€ -3.342.153.325	
JFC	€ 643.206.284	FC-JFC	€ 516.835.489	C	€ -1.238.881.511	A-C	€ -1.725.314.103	
JFD	€ 668.708.357	FD-JFD	€ 542.337.562	D	€ 276.525.492	A-D	€ -482.753.728	
JFE	€ 655.209.277	FE-JFE	€ 528.838.482	E	€ -2.330.859.960	A-E	€ -382.617.535	
JGC	€ 643.206.284	GC-JGC	€ -935.717.938	D-GD	€ -781.347.585			
JGD	€ 679.350.401	GD-JGD	€ -899.573.821	D-HD	€ 453.018.393			
JGE	€ 666.167.807	GE-JGE	€ -912.756.415	E-FE	€ -3.046.498.405			
JHD	€ 668.708.357	HD-JHD	€ -2.027.696.386	E-GE	€ -1.502.163.131			
JHE	€ 680.495.054	HE-JHE	€ -1.998.542.257	E-HE	€ -261.996.641			
JIE	€ 655.209.277	IE-JIE	€ -2.743.334.831	E-IE	€ -993.197.802			
KGC	€ 477.246.212	GC-KGC	€ 437.506.292					
KGD	€ 513.390.330	GD-KGD	€ 473.650.409					
KGE	€ 500.207.735	GE-KGE	€ 460.467.815					
KHD	€ 513.390.330	HD-KHD	€ -620.366.784					
KHE	€ 522.300.147	HE-KHE	€ -597.583.121					
KIE	€ 497.014.370	IE-KIE	€ -1.344.375.695					
LHD	€ 195.232.509	HD-LHD	€ 231.390.077					
LHE	€ 201.724.273	HE-LHE	€ 237.881.842					
LIE	€ 201.724.273	IE-LIE	€ -483.624.956					
MIE	€ -771.914.329	IE-MIE	€ -688.399.716					
		MAX	MAX	MAX				
		FB	€ 507.726.857	B	€ 204.563.283	A	€ -382.617.535	Route 2020-2030
		FC	€ 516.835.489	C	€ 276.525.492			Route 2030-2040
		FD	€ 542.337.562	D	€ 453.018.393			FB
		FE	€ 528.838.482	E	€ -261.996.641			GC
		GC	€ 437.506.292					HD
		GD	€ 473.650.409					HE
		GE	€ 460.467.815					JFE
		HD	€ 231.390.077					KGC
		HE	€ 237.881.842					KGD
		IE	€ -483.624.956					KGE
								LHD
								LHE
								LIE

9. **Wat is de invloed van aanpassingen aan verkoopprijzen per verkochte waterstofeenheid?**

Binnen het onderzoek zijn de verkoopprijzen, in de beslisboom terug te vinden als unit income per demand supplied, vanuit de literatuur overgenomen. Omdat deze prijzen gebaseerd zijn op een project specifieke situatie is het van belang deze te onderwerpen aan een analyse om te bepalen welke invloed andere inkomstenprijzen hebben op het voorkeurspad.

- a. De verkoopprijzen zijn vermenigvuldigd met 2.

Om een eerste grove inschatting te maken van de invloed van de verhoging van de inkomstprijzen worden deze verdubbeld. Tabel 49 geeft de verdubbelde unit income per demand supplied waarmee de beslisboom opnieuw is doorgerekend.

Tabel 49: Verdubbelde Unit income per demand supplied

Scenario	Unit income	Per
Scenario A0	121.280	Demand supplied(Kt)
Scenario C3	132.200	Demand supplied(Kt)
Scenario B2	128.000	Demand supplied(Kt)
Scenario A1	122.400	Demand supplied(Kt)
Discount rate	8,00%	Year

Tabel 50 geeft de doorrekening van de beslisboom met een verdubbelde unit income per demand supplied. Het voorkeurspad dat hieruit komt is **A-D-HD-JHD**. Dit betekend dat er in 2020 opgeschaald wordt naar 4.761Mt, dat er in 2030 niet opgeschaald wordt en dat er in 2040 verder opgeschaald wordt naar 21.05Mt.

Tabel 50: Doorrekening beslisboom met verdubbelde unit income per demand supplied

2050		2040		2030		2020	
JFB	14.201.294,152	FB-JFB	13.948.552,562	B	13.090.328,636	A-B	I-1.351.122,016
JFC	14.210.402,784	FC-JFC	13.957.661,194	C-FC	11.646.883,842	A-C	I-504.484,621
JFD	14.235.904,857	FD-JFD	13.983.163,266	C-GC	12.024.499,231	A-D	I-196.299,401
JFE	14.222.405,777	FE-JFE	13.969.664,187	D-FD	1.554.905,393	A-E	I-488.163,639
JGC	14.210.402,784	GC-JGC	12.505.107,767	D-GD	1.966.626,155		
JGD	14.246.546,901	GD-JGD	12.541.251,894	D-HD	1.993.216,714		
JGE	14.233.364,307	GE-JGE	12.528.069,290	E-FE	I-160.733,052		
JHD	14.235.904,857	HD-JHD	11.413.129,318	E-GE	1.245.810,609		
JHE	14.247.691,554	HE-JHE	11.444.283,448	E-HE	1.289.625,127		
JIE	14.222.405,777	IE-JIE	1.697.490,874	E-IE	I-628.559,064		
KGC	11.978.375,212	GC-KGC	11.898.895,372				
KGD	12.014.519,330	GD-KGD	11.935.039,469				
KGE	12.001.336,735	GE-KGE	11.921.856,895				
KHD	12.014.519,330	HD-KHD	1.841.022,296				
KHE	12.023.429,147	HE-KHE	1.863.805,959				
KIE	11.998.143,370	IE-KIE	1.117.013,385				
LHD	I-142.310,231	HD-LHD	I-69.395,154				
LHE	I-135.818,527	HE-LHE	I-63.503,390				
LIE	I-135.818,527	IE-LIE	I-785.010,187				
ME	I-2.396.365,929	IE-ME	I-2.829.336,704				
	MAX		MAX		MAX		Route 2020-20
	FB		B		A		I-196.299,401
	FC		C				D
	FD		D				FB
	FE		E				GC
	GC						HD
	GD						HE
	GE						JGC
	GD						JGD
	JGE						JGE
	JHD						JHD
	JHE						JHE
	JIE						JIE

- c. De verkoopprijzen zijn vermenigvuldigd met 4.
In een volgende poging om de contante waarde van alle eerste investeringsstappen vanaf node A positief te maken worden de inkomstprijzen verviervoudigd. Tabel 53 geeft de verviervoudigde unit income per demand supplied waarmee de beslisboom opnieuw is doorgerekend.

Tabel 53: Verviervoudigde unit income per demand supplied

Scenario	Unit income	Per
Scenario A0	142.560	Demand supplied(Kt)
Scenario C3	164.400	Demand supplied(Kt)
Scenario B2	156.000	Demand supplied(Kt)
Scenario A1	144.800	Demand supplied(Kt)
Discount rate	8,00%	Year

Tabel 53 geeft de doorrekening van de beslisboom met een verviervoudigde unit income per demand supplied. Het voorkeurspad dat hieruit komt is **A-C-FC-JFC**. Dit betekent dat er in 2020 opgeschaald wordt naar 11.716Mt, dat er in 2030 opgeschaald wordt naar 21.05Mt en dat er in 2040 geen verdere opschaling meer plaatsvindt.

2050		2040		2030		2020	
JFB	19.121534.652	FB-JFB	18.616.051.471	B	16.899.603.621	A-B	11.399.979.246
JFC	19.130.643.284	FC-JFC	18.625.160.103	C-FC	15.456.158.826	A-C	11.767.642.259
JFD	19.156.145.357	FD-JFD	18.650.662.176	C-GC	15.268.167.766	A-D	11.597.579.518
JFE	19.142.646.277	FE-JFE	18.637.163.097	D-FD	14.364.180.378	A-E	1558.395.180
JGC	19.130.643.284	GC-JGC	17.172.606.677	D-GD	14.210.294.689		
JGD	19.166.787.401	GD-JGD	17.208.750.794	D-HD	13.563.414.663		
JGE	19.153.604.807	GE-JGE	17.195.568.199	E-FE	13.648.541.933		
JHD	19.156.145.357	HD-JHD	16.080.628.228	E-GE	13.489.479.143		
JHE	19.167.932.054	HE-JHE	16.111.782.357	E-HE	12.865.823.077		
JIE	19.142.646.277	IE-JIE	15.364.989.763	E-IE	1587.522.993		
KGC	14.362.043.212	GC-KGC	14.203.083.531				
KGD	14.398.187.330	GD-KGD	14.239.227.648				
KGE	14.395.004.735	GE-KGE	14.226.045.054				
KHD	14.398.187.330	HD-KHD	13.145.210.455				
KHE	14.407.097.147	HE-KHE	13.167.394.118				
KIE	14.381.811.370	IE-KIE	12.421.201.544				
LHD	-1-143.827.891	HD-LHD	1802.384				
LHE	-1-137.336.127	HE-LHE	17.294.148				
LIE	-1-137.336.127	IE-LIE	-1-714.212.649				
MIE	-1-5.982.003.129	IE-MIE	-1-5.647.944.679				
	MAX		MAX		MAX		Route 2020-20
	FB		18.616.051.471	B	16.899.603.621	A	11.767.642.259
	FC		18.625.160.103	C	15.456.158.826		Route 2030-204
	FD		18.650.662.176	D	14.364.180.378		Route 2040-2050
	FE		18.637.163.097	E	13.648.541.933		FB
	GC		17.172.606.677				JFB
	GD		17.208.750.794				FC
	GE		17.195.568.199				JFC
	HD		16.080.628.228				FD
	HE		16.111.782.357				JFD
	IE		15.364.989.763				JFE
							JGC
							JGD
							JGE
							JHD
							JHE
							JIE

- d. De optimale vermenigvuldiging van de verkoopprijs wordt bepaald waarbij in de huidige geïnstalleerde capaciteit quitte gedraaid wordt. Omdat een verviervoudiging van de inkomstprijzen een grote winstmarge leveren is het van belang om te weten welke inkomstprijzen minimaal gehanteerd moeten worden om als leiding exploitant quitte te draaien. Hiervoor is door trial and error gezocht naar de meest optimale vermenigvuldiging. Tabel 54 geeft het overzicht van de inkomstprijzen met de vermenigvuldiging die resulteert in een quitte situatie voor alle vier de eerste investeringsstappen die genomen kunnen worden vanaf node A. De optimale vermenigvuldiging is 3,02390301, ofwel 302% van de origineel gebruikte inkomstenprijzen.

Tabel 54: Optimale vermenigvuldiging van de inkomstenprijzen om in alle eerste acties quitte te draaien

Scenario	Unit income	Per	
Scenario A0	€ 32.174	Demand supplied(Kt)	3,02390301
Scenario C3	€ 48.685	Demand supplied(Kt)	302%
Scenario B2	€ 42.335	Demand supplied(Kt)	
Scenario A1	€ 33.868	Demand supplied(Kt)	
Discount rate	8,00%	Year	

Tabel 55 geeft de doorrekening van de beslisboom met een optimaal vermenigvuldigde unit income per demand supplied. Het voorkeurspad dat hieruit komt is **A-D-GD-JGD**. Dit betekent dat er in 2020 opgeschaald wordt naar 4.761Mt, dat er in 2030 opgeschaald wordt naar 11.716Mt en dat er in 2040 verder opgeschaald wordt naar 21.05Mt.

Tabel 55: Doorrekening beslisboom met optimale vermenigvuldiging van de inkomstenprijzen om in alle eerste acties quitte te draaien

	2050		2040		2030		2020			
JFB	€ 6.720.218.681	FB-JFB	€ 6.338.085.653	B	€ 5.040.492.698	A-B	€ 57.308.415			
JFC	€ 6.729.327.313	FC-JFC	€ 6.347.194.285	C	€ 3.597.047.903	A-C	€ 614.155.345			
JFD	€ 6.754.829.386	FD-JFD	€ 6.372.696.358	D	€ 3.685.100.219	A-D	€ 679.577.213			
JFE	€ 6.741.330.306	FE-JFE	€ 6.359.197.278	E	€ 2.505.069.454	A-E	€ 2			
JGC	€ 6.729.327.313	GC-JGC	€ 4.894.640.858	D-GD	€ 2.627.227.143					
JGD	€ 6.765.471.490	GD-JGD	€ 4.930.784.976	D-HD	€ 2.312.105.131					
JGE	€ 6.752.288.836	GE-JGE	€ 4.917.602.381	E-FE	€ 1.789.431.009					
JHD	€ 6.754.829.386	HD-JHD	€ 3.802.662.410	E-GE	€ 1.906.411.597					
JHE	€ 6.766.616.083	HE-JHE	€ 3.833.816.539	E-HE	€ 1.608.513.545					
JIE	€ 6.741.330.306	IE-JIE	€ 3.087.023.965	E-IE	€ -5.984.025					
KGC	€ 3.198.697.633	GC-KGC	€ 3.078.527.968							
KGD	€ 3.234.841.750	GD-KGD	€ 3.114.672.085							
KGE	€ 3.221.659.155	GE-KGE	€ 3.101.489.491							
KHD	€ 3.234.841.750	HD-KHD	€ 2.020.654.892							
KHE	€ 3.243.751.567	HE-KHE	€ 2.043.438.555							
KIE	€ 3.218.465.790	IE-KIE	€ 1.296.645.981							
LHD	€ -143.087.229	HD-LHD	€ -33.750.248							
LHE	€ -136.595.465	HE-LHE	€ -27.258.484							
LIE	€ -136.595.465	IE-LIE	€ -748.765.281							
MIE	€ -4.524.867.387	IE-MIE	€ -4.272.327.299							
		MAX		MAX		MAX		Route 2020-2030	Route 2030-2040	Route 2040-2050
		FB	€ 6.338.085.653	B	€ 5.040.492.698	A	€ 679.577.213	D	FB	JFB
		FC	€ 6.347.194.285	C	€ 3.685.100.219				GC	JFC
		FD	€ 6.372.696.358	D	€ 2.627.227.143				GD	JFD
		FE	€ 6.359.197.278	E	€ 1.906.411.597				GE	JFE
		GC	€ 4.894.640.858							JGC
		GD	€ 4.930.784.976							JGD
		GE	€ 4.917.602.381							JGE
		HD	€ 3.802.662.410							JHD
		HE	€ 3.833.816.539							JHE
		IE	€ 3.087.023.965							JIE

10. Wat is de invloed van fictieve gedeerde inkomsten.

Binnen de beslisboom wordt gewerkt met fictieve gedeerde inkomsten, ofwel benefits foregone. Deze generen een negatieve annual revenue. Dit zijn fictieve waarden. In de praktijk verdiend de exploitant geen negatieve inkomsten, maar zullen ze geen inkomsten genieten. Het kan zijn dat dit dus een vertekend beeld oplevert en een foutief geïnterpreteerd voorkeurspad.

- a. In het geval van gedeerde inkomsten zijn deze naar 0 gesteld. Om de invloed van gedeerde inkomsten volledig uit de beslisboom te verwijderen worden in het geval van negatieve annual revenues deze naar €0 gesteld.

Tabel 56 geeft de originele berekening aan van de annual revenues met gedeerde inkomsten. Tabel 57 geeft dezelfde tabel waarbij de gedeerde inkomsten naar 0 gesteld zijn.

Tabel 56: Originele berekening van annual revenues met gedeerde inkomsten

Probability P(D):	Average annual revenues 2020-2030			
	Capacity installed:			
	500Kt	4761Kt	11716Kt	21050Kt
P(D=500) 40%	12.128.000	12.240.000	12.800.000	13.220.000
P(D=4761) 45%	-18.007.668	123.995.440	129.994.300	134.493.445
P(D=11716) 10%	-11.401.824	-2.457.280	116.402.400	118.862.760
P(D=21050) 5%	-10.666.600	-6.455.680	11.667.400	116.945.250
Total	-37.948.092	117.322.480	150.864.100	173.521.455

Tabel 57: Gewijzigde berekening van annual revenues met naar 0 gestelde gedeerde inkomsten

Probability P(D):	Average annual revenues 2020-2030			
	Capacity installed:			
	500Kt	4761Kt	11716Kt	21050Kt
P(D=500) 40%	€ 2.128.000	€ 2.240.000	€ 2.800.000	€ 3.220.000
P(D=4761) 45%	€ 0	€ 23.995.440	€ 29.994.300	€ 34.493.445
P(D=11716) 10%	€ 0	€ 0	€ 16.402.400	€ 18.862.760
P(D=21050) 5%	€ 0	€ 0	€ 1.667.400	€ 16.945.250
Total	€ 2.128.000	€ 26.235.440	€ 50.864.100	€ 73.521.455

Tabel 58 geeft de doorrekening van de beslisboom waarbij fictieve gedeerde inkomsten naar 0 gesteld zijn. Het voorkeurspad dat hieruit komt is **A-E-IE-MIE**. Dit betekent dat er in 2020 niet opgeschaald wordt maar bij een capaciteit van 0.5Mt blijft. Tot en met 2050 worden er geen opschalingen uitgevoerd.

Tabel 58: Doorrekening van beslisboom met gewijzigde berekening van annual revenues met naar 0 gestelde gedeerde inkomsten

	2050		2040		2030		2020	
IFB	€ 1.741.179.903	FB-IFB	€ 1.634.808.107	B	€ 1.185.691.144	A-B	€ -2.726.673.648	
IFC	€ 1.750.282.534	FC-IFC	€ 1.623.911.739	C	€ 257.759.650	A-C	€ -1.473.519.884	
IFD	€ 1.775.784.607	FD-IFD	€ 1.649.413.812	D	€ 669.206.405	A-D	€ -541.350.947	
IFE	€ 1.762.285.527	FE-IFE	€ 1.635.914.732	E	€ -1.340.732.090	A-E	€ -99.980.953	
JGC	€ 1.750.282.534	GC-JGC	€ 171.358.312	D-GD	€ -888.666.671			
JGD	€ 1.786.426.651	GD-JGD	€ 207.502.429	D-HD	€ 370.101.343			
JGE	€ 1.773.244.057	GE-JGE	€ 394.319.835	E-IE	€ -2.065.370.544			
JHD	€ 1.775.784.607	HD-JHD	€ -920.420.136	F-IE	€ -1.109.482.217			
JHE	€ 1.787.371.304	HE-JHE	€ -489.166.007	E-IE	€ -344.913.690			
JIE	€ 1.762.285.527	IE-JIE	€ -1.836.358.581	E-IE	€ -2.619.782			
KGC	€ 796.541.212	GC-KGC	€ 746.801.292					
KGD	€ 822.685.330	GD-KGD	€ 782.945.409					
KGE	€ 809.502.735	GE-KGE	€ 769.762.815					
KHD	€ 822.685.330	HD-KHD	€ -311.071.764					
KHE	€ 831.595.147	HE-KHE	€ -288.288.121					
KIE	€ 806.309.370	IE-KIE	€ -1.035.080.695					
LHD	€ 326.485.309	HD-LHD	€ 327.988.367					
LIE	€ 332.977.073	IE-LIE	€ 334.480.131					
LIF	€ 332.977.073	IE-LIF	€ -387.026.667					
MIE	€ -10.063.729	IE-MIE	€ -8.635.623					
		MAX		MAX		MAX		
		FB	€ 1.634.803.107	B	€ 1.185.691.144	A	€ -99.980.952	Route 2020-2030
		FC	€ 1.623.911.739	C	€ 669.206.405			Route 2030-2040
		FD	€ 1.649.413.812	D	€ 370.101.343			Route 2040-2050
		FE	€ 1.635.914.732	E	€ -2.619.782			FB
		GC	€ 746.801.292					GC
		GD	€ 782.945.409					HD
		GE	€ 769.762.815					IE
		HD	€ 327.988.367					IFE
		HE	€ 334.480.131					KGC
		IE	€ -8.635.623					KGD
								KGE
								LHD
								LIE
								MIE

- b. In het geval van gedeerde inkomsten zijn deze naar de inkomsten van de minimale capaciteit gesteld die geleverd kan zijn.

Tabel 59 geeft de originele berekening aan van de annual revenues met gedeerde inkomsten. Tabel 60 geeft dezelfde tabel waarbij de inkomsten naar de geïnstalleerde capaciteit zijn gesteld zonder gedeerde inkomsten.

Tabel 59: Originele berekening van annual revenues met gedeerde inkomsten

Probability P(D):	Average annual revenues 2020-2030			
	Capacity installed:			
	500Kt	4761Kt	11716Kt	21050Kt
P(D=500) 40%	12.128.000	12.240.000	12.800.000	13.220.000
P(D=4761) 45%	-18.007.668	123.995.440	129.994.300	134.493.445
P(D=11716) 10%	-11.401.824	-2.457.280	116.402.400	118.862.760
P(D=21050) 5%	-10.666.600	-6.455.680	11.667.400	116.945.250
Total	-137.948.092	117.322.480	150.864.100	173.521.455

Tabel 60: Gewijzigde berekening van annual revenues met inkomsten uit geïnstalleerde capaciteit zonder gedeerde inkomsten.

Probability P(D):	Average annual revenues 2020-2030			
	Capacity installed:			
	500Kt	4761Kt	11716Kt	21050Kt
P(D=500) 40%	12.128.000	12.240.000	12.800.000	13.220.000
P(D=4761) 45%	12.394.000	123.995.440	129.994.300	134.493.445
P(D=11716) 10%	1532.000	15.332.320	116.402.400	118.862.760
P(D=21050) 5%	1266.000	12.666.160	11.667.400	116.945.250
Total	15.320.000	134.233.920	150.864.100	173.521.455

Tabel 61 geeft de doorrekening van de beslisboom waarbij annual revenues gesteld zijn op de geïnstalleerde capaciteit zonder gedeerde inkomsten. Het voorkeurspad dat hieruit komt is **A-E-IE-MIE**. Dit betekent dat er in 2020 niet opgeschaald wordt maar bij een capaciteit van 0.5Mt blijft. Tot en met 2050 worden er geen opschalingen uitgevoerd.

Tabel 61: Doorrekening van beslisboom met gewijzigde berekening van annual revenues naar geïnstalleerde capaciteit gestelde inkomsten, zonder gedeerde inkomsten

2050	2040	2030	2020							
JFB	11.741.173.302	FB-JFB	11.614.803.107	B	11.185.691.144	A-B	-2.726.672.648	JFB	FB	B
JFC	11.750.282.534	FC-JFC	11.623.311.739	C-FC	-257.753.650	A-C	-1.473.549.694	JFC	FC	C
JFD	11.775.784.807	FD-JFD	11.649.413.812	C-GC	1.663.206.405	A-D	1.432.708.493	JFD	GC	D
JFE	11.762.285.527	FE-JFE	11.635.914.732	D-FD	-1.343.732.099	A-E	-515.16.016	JFE	FD	E
JGC	11.750.282.534	GC-JGC	11.711.358.312	D-GD	-388.666.671			JGC	GD	
JGD	11.786.426.651	GD-JGD	12.07.502.429	D-HD	1488.786.090			JGD	HD	
JGE	11.773.244.057	GE-JGE	11.94.319.835	E-FE	-2.085.370.544			JGE	FE	
JHD	11.775.784.607	HD-JHD	-320.620.136	E-GE	-1.109.482.217			JHD	GE	
JHE	11.787.571.304	HE-JHE	-889.466.007	E-HE	-226.228.944			JHE	HE	
JIE	11.762.285.527	IE-JIE	-1.636.258.581	E-IE	155.771.271			JIE	IE	
KGC	1.786.541.212	GC-KGC	1.746.801.292					KGC		
KGD	1.822.685.330	GD-KGD	1.782.945.409					KGD		
KGE	1.809.502.735	GE-KGE	1.763.762.815					KGE		
KHD	1.822.685.330	HD-KHD	-311.071.784					KHD		
KHE	1.831.595.147	HE-KHE	-288.288.121					KHE		
KIE	1.806.309.370	IE-KIE	-1.035.080.695					KIE		
LHD	1.519.781.309	HD-LHD	1.506.972.846					LHD		
LHE	1.526.273.673	HE-LHE	1.513.464.610					LHE		
LIE	1.526.273.673	E-LIE	-208.042.187					LIE		
MIE	155.771.271	E-MIE	155.771.271					MIE		
		MAX		MAX		MAX		Route 2020-2030	Route 2030-204	Route 2040-2050
		FB	11.614.803.107	B	11.185.691.144	A	-515.16.016	E	FB	JFB
		FC	11.623.311.739	C	1.663.206.405				GC	JFC
		FD	11.649.413.812	D	1.488.786.090				HD	JFD
		FE	11.635.914.732	E	155.771.271				IE	JFE
		GC	1.746.801.292							KGC
		GD	1.782.945.409							KGD
		GE	1.763.762.815							KGE
		HD	1.506.972.846							LHD
		HE	1.513.464.610							LHE
		IE	155.771.271							MIE

Bijlage 11 Schematische weergave alternatieven

