

Bachelorscriptie:

Meetmethode voor een integrale duurzaamheid in de bouw van energieverdeelstations



Arman Alinaghi (S2622335) | BSc Civil Engineering | 24 juni 2024

**UNIVERSITY
OF TWENTE.**



Strukton
Civiel

Colofon

Titel	Meetmethode voor een integrale duurzaamheid in de bouw van energieverdeelstations
Universiteit	Universiteit Twente
Studie	BSc Civil Engineering
Rapport	Bachelorscriptie
Bedrijf	Strukton Civiel
Begeleiders	Tom Coenen (Universiteit Twente) Gijs Bastiaanse (Strukton Civiel) Harry Hofman (Strukton Civiel) Bert Lankheet (Strukton Civiel)
Student	Arman Alinaghi
Student No.	S2622335
Email	A.Alinaghi@student.utwente.nl
Coverfoto	Alliander. (2023). <i>Alliander Gunt Bouw 182 grote elektriciteitsstations aan vier aannemers</i> . Alliander. Opgehaald op 17 juni 2024 van: https://www.alliander.com/nl/nieuws/alliander-gunt-bouw-182-grote-elektriciteitsstations-aan-vier-aannemers/

Voorwoord

Hierbij presenteer ik de uitkomsten van mijn bachelor eindopdracht voor Civil Engineering aan de Universiteit Twente. Dit onderzoek was gebaseerd op Strukton Civiel en ging over de verhoging van duurzaamheid in de bouw van energieverdeelstations, als een deel van een opdracht met Alliander. Hier was van groot belang om een juist begrip van duurzaamheid te worden vastgesteld. Ik heb tijdens de bachelorstudie Civil Engineering geleerd dat een volledige duurzaamheid, de drie pijlers van milieu-, economische en sociale duurzaamheid omvat. Deze drie aspecten werden daarvoor in dit onderzoek gehanteerd. Dit onderzoek was een leuke ervaring voor mij om zowel mijn theoretische als praktische kennis rond het thema duurzaamheid verder te ontwikkelen. Hiervoor ben ik ontzettend dankbaar aan Tom Coenen, mijn begeleider uit de Universiteit Twente, van wie ik veel heb kunnen leren. Ten slotte wil ik mijn begeleiders uit Strukton Civiel bedanken, die mij veel hielpen met alles wat ik nodig had tijdens mijn stage, wat voor mij een heel prettige werkervaring meebracht.

Samenvatting

Door de gestelde duurzaamheidsdoelstellingen zoals het Paris Agreement, heeft Nederland behoefte aan de transitie naar groene energie. Niettemin bestaat er een beperkende factor, namelijk de onvoldoende capaciteit van het stroomnet in het land. Om dit op te kunnen lossen, is er een verdubbeling van het huidige stroomnet nodig. Maar met de huidige werkwijzen, is dit niet op een duurzame manier haalbaar. Hiervoor zijn innovatieve duurzame oplossingen nodig. Deze oplossingen noemen we hierbij duurzaamheidsmaatregelen, die tot uitstoot- en kostenvermindering, en een hogere sociale acceptatie leiden. De besluitvorming over de duurzaamheidsmaatregelen, beschouwt dus de drie pijlers van milieu-, economische en sociale duurzaamheid. Dit is in dit rapport een integrale duurzaamheid genoemd, dat een vrij volledig begrip is van duurzaamheid.

Dit onderzoek is een deel in de verhoging van de integrale duurzaamheid in de bouw van energieverdeelstations, waarbij werken Strukton als opdrachtnemer en Alliander als opdrachtgever. Deze bachelor eindopdracht was gebaseerd op Strukton. Het eindontwerp van dit onderzoek is een *Decision Support System (DSS)*, die de besluitvormers ondersteunt bij de selectie van de maatregelen die de meeste impact hebben bij de bouw van de stations. Om de integrale duurzaamheid met succes aan te kunnen pakken, wordt in dit rapport een hoofdvraag beantwoord. Dit wordt mogelijk door onderzoek te voeren naar een paar deelvragen. Deze (deel)vragen zijn in het onderstaande te zien:

Vraag: Hoe zorgt een DSS voor de integrale afweging van diverse duurzaamheidsmaatregelen, met betrekking tot milieu-, economische en sociale duurzaamheid, in de bouw van energieverdeelstations?

Deelvraag 1: Welke milieu-, economische en sociale duurzaamheidsindicatoren zijn de meest relevant in de constructie van energieverdeelstations?

Deelvraag 2: Hoe kunnen verschillende technieken worden toegepast voor de beoordelingen binnen de vastgestelde indicatoren?

Deelvraag 3: Hoe kan de integrale impact van de verschillende maatregelen worden berekend, met de toepassing van de gevonden technieken op de diverse duurzaamheidsindicatoren?

Deelvraag 4: Hoe kan de DSS van dit project eruitzien en eenvoudig worden gebruikt?

Deze (deel)vragen zijn in dit rapport door een uitgebreid onderzoek naar de relevante begrippen beantwoord. Hierbij zijn de duurzaamheidsindicatoren van groot belang, omdat de resultaten zwaar afhankelijk zijn van de opgenomen indicatoren. De hoofdmethode in de berekening van een integrale impact is *Analytic Hierarchy Process (AHP)* die vaak is toegepast voor de vergelijkingen met meerdere indicatoren. Daarnaast zijn er zorgen gemaakt dat het eindontwerp zo eenvoudig mogelijk wordt gemaakt om het gebruik daarvan gemakkelijker te maken. Dit is gedaan door toepassing van een *Design Science Research Methodology (DSRM)*. Hierbij werden de relevante ontwerpeisen geïdentificeerd. Vervolgens ging het ontwerp onder meerdere ontwerpcyclussen totdat die aan de gestelde ontwerpeisen kon voldoen. Tijdens de doorlooptijd van deze afstudeerstage werden er eveneens gesprekken gevoerd met de experts uit het stagebedrijf. Dit was vrij nuttig bij de realisatie van wat van dit onderzoek was verwacht.

Summary

Due to the set sustainability goals such as the Paris Agreement, the Netherlands needs the transition to green energy. Nevertheless, there is a limiting factor, namely the insufficient capacity of the country's power grid. To solve this, a doubling of the currently-used power grid is required. But with current work methods, this is not feasible in a sustainable way. This requires innovative sustainable solutions. Here, we call these solutions sustainability measures, which lead to emissions reductions, cost reductions and a higher social acceptance. The decision-making about the sustainability measures, considers thus the three pillars of environmental, economic and social sustainability. This is in this report called integral sustainability, which is a fairly complete definition of sustainability.

This research is part of increasing the integral sustainability in the construction of energy distribution stations, where Strukton acts as the contractor and Alliander as the client. This bachelor final assignment was based in Strukton. The final design of this research is a *Decision Support System (DSS)*, which supports the decision makers in the selection of the measures that have the most impact in the construction of the stations. In order to successfully tackle the integral sustainability, this report answers a main question. This will be possible by conducting research into a few sub-questions. These (sub)questions can be seen below:

Main question: How does a DSS ensure the integral assessment of various sustainability measures, with regard to environmental, economic and social sustainability, in the construction of energy distribution stations?

Sub-question 1: Which environmental, economic and social sustainability indicators are the most relevant in the construction of energy distribution stations?

Sub-question 2: How can different techniques be applied for the assessments within the established indicators?

Sub-question 3: How can the integral impact of the various measures be calculated, with the application of the techniques found for the various sustainability indicators?

Sub-question 4: How can the DSS of this project look like and be easily used?

These (sub)questions have been answered in this report through extensive research into the relevant concepts. The sustainability indicators are of great importance here, because the results are heavily dependent on which indicators are included. The main method in calculating an integral impact is *Analytic Hierarchy Process (AHP)*, which is often applied for comparisons with multiple indicators. In addition, it has been ensured that the final design would be made as simple as possible to make it easier to use. This was done by applying a *Design Science Research Methodology (DSRM)*. The relevant design requirements were identified. The design then went through multiple design cycles until it could meet the set design requirements. During the duration of this graduation internship, discussions were also held with experts from the internship company. This was quite helpful in achieving what was expected from this research.

Inhoudsopgave

Voorwoord	2
Samenvatting	3
Summary	4
Figuren- en Tabellenlijsten	6
Afkortingen- en Begrippenlijsten	7
1. Introductie	8
2. Probleem, doelstelling en vragen	9
3. Onderzoeksaanpak	12
3.1 Onderzoeksscope	12
3.2 Casusorganisatie	12
3.3 Onderzoeksmethodologie	13
4. Theoretische inhoud van de DSS	18
4.1 Integrale duurzaamheid	18
4.2 Duurzaamheidsindicatoren	20
4.2.1 Milieu-indicatoren	21
4.2.2 Economische indicatoren	22
4.2.3 Sociale indicatoren	22
4.2.4 Technische indicatoren	23
4.3 Beoordelingstechnieken	24
4.3.1 Kwantitatieve duurzaamheidsberekening	25
4.3.2 Kwantitatieve kostenberekening	26
4.3.3 Losmaakbaarheidsberekening	27
4.3.4 Kwalitatieve beoordelingsaanpak	28
4.4 Integrale beoordeling van de maatregelen	30
4.5 Vormgeving van de DSS	30
5. Structuur en interface van de DSS	31
5.1 Activity 3: Ontwerp en ontwikkeling	31
5.1.1 Ontwerp van de DSS	31
5.1.2 Gewichtsbepaling voor de indicatoren	33
5.1.3 Integrale scores van de maatregelen	34
5.2 Activity 4&5: Demonstratie & Evaluatie	35
5.2.1 Verificatie van de DSS	35
5.2.2 Validatie van de DSS	36
5.2.3 Evaluatie-checklist van de DSS	39
5.3 Activity 6: Communicatie	40
Discussie	42
Conclusie	44
Bibliografie	45
Bijlage A: Toepassing van AHP	52
Bijlage B: Gewichtsbepalings-versies van de DSS	62

Figuren- en Tabellenlijsten

Figuren

Figuur 1: Stroomschema van de van de onderzoeksvragen	11
Figuur 2: DSMR Process Model. Figuur uit Peffers et al. (2007)	14
Figuur 3: De ontwerpcyclus van de DSS	16
Figuur 4: Stroomschema van de dataverzameling tijdens dit thesis	18
Figuur 5: Het concept van de DSS van dit onderzoek.	20
Figuur 6: De levenscyclusfasen van een asset in de LCA-berekening. Figuur uit Pianoo (2020).	25
Figuur 7: Voorbeeld omkering LCA naar MKI voor 1m ³ betonmortel. Figuur uit Pianoo (2020).	26
Figuur 8: Stappenplan bepalingsmethodiek losmaakbaarheid. Alba Concepts (2019).	28
Figuur 9: Het verband tussen duurzaamheidsaspecten, doelen, indicatoren, criteria en technieken.	29
Figuur 10: Overzicht van de interface van de DSS van dit onderzoek.	32
Figuur 11: De prestatie-kaartjes van de maatregelen. (Fictieve waarden)	35
Figuur A.1: De fundamentele schaal. Figuur uit Saaty (1994).	52
Figuur A.2: De verdelingswaarden van de indicators door elkaar.	54
Figuur A.3: De AHP-waarden van de indicatoren in de DSS.	55
Figuur A.4: Normalisering van de AHP-waarden.	55
Figuur A.5: Gewogen sommen.	57
Figuur A.6: Gewogen sommen verdeeld door gewichten.	58
Figuur A.7: Berekening van de Consistency Ratio (CR). Waarde = 0,0078.	58
Figuur A.8: Random index-waarden in een matrix. Figuur uit Saaty (1980).	58
Figuur A.9: Normalisering van de Cost Indicatoren.	59
Figuur A.10: Normalisering van de Benefit Indicatoren.	60
Figuur A.11: Relatieve score van de maatregelen. Waarde van MR1 = 0,21571.	61
Figuur B.1: Gewichtsbepaling Versie 1.	62
Figuur B.2: Consistentie-check van de gewichten in Versie 1.	62
Figuur B.3: Gewichtsbepaling en consistentie-check van de gewichten in Versie 2.	63
Figuur B.4: Gewichtsbepaling Versie 3.	64

Tabellen

Tabel 1: Databronnen tijdens de ontwikkelingsfase	16
Tabel 2: De beoordelingsindicatoren van de DSS. Alam Bhuiyan & Hammad (2023); Alavi et al. (2021); Alwafi (2022); Bansal et al. (2017); Dyson et al. (2023); Hatefi et al. (2021).	24
Tabel 3: Componenten van een LCC. Gluch & Baumann (2004); Martinez-Sanchez et al. (2015); Rebitzer & Hunkeler (2003); Schade (2007).	27
Tabel 4: Expert-gewichten voor de duurzaamheidsindicatoren van de DSS.	33
Tabel 5: Input uit de drie onderzochte duurzaamheidsmaatregelen.	38
Tabel 6: Evaluatie-checklist voor de versies van de DSS.	39
Tabel A.1: Expert-scores aan de duurzaamheidsindicatoren van de DSS.	53
Tabel A.2: Belangrijke bereiken tussen twee bepaalde indicatoren.	54
Tabel A.3: De gewichten van de duurzaamheidsindicatoren in deze DSS.	55

Afkortingen- en Begrippenlijsten

Afkortingen

Afkorting	Betekenis
AHP	Analytic Hierarchy Process
DSR	Design Science Research
DSRM	Design Science Research Methodology
DSS	Decision Support System
LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Life Cycle Costing
MCDM	Multi-Criteria Decision-Making
NPV	Net Present Value
SDGs	Sustainable Development Goals

Begrippenlijsten

Begrip	Omschrijving
Beoordelingstechniek of -methode	Een methode waarmee de prestatie van een maatregel binnen een indicator wordt gekwantificeerd.
Duurzaamheid	De integratie van milieu-, economische en sociale duurzaamheid, oftewel de drie pijlers van duurzaamheid (Purvis et al., 2018).
Duurzaamheidsmaatregel	Maatregelen die worden toegepast voor verduurzamen van projecten.
Energieverdeelsstation	Elektrotechnische installaties waarin de opgewekte energie wordt verwerkt en daarna verdeeld tussen diverse soorten van gebruikers.
Duurzaamheidsindicator	De parameters waarmee de beoordeling van een duurzaamheidsmaatregel wordt uitgevoerd. In dit project zijn dit bijv. kosten, CO ₂ -besparing, enz.
Project Reddyn	Dit is namelijk het project waarvoor in dit rapport een DSS wordt ontwikkeld. Strukton bouwt in dit project 49 energieverdeelsstations voor Alliander in de regio Amsterdam-Gooi.

1. Introductie

Met een veranderende energiemix en de groeiende populatie in Nederland, neemt de behoefte aan elektriciteit toe. Tegelijkertijd zijn er beperkingen aan hoe in meer energie kan worden voorzien. De gestelde duurzaamheidsdoelen en capaciteitsproblemen van het huidige stroomnet in Nederland vormen de belangrijkste uitdagingen (RVO, 2023). Het klimaatakkoord verplicht Nederland in 2050 CO₂-neutraal te zijn, en dit vereist de geleidelijke uitfasering van fossiele brandstoffen, wat de afhankelijkheid van de elektriciteit vergroot. Om de klimaatdoelstellingen voor 2030 te halen, is een capaciteitsverdubbeling van het huidige stroomnetwerk nodig (RVO, 2023). Helaas zou dit met de huidige werkwijzen leiden tot een verviervoudiging van het jaarlijkse werk, wat voor de energie- en bouwbedrijven met de huidige werkwijzen niet haalbaar is (volgens de energie- en bouwbedrijven). Om deze duurzaamheidsdoelen te bereiken, zijn er (innovatieve) duurzame maatregelen nodig (RVO, 2023). Een voorbeeld van een maatregel is het gebruik van een alternatief materiaal om tot uitstootvermindering te komen.

Maar wat maakt een duurzaamheidsmaatregel duurzamer dan een andere? Dit is een cruciale vraag voor veel organisaties, die wordt versterkt doordat er diverse begrippen van duurzaamheid bestaan. In dit rapport gaan we door middel van een centrale definitie op zoek naar een integrale beoordeling van duurzaamheid. We beschouwen daarbij duurzaamheid van drie dimensies: milieu, economisch en sociaal. Door duurzaamheid als een integraal concept aan te vliegen, kunnen organisaties maatregelen afwegen die de meeste impact hebben tegen de laagste kosten. In dit onderzoeksrapport gaan we specifiek in op de bouw van energieverdeelstations. In samenwerking met organisaties uit de praktijk, zoeken we naar een aanpak om tot een integrale aanpak van duurzaamheidsbeoordeling van energieverdeelstations te komen.

Het rapport is als volgt gestructureerd. *Hoofdstuk 2* behandelt het onderzoeksprobleem, -doel en vragen. In *Hoofdstuk 3* worden de methodologie en betrokken partijen van dit onderzoek besproken. *Hoofdstuk 4* behandelt de theoretische inhoud van het ontwerp, met literatuuronderzoek naar de relevante begrippen en gesprekken met de experts uit het stagebedrijf. In *Hoofdstuk 5* is de structuur van het ontwerp bediscussieerd en het proces waarmee het ontwerp een definitieve versie bereikt. Ten slotte worden discussies en conclusies van dit onderzoek beschreven aan het einde van het rapport.

2. Probleem, doelstelling en vragen

Duurzaamheid wordt vaak beschouwd als een beperkende factor die hogere initiële kosten vereist om minder schade aan de aarde te brengen (Wang, 2023). Tegenwoordig wordt echter erkend dat duurzaamheidsmaatregelen voordelen kunnen opleveren, mits de juiste maatregelen worden gekozen (Wang, 2023). Bovendien zijn er vanuit beleid diverse doelstellingen op het gebied van duurzaamheid die moeten worden bereikt (RVO, 2023). Een voorbeeld van een duurzaamheidsdoelstelling is het *Paris Agreement*, waarin alle landen verplicht zijn om tegen 2050 uitstootvrij te zijn (United Nations, 2023). Elke organisatie heeft dus verantwoordelijkheid om daaraan bij te dragen. Van de diverse voordelen die duurzaamheid biedt, kunnen de volgende worden genoemd: bijdrage aan het reduceren van klimaatimpact, financiële voordelen, nieuwe innovaties, verbeterde kwaliteit en hogere sociale acceptatie voor een bedrijf. Dit zijn slechts enkele voordelen die kunnen worden gerealiseerd met een weloverwogen beslissing over duurzaamheid.

In dit rapport wordt de selectie van maatregelen in het besluitvormingsproces over duurzaamheid onderzocht. Dit proces bevat het opstellen van de maatregelen, het vergelijken van de maatregelen, en het kiezen van de meest impactvolle maatregelen. De beslissing over duurzaamheid kan worden genomen door een individu (bijv. een hoofdinvesteerder) of een groep van experts (Chai et al., 2013). Als er meerdere besluitvormers bestaan, is het dus van belang om voor de overeenstemming in het eindbesluit te zorgen. De focus van dit onderzoek ligt op de vergelijking van de maatregelen en het kiezen van de beste daarvan, waar meerdere besluitvormers bij betrokken zijn.

Het besluit over duurzaamheid is niet altijd eenvoudig voor de managers en coördinatoren. Binnen bepaalde projecten zoals deze, zijn de meest relevante factoren op het gebied van duurzaamheid, en de bijbehorende indicatoren niet bekend. De onbekendheid van de relevante duurzaamheidsindicatoren vormt een uitdaging, omdat deze indicatoren cruciaal zijn voor de vergelijking van de verschillende maatregelen. Met andere woorden, het is niet altijd duidelijk wat een maatregel nu precies voordeliger maakt dan een andere. Een veelheid aan opvattingen en dimensies van duurzaamheid draagt hieraan bij. In sommige projecten wordt duurzaamheid uitsluitend beschouwd als het verminderen van CO₂-uitstoot (Karakhan et al., 2020), terwijl andere ook economische en sociale aspecten meenemen.

In dit onderzoek beschouwen we duurzaamheid vanuit een integraal perspectief. Purvis et al. (2018) definiëren duurzaamheid als een begrip met drie pijlers: milieu, economisch en sociaal, oftewel de drie P's: *People, Planet en Profit*. Hoewel er geen vast kader bestaat dat deze drie pijlers rechtvaardigt, worden ze in het algemeen geaccepteerd als de drie essentiële componenten van duurzaamheid. De integratie van deze drie factoren als even belangrijk werd voor het eerst overwogen in de jaren '80 en wordt geleidelijk meer omarmd in verschillende onderzoeken en projecten (Purvis et al., 2018). Een bekend voorbeeld aanpak over duurzaamheid is de *17 Sustainable Development Goals (SDGs)*, die in 2012 door de Verenigde Naties zijn opgesteld. Deze aanpak gebruikt dezelfde integratie van de drie pijlers om specifieke doelen te stellen. De integratie van deze drie pijlers wordt dus beschouwd als de oplossing die tot een integrale duurzaamheid leidt (Purvis et al., 2018). Niettemin wordt deze integratie vaak onvoldoende toegepast.

Het is echter nog niet bekend hoe deze integratie in de bouw van energievredeelstations moet worden aangepakt. Dit komt doordat er weinig ervaring is geweest met zo'n project. Er is veel ervaring geweest met milieu- en economische duurzaamheid. Maar sociale duurzaamheid is een relatief nieuw begrip voor de partijen in de Nederlandse bouw- en energiesectoren. In dit onderzoek streven de

betrokken partijen naar kostenverlaging, vermindering van de totale uitstoot en een verhoogde maatschappelijke meerwaarde. Dit is precies de integratie die in dit onderzoek wordt bestudeerd.

In deze thesis wordt onderzocht hoe de integrale duurzaamheid in de bouw van energieverdeelstations bepaald kan worden. Dit onderzoeksdoel komt door het gebrek aan een passende aanpak voor een integrale duurzaamheid in de bouw van energieverdeelstations. De definitie van deze onderzoeksdoelstelling is als volgt:

De ontwikkeling van een Decision Support System (DSS) dat ontwerpers van energieverdeelstation ondersteunt bij een integrale afweging rondom duurzaamheidsmaatregelen.

Het doel van dit onderzoek zal worden bereikt door het beantwoorden van een hoofdvraag, namelijk:

Hoofdvraag: *Hoe zorgt een DSS voor de integrale afweging van diverse duurzaamheidsmaatregelen, met betrekking tot milieu-, economische en sociale duurzaamheid, in de constructie van energieverdeelstations?*

Om de hoofdvraag te kunnen beantwoorden, zijn de onderstaande deelvragen opgesteld:

De eerste deelvraag gaat over het vinden van de duurzaamheidsindicatoren, die in dit bouwproject van belang zijn. Dit wordt gerealiseerd door gesprekken met het stagebedrijf en verder literatuuronderzoek naar de relevante indicatoren.

Deelvraag 1: *Welke milieu-, economische en sociale duurzaamheidsindicatoren zijn de meest relevant in de bouw van energieverdeelstations?*

Om te bepalen hoe een maatregel binnen een bepaalde indicator presteert, zijn beoordelingstechnieken van groot belang. Deze technieken zullen bijv. helpen met kwantificering van de totale kosten van de maatregelen. De selectie uit de beschikbare technieken kan dus nogal invloedrijk zijn in het eindresultaat, namelijk de integrale impact van een maatregel. Deze technieken worden gevonden door literatuuronderzoek. De volgende deelvraag onderzoekt welke beoordelingstechnieken kunnen worden toegepast om de prestatie van de maatregelen in een bepaalde indicator te bepalen.

Deelvraag 2: *Hoe kunnen verschillende technieken worden toegepast voor de beoordelingen binnen de vastgestelde indicatoren?*

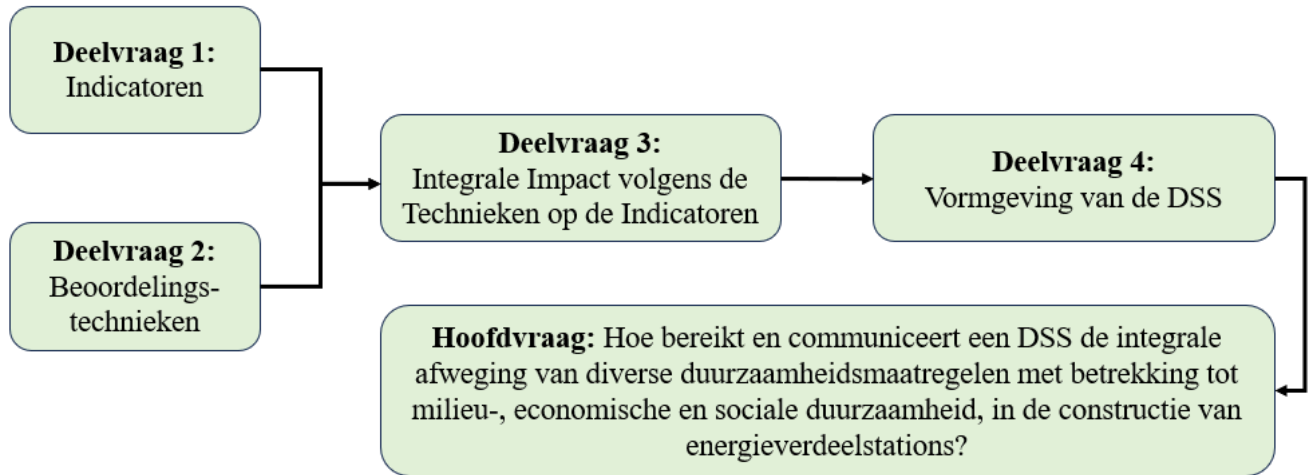
Daarna geven de gevonden technieken inzicht over de impact van de duurzaamheidsmaatregelen. In dit onderzoek zijn we op zoek naar de integrale impact van deze maatregelen. Daarom worden de maatregelen beoordeeld op hun totale prestatie binnen alle drie pijlers van duurzaamheid. *Deelvraag 3* gaat over de verwerking van alle scores uit de diverse indicatoren, tot één integrale score. Deze score zal de beslissende score van een maatregel zijn, die de vergelijking van de verschillende maatregelen mogelijk maakt. Vervolgens wordt dit eindresultaat geoptimaliseerd (bediscussieerd in *Hoofdstuk 2*).

Deelvraag 3: *Hoe kan de integrale impact van de verschillende maatregelen worden berekend, met de toepassing van de gevonden technieken op de diverse duurzaamheidsindicatoren?*

Uiteindelijk is het essentieel om te zorgen dat de DSS passend wordt ontworpen voor de bovengenoemde doelen van dit onderzoek. Daarom wordt het onderzocht hoe zo'n DSS eruit moet zien, waarbij gebruiksvriendelijkheid een belangrijke rol speelt.

Deelvraag 4: Hoe kan de DSS van dit project eruitzien en eenvoudig worden gebruikt?

Deze vier deelvragen zijn geformuleerd op een manier die tot het antwoord van de hoofdvraag leidt. *Figuur 1* laat zien hoe deze deelvragen aan de hoofdvraag zijn gerelateerd.



Figuur 1: Stroomschema van de van de onderzoeksvragen.

3. Onderzoeksaanpak

Dit hoofdstuk gaat over de aanpak van dit onderzoek. Ten eerste is de onderzoeksscope gedefinieerd. Daarna worden de betrokken partijen van dit project beschreven, die fungeren als de casusorganisatie van het onderzoek. Ten slotte wordt de methodologie van dit rapport besproken.

3.1 Onderzoeksscope

Deze DSS wordt ontwikkeld door een samenvoeging van verschillende bestaande aanpakken en databronnen. Allereerst wordt literatuuronderzoek gedaan naar de relevante duurzaamheidsindicatoren en beoordelingstechnieken (*Hoofdstuk 4*). De verwachtingen van het eindontwerp van de DSS zijn beschreven in *Sectie 3.3*. Vervolgens kunnen duurzaamheidsbesluitvormers deze DSS gebruiken om een integrale beslissing over duurzaamheid te nemen. De uitkomsten van deze eindopdracht kunnen naast praktijk, voor verdere onderzoeken nuttig zijn. Dit onderzoek draagt bij aan de kennis over de aanpak van integrale duurzaamheid in de constructie van energieverdeelstations (verder uitgelegd in *Sectie 4.1*). Het doel is om van deze DSS een generieke tool te maken die ook voor andere organisaties en productgroepen van nut zal zijn. Een generiek ontwerp kan wel worden bereikt, omdat energieverdeelstations in principe gebouwen zijn en de bouw daarvan veel in het gemeen heeft met de andere soorten gebouwen. Dit betekent echter niet dat dit ontwerp direct de duurzaamheid van andere projecten kan beoordelen. Want de relevante duurzaamheidsindicatoren en hun onderlinge beoordeling verschillen van project tot project.

Naast wat deze DSS kan aanbieden, bestaan er grenzen aan wat binnen deze thesis wordt onderzocht. Het ontwerp van deze afstudeeropdracht wordt een eenvoudige besluitvormingstool. De intentie is om de efficiëntie en nauwkeurigheid van deze DSS te maximaliseren. De focus ligt dus niet op de ontwikkeling van een ingewikkelde DSS die alleen door experts kan worden begrepen. Daarnaast worden in dit rapport de duurzaamheidsmaatregelen zelf niet onderzocht. Evenwel wordt de DSS op een manier gemaakt die bruikbaar is voor de afweging van diverse soorten maatregelen. Bovendien worden de berekeningen van de kwantitatieve indicatoren in deze DSS niet uitgevoerd, en ze worden juist als input ingevoerd. Dit kan bijv. de berekening van de totale kosten of de CO₂-besparing zijn. Omdat er uitsluitend wordt gekeken naar een integrale afweging van bestaande indicatoren, vallen de bovengenoemde berekeningen buiten de scope van deze afstudeeropdracht.

3.2 Casusorganisatie

In dit onderzoek worden energieverdeelstations onderzocht. Deze assets worden beheerd door semi-publieke partijen. Om de integrale duurzaamheidsbepaling te onderzoeken wordt een praktijkcasus gebruikt. Deze praktijkcasus bestaat uit Strukton die in opdracht van Alliander energieverdeelstations ontwerpt en bouwt. Strukton is een van de grootste bouwbedrijven in Nederland en werkt aan meerdere duurzame infraprojecten door het hele land. Alliander is een groot energiebedrijf dat elektriciteit levert aan een derde van de bevolking in Nederland. Strukton streeft naar verhoging van duurzaamheid bij de bouw van deze energieverdeelstations. Strukton heeft hiervoor een longlist opgesteld met een aantal duurzaamheidsmaatregelen. Deze bachelor eindopdracht draagt bij aan de selectie van twee beste maatregelen per jaar uit deze longlist. Hieronder wordt een verdere kennismaking met deze twee bedrijven behandeld. Dit helpt bij een beter begrip van de realiteit van het project.

Strukton is het bedrijf waar deze afstudeerstage wordt voltooid, dat vrij actief is op het gebied van duurzaamheid. Ze zijn voortdurend geïnteresseerd in verschillende manieren om te verduurzamen. Deze manieren vinden ze door het vaststellen van duurzaamheidsdoelen, namelijk voor 2030: werklocaties (kantoren en projecten) zonder schadelijke uitstoot en restafval, circulair ontwerpen, hergebruik van hoogwaardige materialen, bijdrage van alle projecten aan de verbetering van de biodiversiteit, en klimaatneutraal opereren tegen 2035 (Strukton, 2023). Strukton bouwt in dit project 49 energieverdeelstations voor Alliander in de regio Amsterdam-Gooi. Dit project is genoemd als Project Reddyn. Wat betreft de duurzaamheid in dit project, bestaat de eerste stap uit het opstellen van een longlist met potentiële duurzame maatregelen. Twee van deze duurzame maatregelen met de meeste impact worden in de tweede stap gekozen, waar deze afstudeerstage onder valt. Deze stap wordt uitgevoerd door het Greenteam van deze fase. Naast mijzelf zitten er vijf experts in dit Greenteam die de volgende rollen hebben: voorzitter, coördinator programmaontwikkeling inclusief emissieloos werken, borging maakbaarheid vanuit civiel oogpunt, coördinator duurzame maatregelen bouwkunde, en coördinator duurzame maatregelen GGI. De resultaten van stap twee worden gebruikt in stappen drie en vier, die over het uitwerken en implementeren van de gekozen maatregelen gaan.

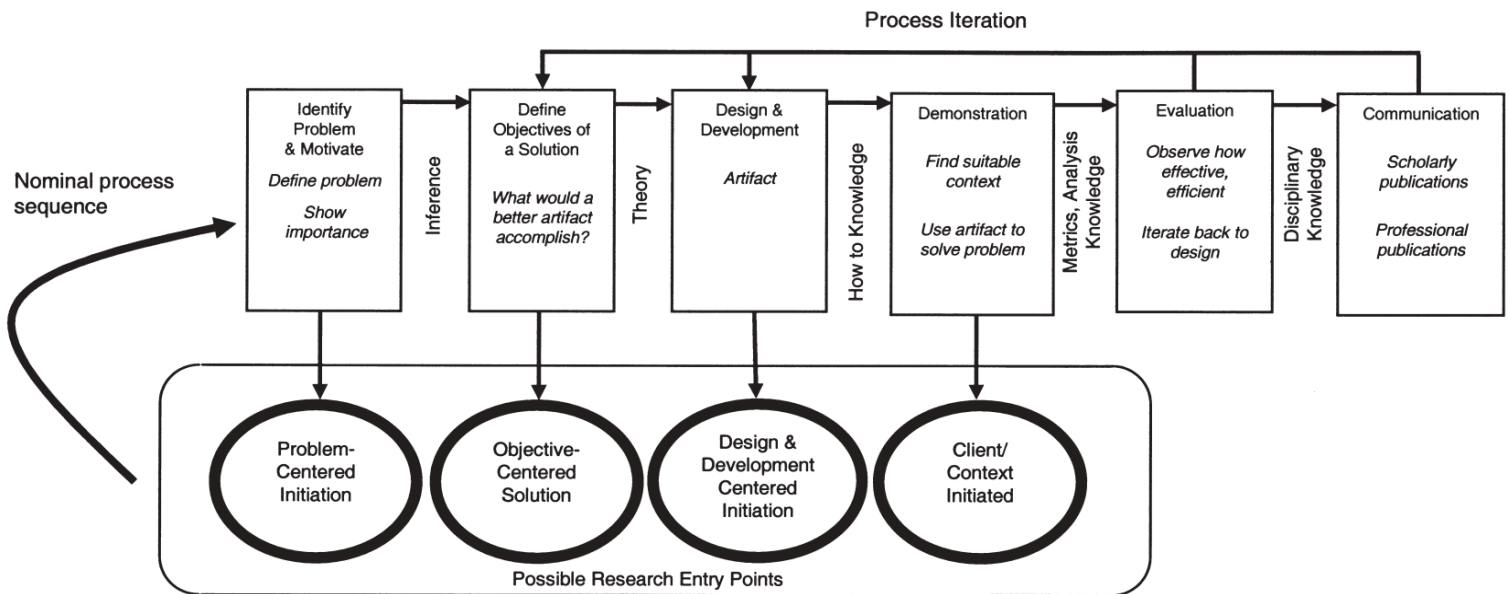
Alliander, de opdrachtgever van dit project, is een van de belangrijkste netbeheerders in Nederland. Alle marktaandelen van Alliander zijn in handen van de provincies en gemeenten in Nederland (Alliander, z.d.-a). Dit betekent dat ze meerdere (sociale) verantwoordelijkheden hebben. Hun drie essentiële doelen zijn: betrouwbaarheid, betaalbaarheid en toegankelijkheid voor iedereen (Alliander, z.d.-b). Ze streven ernaar om betrouwbaar en betaalbaar te zijn en te blijven. Dit wordt verwezenlijkt door uitbreiding van de huidige verdeelstations, investeringen in nieuwe verdeelstations en aanleg van meer energiekabels (Liander). Hierdoor hebben ze meer werk, en tegelijkertijd werken ze met schaarse middelen en een tekort aan technici. Daarom zijn innovatieve duurzame oplossingen van groot belang in dit project (Liander). Alliander staat momenteel voor een grote uitdaging: zorgen voor de brede aspecten van duurzaamheid, terwijl ze hun stroomnetten over het hele land verdubbelen. Niettemin integreren ze al maatregelen in thema's als klimaat, circulariteit en biodiversiteit & leefbaarheid; en faciliteren ze: groene energie, hergebruik van materialen, lange levensduur van gebouwen en componenten, en het 'vergroenen' van kantoor- en procesgebouwen (Liander). Zowel Alliander als Strukton hebben dus veel gedaan op het gebied van duurzaamheid en willen daarin nog beter worden. Dit is zeker een enorm voordeel dat ervoor zorgt dat de meest effectieve maatregelen in deze samenwerking kunnen worden geselecteerd en geïmplementeerd.

3.3 Onderzoeksmethodologie

Voor de ontwikkeling van de DSS wordt de onderzoeksstrategie *Design Science Research (DSR)* gevolgd (Van Aken et al., 2016). De kern van deze onderzoeksstrategie is een iteratieve ontwerpaanpak, met de volgende iteratieve stappen: probleemanalyse, ontwerp van een oplossing, controleren en herontwerp. Deze cyclus wordt hier de ontwerpcyclus genoemd, die wordt herhaald totdat het eindontwerp aan de twee hoofdprincipes van DSR voldoet: 1) Pragmatic Validity: Hoe sterk zijn de bewijzen dat het eindontwerp de beoogde resultaten zal realiseren?; en 2) Practical Relevance: Hoe draagt het ontwerp bij aan het oplossen van een betekenisvol probleem? Het doel van deze strategie is productie van kennis die wordt gebruikt voor ontwerp en uitvoering van acties, processen of systemen die bepaalde resultaten zoeken (Van Aken et al., 2016).

Binnen DSR kan *Design Science Research Methodology (DSRM)* worden aangenomen als een gestructureerde ontwerpgerichte onderzoeks aanpak (Peffer et al., 2007). DSRM bevat zes activiteiten (*Figuur 2*), namelijk: (1) probleemidentificatie en motivatie, (2) doelstellingen voor een oplossing, (3)

ontwerp en ontwikkeling, (4) demonstratie, (5) evaluatie, en (6) communicatie. Er zijn vier startpunten die aangeven met welke activity te beginnen. Het startpunt voor een onderzoek varieert afhankelijk van de natuur ervan, die kan probleemgericht, doelstellinggericht, ontwerpgericht of cliëntgericht zijn. Omdat deze thesis beoogt om een probleem op te lossen, namelijk gebrek aan de juiste aanpak voor realisatie van integrale duurzaamheid, beginnen we bij *Activity 1*, en volgt dit rapport alle zes activiteiten van het DSRM-raamwerk. Deze activiteiten kunnen worden begrepen als onderzoeksactiviteiten die verder in deze sectie afzonderlijk zijn uitgewerkt.



Figuur 2: DSRM Process Model. Figuur uit Peffers et al. (2007).

Activity 1: Probleemidentificatie en Motivatie

Deze activity betreft de omschrijving van het probleem en de redenen waarvoor een ontwerp nodig is. Dit werd behandeld in *Hoofdstuk 1*, waar het eveneens werd bekend wat het einddoel van dit onderzoek is en hoe dat zal worden bereikt. Tijdens het verloop van het onderzoek wordt het probleem steeds concreter en wordt bijgesteld aan de hand van de inzichten uit de volgende activiteiten.

Activity 2: Doelstellingen voor een Oplossing

Voordat een DSS ontworpen kan worden, moeten de ontwerpisen worden bepaald. Deze eisen zijn cruciaal voor de verificatie van de prestatie van het eindontwerp van de DSS. Een initiële lijst met eisen wordt hieronder behandeld. Deze eisen zijn de zogenoemde doelstellingen voor een oplossing.

De International Organization for Standardization (2011) biedt de kwaliteitseisen die in het ontwerp van een soortgelijke tool moeten worden beschouwd, die luiden als volgt:

1. *Functionality*: De tool realiseert wat ervan verwacht is, op een juist en nauwkeurige manier. De DSS moet dus de maatregelen met de meeste impact m.b.t. integrale duurzaamheid juist kunnen identificeren.
2. *Reliability*: De tool blijft werkzaam onder bepaalde omstandigheden en tijdsperiode. De DSS kan worden gebruikt in diverse omgevingen en blijft werkzaam voor zolang dat die open is.

3. *Usability*: De tool is gemakkelijk gebruikt en begrijpelijk. De DSS moet door alle experts en niet-experts kunnen worden begrepen en gebruikt.
4. *Efficiency*: De tool presteert op een efficiënte manier m.b.t. tijd en middelen. Het is verwacht dat de DSS de resultaten (bijna) onmiddellijk verwerkt.
5. *Maintainability*: De tool is gemakkelijk aangepast om relevant en nuttig te blijven. Een gebruiker heeft de mogelijkheid de indicatoren of indicatorsgewichten wijzigen.
6. *Portability*: De tool is werkzaam als die op verschillende omgevingen worden geplaatst. De DSS moet op elk systeemtype (zoals laptops) werkzaam zijn.
7. *Security*: De tool kan de gegevens beschermen en de onbevoegde toegang voorkomen. Een offline omgeving wordt gebruikt voor de DSS die voor een hogere beveiliging zorgt.
8. *Compatibility*: De tool functioneert met andere software, hardware en systemen. De DSS kan worden gebruikt in diverse systeemspecificaties.

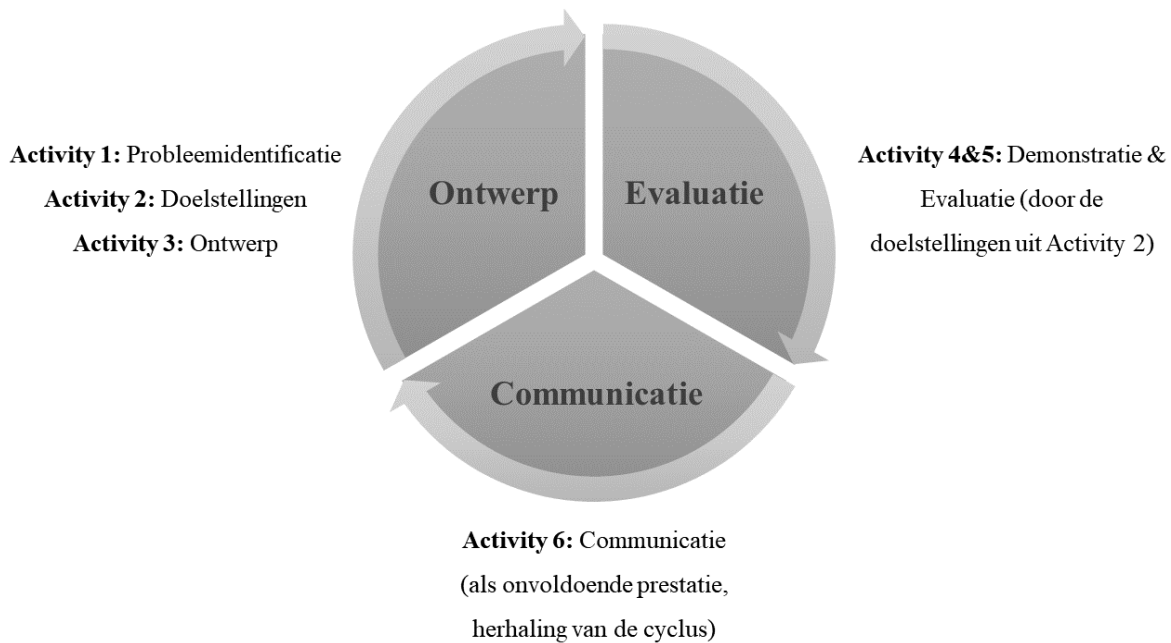
Daarnaast komt de afstemming van doelstellingen van deze DSS vanaf Strukton als de hoofdgebruiker van de tool. Ze hebben een paar eisen voor deze DSS die in de onderstaande zijn genoemd:

- a. De tool moet de drie pijlers van duurzaamheid opnemen, om de duurzaamheidsmaatregelen met de meeste impact te kunnen identificeren.
- b. De tool moet op een eenvoudige manier worden ontwikkeld, om begrijpelijk te zijn in het gebruik en in de communicatie van de resultaten.
- c. De tool moet het effect van voorkeursmaatregelen uitschakelen om een onbevooroordeeld keuze te kunnen identificeren. Bijvoorbeeld, als een maatregel verwacht is om een hoge score te krijgen, hoeft de DSS niet te worden aangepast zodat dit uiteindelijk gebeurt.

Uiteindelijk is er een doelstelling gerelateerd aan de methodologie van deze opdracht: de DSS moet op een generieke manier worden ontworpen. Daardoor kan de DSS voor andere onderzoeken naar duurzaamheid in de projecten binnen de bouwsector nuttig zijn. Gedurende het onderzoek zal de lijst met eisen aangevuld en aangescherpt blijven worden op basis van inzichten uit de literatuur en vanuit de casusorganisatie.

Activity 3: Ontwerp en Ontwikkeling

De hoofdstrategie van dit rapport is de iteratie van een ontwerpcyclus (*Figuur 3*). Deze activity (*Activity 3*) beschrijft het ontwerp van de DSS. Daarna gebruikt *Activity 5* de gestelde doelstellingen in *Activity 2*, om de evaluatie van de DSS uit te voeren. Als de verwachtingen van de DSS niet gerealiseerd zijn, worden deze twee stappen herhaald, totdat de DSS een acceptabele prestatie heeft. Dit is dus het doel van deze ontwerpcyclus. Uiteindelijk wordt het eindontwerp van de DSS (dat aan de eisen voldoet) gecommuniceerd in *Activity 6* om verder te worden aangenomen in de praktijk.



Figuur 3: De ontwerpcyclus van de DSS.

Het ontwikkelingsproces van deze DSS wordt in *Hoofdstukken 4 en 5* beschreven, waarin het proces met literatuuronderzoek begint. Dit ontwerp beoogt efficiëntere methoden dan de andere beschikbare modellen. Dit helpt om de beoogde resultaten (uit *Activity 2*) eenvoudiger te bereiken. Om zulke DSS met succes te kunnen ontwerpen, zijn er meerdere databronnen nodig. Naast het literatuuronderzoek, zijn gesprekken met Strukton over de ontwikkeling van de DSS van groot belang. Dit komt door het feit dat de nodige input voor de DSS wordt berekend in medewerking met het Greenteam (beschreven in *Sectie 3.2*). In maandelijkse gesprekken van het Greenteam, wordt de voortgang van het project besproken en wordt bekend welke data door wie wordt berekend. Zie *Tabel 1* voor welke data nodig zijn in de ontwikkeling van de DSS. *Hoofdstukken 4 en 5* beschrijven deze input verder.

Tabel 1: Databronnen tijdens de ontwikkelingsfase.

Taak	Databron
Vaststellen van Indicatoren	Literatuuronderzoek Feedback van Greenteam
Vaststellen van Indicatorgewichten	Expert-Opinion vanuit Greenteam
Vinden van Beoordelingstechnieken	Literatuuronderzoek Feedback van Greenteam
Beoordeling binnen de Kwalitatieve Indicatoren	Expert-Opinion vanuit Greenteam
Berekening van de Kwantitatieve Indicatoren	Literatuuronderzoek Medewerking met Greenteam
Berekening van Integrale Impact	Literatuuronderzoek
Vormgeving van de DSS	Literatuuronderzoek Feedback van Greenteam

Activity 4&5: Demonstratie & Evaluatie

Hierbij, als er onvoldoende prestatie wordt gemerkt, zou er een herontwerp nodig zijn. De evaluatie wordt eerst uitgevoerd met de gestelde ontwerpeisen (*Activity 2*), en dan door de feedback van het Greenteam. Om de ontwerpcyclus zo efficiënt mogelijk te kunnen toepassen, wordt de DSS geëvalueerd en herontworpen voor slechts drie maatregelen. Dit komt door de aanwezigheid van ruim vijftien maatregelen voor Project Reddyn, die wellicht allemaal niet diep kunnen worden onderzocht binnen de tien weken van de stageperiode. De focus ligt hier dus op de maximalisering van de kwaliteit van de DSS, en niet op de afweging van zoveel mogelijk maatregelen. Momenteel bestaat de evaluatie met de gestelde eisen (*Activity 2*) uit een paar stappen. Ten eerste wordt de output van de DSS voor elke maatregel gecontroleerd om te zorgen dat er geen abnormale verwerkingen in de DSS gebeuren (bijv. onverwachte outputs). Ten tweede worden de resultaten uit de maatregelen met elkaar vergeleken. Als hier een maatregel ten onrechte veel beter scoort dan een andere, kunnen er wat aanpassingen nodig zijn. Ten derde wordt bekeken of de DSS voldoet aan alle ontwerpeisen. Dit wordt gedaan door de invulling van een checklist die alle eisen scherper vaststelt (*Paragraaf 5.2.3*).

Daarna wordt de DSS geleverd aan het Greenteam en ze worden gevraagd om zelf een tijdje met de DSS te werken, om een feedback te kunnen geven. Indien nodig, worden er volgens deze feedback enkele aanpassingen aan de DSS gedaan. Zodra alle herontwerpen en aanpassingen zijn uitgevoerd, wordt de DSS met een brede uitleg over de functies ervan gedemonstreerd. Deze demonstratie wordt door de invoering van drie maatregelen op de DSS gedaan. Hiermee kan een validatie worden uitgevoerd van DSS (*Paragraaf 5.2.2*). Alle drie gekozen maatregelen (met het Greenteam) voor deze validatie gaan over het gebruik van alternatieve betonsoorten in plaats van het normale soort “Beton CEM III, zonder gerecyclede materialen”. In het onderstaande wordt er verder kennisgemaakt met deze maatregelen die voor de demonstratie van de DSS worden onderzocht:

1. Beton met betongranulaat 30%: Dit soort beton is gemaakt met 30% gerecycled beton. Dit leidt tot 30% reductie in gebruik van primaire grondstoffen (Strukton). Dit helpt bij de realisatie van de doelen van het Rijk om tegen 2050, volledig gerecycled beton te bereiken (PuinRecycling, 2018).

2. Geopolymeerbeton: Dit is anders dan de gebruikelijke betonsoorten en gebruikt alkalisch in plaats van cement als bindmiddel. Dit leidt vervolgens tot besparing van CO₂ en MKI, maar met verhoogde materiaalprijzen (BETONIEK, 2022).

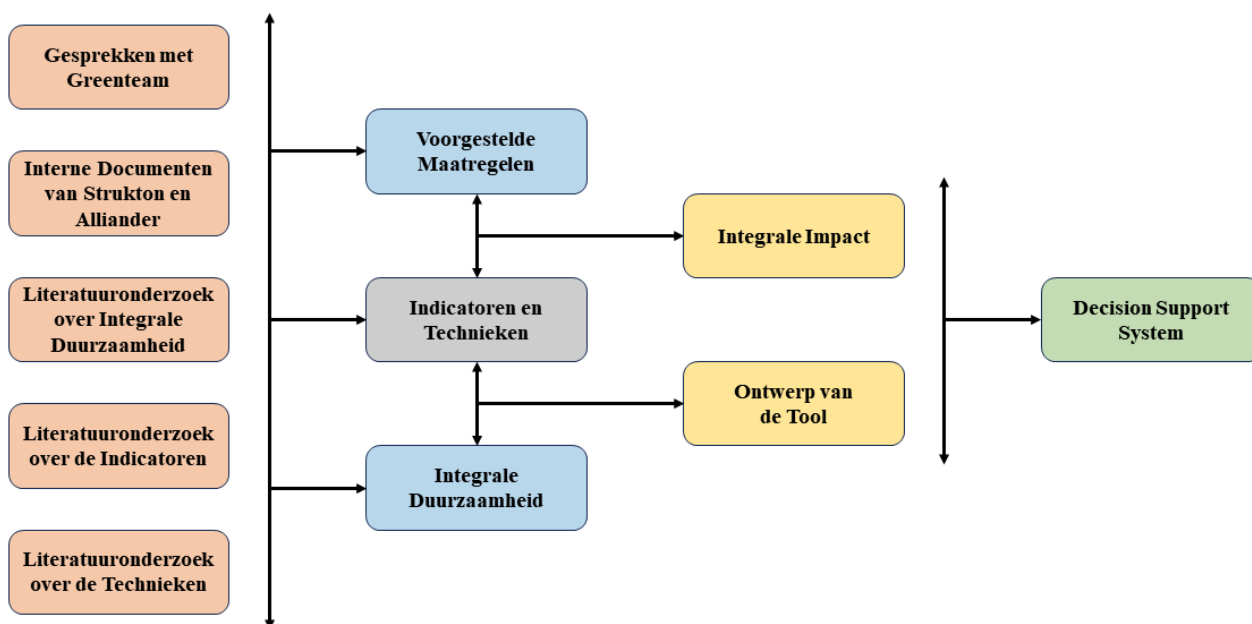
3. Circuton (conform CUR 127 aanbeveling): Dit betonsoort maakt gebruik van een nieuwe methode in het betonmengsel, waar ten minste 15% van het cement is gerecycled. Dit leidt tot een verminderde MKI-waarde. Met nieuwe technologieën zijn onderzoekers aan het werk om meer dan de huidige norm van 30%, en zelfs 100% gerecycled materiaal te realiseren (TU Delft, 2023).

Activity 6: Communicatie

Uiteindelijk wordt de DSS naar de buitenwereld gecommuniceerd. Hier worden gepresenteerd de manieren waarop deze DSS het onderzoeksprobleem heeft aangepakt. Dit zal voldoen aan de verwachtingen van het stagebedrijf en tegelijkertijd creëert dit onderzoek verdere kennis over zulke ontwerpen. Deze kennis kan in de toekomst als hulp zijn voor andere onderzoekers. Bovendien maakt deze DSS het proces van besluitvorming gemakkelijker te verstaan voor het niet-expert publiek. Het is van groot belang om ervoor te zorgen dat de DSS door Strukton wordt aangenomen. Dit is gedaan door het opnemen van expert-opinion vanuit het Greenteam tijdens de ontwikkeling van de DSS. De DSS wordt tijdens het ontwikkelingsproces meermaals gepresenteerd aan het Greenteam. Hiermee leert het Greenteam geleidelijk hoe deze DSS werkt, en hun feedback wordt gevraagd voor de potentiële verbeteringen aan de DSS. Deze stap is verder uitgewerkt in *Sectie 5.3*.

4. Theoretische inhoud van de DSS

In dit hoofdstuk wordt naar de relevante begrippen onderzocht die in de vorige hoofdstukken werden genoemd. De dataverzameling van deze thesis is getoond in *Figuur 4*, waarin de oranje blokjes de informatiebronnen zijn, waaronder: gesprekken met het Greenteam, interne documenten van Strukton en Alliander, en diverse literatuuronderzoeken naar de relevante begrippen voor dit rapport. Deze informatiebronnen leveren input voor de volgende stappen in het proces. De blauwe blokjes zijn de onderzoeksobjecten, namelijk de duurzaamheidsmaatregelen en de integrale duurzaamheid. Deze worden verwerkt door de relevante duurzaamheidsindicatoren en technieken (in het grijze blokje). De uitkomsten van deze stap zijn aanwezig in de gele blokjes, die over de integrale impact van maatregelen en het ontwerp van de DSS gaan. Ten slotte leiden deze resultaten tot de DSS.



Figuur 4: Stroomschema van de dataverzameling tijdens dit thesis.

4.1 Integrale duurzaamheid

Integrale duurzaamheid is nog onbekend terrein in de context van energieverdeelstations. Pogingen in Google Scholar en Scopus om een dergelijk onderzoek te vinden hebben amper resultaten gegeven. De gevonden onderzoeken gaan meestal over de bredere scopes van “duurzaamheid in de bouw” (Alwafi, 2022; Rajabi et al. 2022; Zavadskas et al. 2018) of “duurzaamheid in de energiesector” (Fath, 2017; Gogan & Wyckoff, 2012; Grogan, 2011; Li et al. 2022; Rossignoli & Lionzo, 2018). In deze sectoren bestaan wel tools voor de integrale duurzaamheid in de gebouwen (Wang et al., 2012). De energieverdeelstations hebben inderdaad veel in het algemeen met gebouwen. Maar het type gebruik van diverse gebouwen verschillen enorm.

Er zijn een paar bepalende factoren in besluitvorming binnen elk project. In Project Reddyn zijn die factoren als volgt: vermindering van de kosten, beperking van de schade aan de aarde, en verhoging van de sociale acceptatie. Dit de drie pijlers van duurzaamheid: milieu, economisch en sociaal. Deze worden meestal geaccepteerd als even belangrijke delen van duurzaamheid, die tegelijkertijd moeten worden toegepast (Purvis et al., 2018). De drie pijlers zijn als volgt:

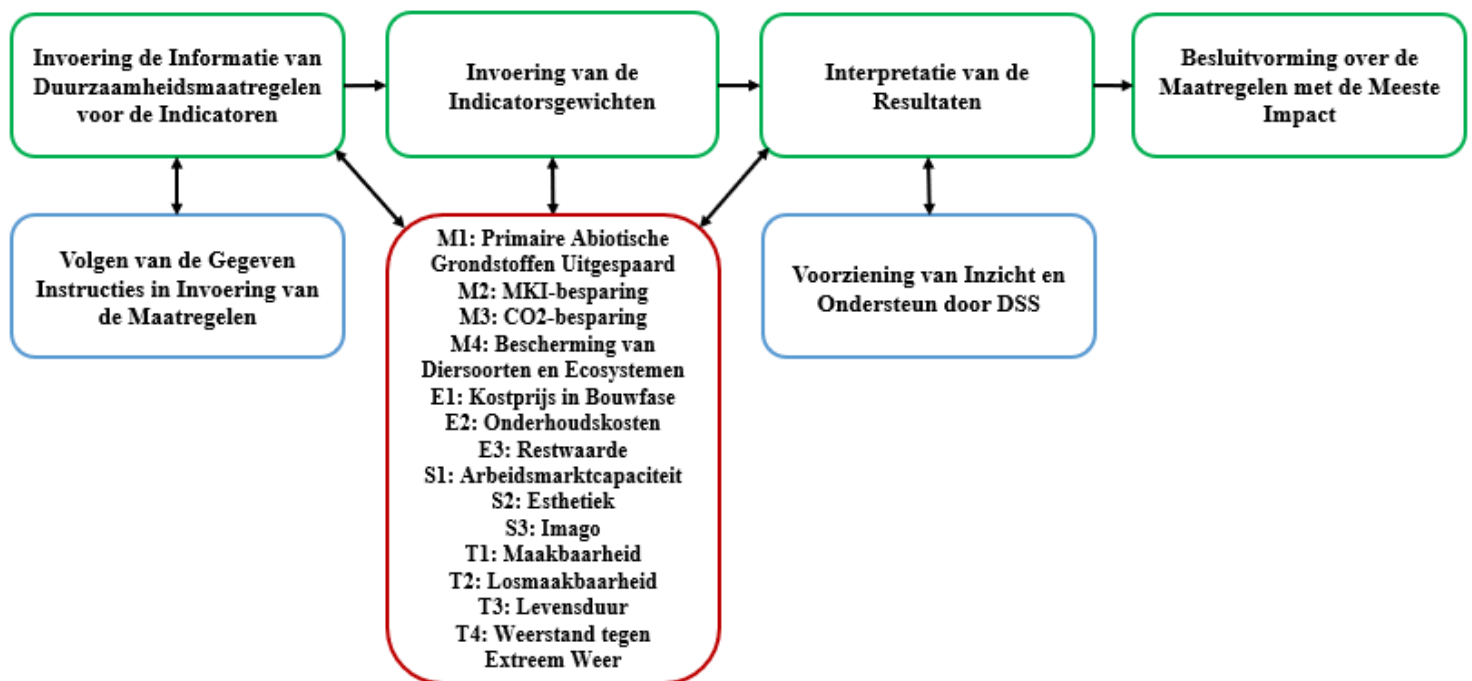
Milieuduurzaamheid: In het Engels, *Environmental Sustainability*, gaat over de beperking van de schade aan de aarde. In dit onderzoek wordt dit beschouwd als gebruik van duurzame materialen en verlaging van totale uitstoot in de constructie van de energieverdeelstations. Dit duurzaamheidsaspect is van groot belang, want het heeft de meeste impact in de bouwsector, in vergelijking met de andere twee pijlers van duurzaamheid (Wang, 2023). Dit komt door de grote hoeveelheid CO₂-uitstoot bij energieverbruik en materiaaltransport tijdens de bouwprojecten, die enorme schade veroorzaken aan de aarde (Wang, 2023). Bovendien is de sector gebouwde omgeving verantwoordelijk voor rond 37% van de globale energiegerelateerde CO₂-uitstoot, en heeft een behoefte aan emissiereductie (Dyson et al., 2023). Daarnaast vallen er meerdere belangrijke begrippen zoals circulariteit, biodiversiteit en materiaalgebruik onder milieuduurzaamheid. Daarvoor wordt dit aspect soms beschouwd als het enige deel van duurzaamheid; maar in onderstaande wordt duidelijk waarom dit een onvolledige perceptie is van duurzaamheid.

Economische duurzaamheid: Dit betreft de totale kosten van een project. Hier worden de maatregelen beoordeeld op hun kosten tijdens de gehele levenscyclus (constructie, onderhoud en levensende). De maatregelen kunnen dus leiden tot zowel verlaging als verhoging van de totale kosten in een project. Dit aspect vereist soms een hogere initiële investering, die zorgen veroorzaakt over de efficiëntie van een maatregel. Hoewel de duurzame oplossingen, milieu- en sociale voordelen realiseren op de lange termijn, moeten de besluitvormers soms de beleggers tegemoetkomen door de laagste initiële kosten. Hiervoor kiezen ze meestal voor een minder duurzame maatregel of materiaal die minder kost (Ametepey et al., 2015). Maar met een geïnformeerd besluit, kunnen de duurzame oplossingen op de lange termijn tot de verlaging van de kosten leiden (Wang, 2023). Dit komt door bijv. de hogere initiële kosten, maar minder onderhoudskosten. Niettemin bestaat er soms een gebrek aan een milieuvriendelijk materiaal of een passende DSS voor het meten van duurzaamheid. Dit gebrek is beperkend in de selectie van de voordeligste maatregelen. Toch kunnen zulke materialen of tools worden ontwikkeld mits de investering voor het onderzoek daarnaar wordt versterkt (Ametepey et al., 2015). Deze eindopdracht is bijv. gevolg van een initiatief om zo'n ontwikkeling te maken. In dit rapport wordt economische duurzaamheid gedefinieerd als de vermindering van de totale kosten tijdens de diverse levenscyclusfasen in een project.

Sociale duurzaamheid: Onder dit aspect wordt verstaan als de invloed die een project heeft op het sociale welzijn en de acceptatie van de maatschappij voor de projectuitvoerder. Dit aspect krijgt nog steeds onvoldoende aandacht door de bouwsector (Karakhan et al., 2020). Afwezigheid van dit aspect leidt tot een lager duurzaamheidsniveau in een project (Leje et al., 2020) en heeft gevolgen op het welzijn van de bevolking (Zuo et al., 2012). Niettemin biedt een maatregel meestal een nieuwe methode aan, en de besluitvormers aarzelen of die methode gaat lukken (Ametepey et al., 2015). Er is dus onderzoek nodig om zulke sociale obstakels aan te kunnen pakken. Vanwege de genoemde redenen en ook andere zaken zoals bedrijfsimago, wordt hier het sociale aspect ook inbegrepen.

Technische indicatoren: Naast milieu-, economische en sociale duurzaamheid, wordt hier nog een vierde groep van indicatoren toegevoegd. Technische indicatoren hebben soms hun eigen groep om de afwegingen wat verstandiger te maken (Akadiri & Olomolaiye, 2012; Alam Bhuiyan & Hammad, 2023; Hatefi et al., 2021). De indicatoren in deze groep horen niet per se bij een van de bovengenoemde drie pijlers. Integendeel hebben de technische indicatoren invloed op twee of alle drie van de drie pijlers. Bijvoorbeeld, een lange levensduur van een materiaal betekent minder onderhoud of vervanging van dat materiaal. Vervolgens leidt dit tot minder materiaal gebruikt (milieu), minder onderhoudskosten (economisch), en minder werk om te worden gedaan (sociaal). Daarom is deze indicatorgroep eveneens hierbij toegevoegd.

Een schema te zien in *Figuur 5* van het concept van deze DSS en hoe die het besluitvormingsproces ondersteunt. Dit proces begint in de linkerkant van de figuur, met de invoering van de gegevens van de maatregelen, terwijl aandacht is besteed aan de instructies voor het gebruik (beschreven in *Paragraaf 5.2.1*). Deze instructies zorgen ervoor dat de output juist wordt berekend en zonder onverwachte verwerkingen. Daarna kunnen de indicatorsgewichten worden ingevoerd om de wensen in een bepaald project aan te kunnen pakken. Deze gewichten zijn hierbij volgens de wensen in Project Reddyn bepaald (*Paragraaf 5.1.2*), maar voor andere projecten zijn deze wensen wellicht anders. Dan worden de vergelijkingen uitgevoerd en resultaten verwerkt, die inzicht bieden aan de gebruikers over de maatregelen. Vervolgens ondersteunt dit inzicht het besluitvormingsproces om welke maatregelen te implementeren. Zoals te zien, hangt dit hele proces zwaar af van de indicatoren die in *Sectie 4.2* worden gevonden (het rode blokje). De juiste selectie van de indicatoren is dus van groot belang en moet met hoog aandacht en inclusie van alle gebruikers van de DSS worden uitgevoerd. Deze figuur is dus een concept van de DSS en het ontwerp van de DSS wordt in *Sectie 5.1* behandeld. De definitieve versie van de interface van de DSS is daarbij te zien in *Figuur 10*. De volgende secties in dit hoofdstuk gaan over de inhoud en de ontwerpeisen voor de DSS.



Figuur 5: Het concept van de DSS van deze eindopdracht.

4.2 Duurzaamheidsindicatoren

De beoordelingsindicatoren zijn van groot belang in de afweging van de duurzaamheidsmaatregelen. Hier worden deze indicatoren in diverse indicatorgroepen geplaatst die uit de drie pijlers van duurzaamheid en de technische indicatoren bestaan. Deze integratie van de drie pijlers wordt vaak toegepast in onderzoeken naar besluitvorming over duurzaamheid (Alam Bhuiyan & Hammad, 2023; Alwafi, 2022; Bansal et al. 2017; Hatefi et al., 2021). De selectie van indicatoren voor deze DSS hangt af van de volgende aspecten: aantal keer vermeld in relevante wetenschappelijke artikelen, de relevantie voor de bovengenoemde vier indicatorgroepen, en de relevantie voor de bouw van energieverdeelstations. Om het afwegingskader projectspecifiek te maken en overeen te laten komen

met de wensen van Strukton, zijn de beoordelingsindicatoren afgestemd met het Greenteam. Na het literatuuronderzoek, werden 22 relevante indicatoren gevonden en gepresenteerd aan het Greenteam, waar de experts hun ervaring en mening met anderen deelden. Daar werden 15 indicatoren geïdentificeerd als meest relevant voor dit project. Deze vermindering van indicatoren helpt dat de diverse maatregelen alleen worden afgewogen op de indicatoren die het meeste belang in een project hebben. Deze indicatoren zijn in het onderstaande beschreven. De beoordelingen te zien in *Sectie 4.3*.

4.2.1 Milieu-indicatoren

Primaire abiotische grondstoffen uitgespaard: Dit zijn de grondstoffen die te vinden zijn in de natuur, namelijk: metalen, mineralen, en energie (bijv. fossiele energie) (Swart et al., 2015). De overmatige winning van dit soort grondstoffen heeft ernstige implicaties voor de gezondheid van de aarde, en ook op de beschikbaarheid daarvan voor de toekomstige generaties (Swart et al., 2015). Aansluitend kan een tekort aan deze middelen (kwaliteit en kwantiteit) tot vertragingen in bouwprojecten of zelfs annulering ervan leiden (Nagaraju & Reddy, 2012). Uitsparing van grondstoffen leidt tot de vindingrijkheid in het project (voor beoordeling zie verder *Paragraaf 4.3.1*).

MKI-besparing: De totale milieu-impact bij toepassing van een maatregel wordt hier gerapporteerd met MKI-besparing, die afkomstig is van *Life Cycle Assessment (LCA)* (Pianoo, 2020). *Milieukostenindicator (MKI)* is een vaak toegepaste methode door de bouwbedrijven in Nederland. Daarom is MKI inbegrepen als een beoordelingscriterium in het project (zie verder *Paragraaf 4.3.1*).

CO₂-besparing: Hoewel de totale CO₂-besparing (klimaatverandering) een van de elf delen van een MKI-berekening is (Pianoo, 2020), wordt die hier ook als een aparte indicator gecommuniceerd. Dit komt door het grote belang van CO₂-uitstoot in de interne rapportages van bouwbedrijven met hun opdrachtgevers. Dit is omdat de toename van de globale CO₂-uitstoot tot globale verwarming leidt, en daarvoor hebben diverse sectoren de verantwoordelijkheid om hun CO₂-uitstoot te verminderen (Huisingsh et al., 2015). Om de verwarring te voorkomen, is hier de bedoeling bij CO₂-uitstoot de broeikasgassen (CO₂, NO_x, enz.) die meestal in CO₂-equivalent zijn gerapporteerd. CO₂-besparing leidt tot de vermindering van de milieuvoetafdruk (zie verder *Paragraaf 4.3.1*).

Bescherming van diersoorten en ecosystemen: Deze indicator volgt SDG 15 (leven op het land) en gaat over het behoud van verschillende soorten van leven (ecosystemen, diersoorten, bevolking, en genen) in de aarde, als een groot deel van biodiversiteit (Opoku, 2019). Menselijke activiteiten hebben vaak negatieve impact op de biodiversiteit, en dit leidt tot het verlies van ecosystemen en diersoorten. Dit heeft onomkeerbare effecten op de natuur, en op hoe mensen leven (Chivian, 2002). De bouwsector is een van de grootste veroorzakers van de afname van biodiversiteit (Opoku, 2019). Hier ontstaan mogelijkheden voor de bouwsector in de beperking van biodiversiteitsverlies in ontwerp, bouw, en onderhoud binnen diverse bouwprojecten (Opoku, 2019). Daarvoor moet biodiversiteit worden meegenomen in dit bouwproject, zoals bij de materiaalselectie (zie verder *Paragraaf 4.3.1*).

Biodiversiteit bestaat binnen de steden, bijv. langs waterwegen, parken, tuinen en lege kavels (Opoku, 2019). Voor verhoging van biodiversiteit in de gebouwde omgeving worden oplossingen toegepast, zoals nestkasten of groene daken boven de gebouwen. In zulke omgevingen kunnen de diersoorten en insecten naast mensen leven en niet in gevaar van uitsterven zijn (Lepczyk et al. 2017). Daarnaast moeten de bouwprojecten of de grondstofwinning geen planten of diersoorten doden (Beninde & Hochkirch, 2015; Pedersen Zari, 2019). Dus hoe hoger biodiversiteit in de grondstofwinning en in het ontwerp van de energieverdeelstations, hoe hoger de score (zie verder *Paragraaf 4.3.4*).

4.2.2 Economische indicatoren

Opschaling (knock-out indicator): De herhaalbaarheid van de maatregelen is van belang want er wordt in dit bouwproject 49 energieverdeelstations gebouwd. Opschaling bepaalt of de toepassing van een maatregel in de bouw van meerdere stations kan worden herhaald, wat tot lagere kosten in de ontwerp- en bouwfases leidt. Deze indicator is van zo'n groot belang voor het Greenteam, dat als er een maatregel niet opschaalbaar is, wordt die niet meegenomen in de overall-vergelijking van de maatregelen. Toch worden de niet-opschaalbare maatregelen in een tabel in de DSS bewaard, in het geval dat er ontwikkelingen zijn die deze maatregelen opschaalbaar maken.

Kostprijs in de bouwfase: Dit betreft alle financiële kosten tijdens de bouwfase van de stations, inclusief materiaalkosten, transport, en arbeidskosten. De totale kostprijs in de bouwfase heeft een grote invloed op de haalbaarheid van een project, en de besluitvormers vinden dit van groot belang (Heralova, 2017). Inderdaad zijn lagere kosten gewenst in projecten (zie verder *Paragraaf 4.3.2*).

Onderhoudskosten: Hier worden de totale kosten berekend die in de onderhoudsfase van de stations moeten worden gemaakt. Dit kan reparaties van een materiaal of de volledige vervanging daarvan zijn. Hoewel de vorige indicator een bepalende rol speelt in de besluitvorming over de haalbaarheid van een project, zijn de onderhoudskosten ook van groot belang (Heralova, 2017). Dit komt doordat er kan blijken dat een maatregel in de bouwfase niet veel kost, maar wel veel onderhoudskosten nodig heeft. Het is dus verstandig om deze indicatoren allebei op te nemen (zie verder *Paragraaf 4.3.2*).

Restwaarde: Veel materialen zijn na hun levens einde in een bouwproject nog bruikbaar voor andere doelen wat financiële voordelen oplevert (Guy & McLendon, 2000). Restwaarde laat de toekomstige financiële voordelen zien die worden bereikt met recycling en hergebruik van materialen na hun levens einde. Deze indicator wordt hier berekend als volgt: Materiaalwaarde (recycling en hergebruik) - Kosten in het levens einde. De precieze materiaalwaarde is wellicht nog niet bekend voor alle materialen. Daarom wordt hier een simplificering beschouwd in de berekening van materiaalwaarde. Eerst wordt bepaald door literatuur en materiaal-info, in hoeverre (percentage) een materiaal is recyclebaar of herbruikbaar. Dan wordt de materiaalwaarde geschat door vermenigvuldiging van dit percentage met de investeringskosten voor dat bepaalde materiaal. Maar een simplificering betekent dat de nauwkeurige waarden worden op deze manier niet behaald (zie verder *Paragraaf 4.3.2*).

Behalve opschaling, gaan alle economische indicatoren van deze DSS over de drie fases van een *Life Cycle Costing (LCC)*, namelijk bouwfase, onderhoudsfase en levens einde (Schade, 2007). Het besluit is genomen om deze drie fases apart mee te brengen om meer vrijheid te geven aan de besluitnemers in de onderlinge weging van deze drie factoren. Bijvoorbeeld, voor een project of een bepaald tijdstip, kan de minimalisering van de initiële kosten van belang zijn; maar in een andere situatie kan de wensen over de beperking van de onderhoudskosten gaan.

4.2.3 Sociale indicatoren

Arbeidsmarktcapaciteit: Er bestaat momenteel een tekort aan vaardige technici en personeel in Nederland die negatieve gevolgen heeft gehad (Rijksoverheid, 2023); waarvan drie kwart van de ondernemers last hebben (CBS, 2023). Hier wordt geschat in hoeverre er arbeids beschikbaar is voor de implementatie van de maatregelen, terwijl het welzijn van de werknemers is gegarandeerd. Deze schatting gaat over zowel kwaliteit als kwantiteit van het werk, dat een maatregel meebrengt. Deze indicator zorgt ervoor dat een project arbeidsvriendelijk is. Hier wordt de beschikbaarheid van de

vaardige arbeid voor de uitvoering van een maatregel beoordeeld, op de criteria van hoeveelheid beschikbare technici, kwaliteit en kennis van de beschikbare technici, en werken zonder hoge druk of stress, dat soms gebeurt door het tekort aan voldoende hoeveelheid van vaardige medewerkers (CBS, 2023; Rijksoverheid, 2023) (zie verder *Paragraaf 4.3.4*).

Esthetiek: De esthetiek van gebouwen en structuren is tegenwoordig van groot belang en heeft impact op de stemming van de gebruikers en bezoekers daarvan (Caspari et al., 2011). Bovendien wordt de esthetiek van de omgeving beschouwd als een essentieel onderdeel van duurzaamheid, met een hoge invloed op het welzijn van mensen (Grazuleviciute-Vileniske et al., 2021). Projectsamenlijk wordt in beoordeling van deze indicator rekening gehouden dat de Commissie Omgevingskwaliteit akkoord moet gaan met het ontwerp van de stations (Gemeente Amsterdam, z.d.). Er is dus geen breed scala aan keuzes m.b.t. het ontwerp. Esthetiek wordt hier beoordeeld op de criteria van incorporatie van natuurlijke ontwerpkeuzes (zoals begroeiing), innovatie in het ontwerp (Grazuleviciute-Vileniske et al., 2021), en toepasbaarheid volgens Commissie Omgevingskwaliteit (zie verder *Paragraaf 4.3.4*).

Imago: Geleidelijk worden managers en het publiek meer bewust van de klimaatverandering en de essentiële rol die duurzaamheid in de verschillende projecten speelt (de Lange et al., 2012; Malla et al., 2022). De SDGs hebben ook invloed gehad op de verhoging van de kennis van het niet-expert publiek over duurzaamheid (Bain et al., 2019). Daarom streven bedrijven om duurzaamheid in hun projecten op te nemen om een verhoogd imago en sociale acceptatie voor hun bedrijven te creëren (de Lange et al., 2012). Deze indicator bepaalt hoe invloedrijk een duurzaamheidsmaatregel kan zijn in de verhoging van het imago van de betrokken partijen. Eveneens kan dit het voorkomen van een situatie zijn die het imago van het bedrijf verslechtert. De beoordeling van deze indicator beschouwt de authenticiteit in verhoging van duurzaamheid in het bouwproject en in de communicatie van deze inspanningen met het publiek (zie verder *Paragraaf 4.3.4*).

4.2.4 Technische indicatoren

Maakbaarheid: Dit zegt iets over in hoeverre de uitvoering van een maatregel technisch haalbaar is t.o.v. de functionele eisen van het project. Functionele eisen bepalen de kwaliteitsprestaties waaraan het eindresultaat moet voldoen (Pianoo, 2020). In dit project, kan dit een bepaalde kwaliteitsborging zijn. Functionele eisen van de projecten zijn gedefinieerd door de betrokken partijen. Het criterium in beoordeling van deze indicator is dus het gemak in de realisatie van een maatregel, terwijl er niet veel werkdruk is op de werknemers (zie verder *Paragraaf 4.3.4*).

Losmaakbaarheid: Dit zegt iets over in hoeverre (een onderdeel van) een structuur kan worden gedemonteerd. Losmaakbaarheid helpt bij het modulair bouwen dat zorgt voor het gemak in vervanging van een onderdeel of een structuur (HNN, 2024). Vervolgens kunnen reparaties en onderhoud makkelijker en met minder kosten worden gemaakt. Daarnaast nemen hierbij de kansen toe dat een onderdeel in de toekomst kan worden hergebruikt (HNN, 2024) (zie verder *Paragraaf 4.3.3*).

Levensduur: Dit speelt een essentiële rol in het bepalen van de milieu- en economische prestatie van een maatregel in de hele levenscyclus ervan (Ji et al., 2021). Levensduur biedt invloedrijke inzichten aan, zoals hoe vaak onderhoud van de materialen nodig zijn of voor hoe lang de materialen bruikbaar zijn voordat ze moeten worden vervangen. Deze allebei hebben impact op de totale milieu-impact, financiële kosten en de vindbaarheid in een project (Ji et al., 2021). Dus hoe langer de levensduur, hoe beter. De levensduur van een materiaal wordt uit de literatuur en materiaalpaspoort gehaald.

Weerstand tegen extreem weer: Hier ligt de focus op de weerstand van de gebruikte materialen tegen de extreme weersomstandigheden, zoals hitte, droogte en wateroverlast, die vaker en sterker gebeuren in het gevolg van klimaatverandering (Neilson et al., 2020). Daarom is het van belang dat er rekening wordt gehouden met het weer om tegen daarvan resistent te zijn, wat een groot deel is van klimaatadaptatie. Het materiaalpaspoort van de materialen laat zien hoe weerbestendig die zijn, en dit wordt gebruikt in de beoordeling binnen deze indicator (zie verder *Paragraaf 4.3.4*).

De definitieve indicatoren van deze DSS zijn te zien in *Tabel 2*. Zoals te zien, bestaan er twee typen en twee vormen van indicatoren. De kwantitatieve indicatoren zijn degenen die kunnen worden berekend door beschikbare methoden, bijv. de totale kostprijs van een maatregel in de bouwfase (E1). De kwalitatieve indicatoren in dit rapport zijn de indicatoren die niet worden gekwantificeerd, omdat ze subjectief zijn zoals esthetiek (S2), of hun kwantificering langdurige berekeningen bevat zoals maakbaarheid (T1). Daarnaast kunnen cost indicators en benefit indicators onderscheiden worden. Een *Benefit Indicator* betekent dat hoe hoger het resultaat, hoe beter, bijv. hoe meer CO₂-besparing (M3), hoe voordeliger. Een *Cost Indicator* is in tegenstelling tot een Benefit Indicator, bijv. hoe lager de onderhoudskosten (E2), hoe voordeliger.

Tabel 2: De beoordelingsindicatoren van de DSS. Alam Bhuiyan & Hammad (2023); Alavi et al. (2021); Alwafi (2022); Bansal et al. (2017); Dyson et al. (2023); Hatefi et al. (2021).

Aspect	Indicator	Type	Vorm
Milieu-duurzaamheid	M1: Primaire Abiotische Grondstoffen Uitgespaard	Kwantitatief	Benefit
	M2: MKI-besparing	Kwantitatief	Benefit
	M3: CO ₂ -besparing	Kwantitatief	Benefit
	M4: Bescherming van Diersoorten en Ecosystemen	Kwalitatief	Benefit
Economische Duurzaamheid	E0: Opschaling (Knock-Out Indicator)	Ja/Nee	KO
	E1: Kostprijs in de Bouwfase	Kwantitatief	Cost
	E2: Onderhoudskosten	Kwantitatief	Cost
	E3: Restwaarde	Kwantitatief	Benefit
Sociale Duurzaamheid	S1: Arbeidsmarktcapaciteit	Kwalitatief	Benefit
	S2: Esthetiek	Kwalitatief	Benefit
	S3: Imago	Kwalitatief	Benefit
Technische Indicatoren	T1: Maakbaarheid	Kwalitatief	Benefit
	T2: Losmaakbaarheid	Kwantitatief	Benefit
	T3: Levensduur	Kwantitatief	Benefit
	T4: Weerstand tegen Extreem Weer	Kwalitatief	Benefit

4.3 Beoordelingstechnieken

De beoordelingstechnieken in dit bouwproject bepalen de prestatie van de maatregelen binnen een bepaalde indicator. Dit kan de berekeningen in een kwantitatieve indicator zijn die tot een getal leiden, of de beoordeling van een kwalitatieve indicator zijn. Kwalitatieve indicatoren zijn subjectiever van aard en worden beoordeeld door gebruik te maken van de mening van experts in het Greenteam. Hier worden de vaak toegepaste beoordelingsmethoden die relevant zijn in deze DSS bediscussieerd.

4.3.1 Kwantitatieve duurzaamheidsberekening

In deze DSS wordt de totale milieu-impact van de maatregelen door MKI-besparing gecommuniceerd (*Paragraaf 4.3.1*). MKI is afkomstig van LCA, een van de bekendste methoden voor de beoordeling van milieuduurzaamheid (Pianoo, 2020). In een LCA wordt de totale impact van een project op het milieu berekend gedurende de gehele levenscyclus van dat project; van grondstofwinning tot en met het afvalbeheer aan het einde van de levensduur (Finnveden et al., 2009). LCA geeft een breed inzicht over allerlei zaken, inclusief (maar niet beperkt tot) de milieu-indicatoren van deze DSS, namelijk: primaire abiotische grondstoffen uitgespaard (Swart et al, 2015), MKI-besparing (Pianoo, 2020) en CO₂-besparing (Pianoo, 2020).

In *Figuur 6* zijn de diverse levenscyclusfases van een asset in een LCA-berekening te zien, namelijk: productie, bouw, gebruik, sloop, en hergebruik. Deze fases zijn verder verdeeld in sub-fases om de resultaten zo nauwkeurig mogelijk te maken. Bijvoorbeeld, de productiefase zelf de volgende bevat: grondstofwinning, transport naar producent, en productieprocessen (*Figuur 6*). De ontwikkeling van een LCA bevat een paar stappen, namelijk: (1) Het definiëren van het doel en de opvang van de LCA, (2) Data-verzameling en data-berekening, en (3) Impact-beoordeling (ISO-14040, 2004; ISO-14044, 2006). Een belangrijke stap van LCA ligt in de data-verzameling en gaat over de *Inventory Analysis*. Inventory geeft inzicht over alle gebruikte materialen in een project (ISO-14040, 2004). In dit project is de inventory van de maatregelen relevant, en de hoeveelheid van elk materiaal.



Figuur 6: De levenscyclusfases van een asset in de LCA-berekening. Figuur uit Pianoo (2020).

De volledige berekening en verwerking van een LCA kan veel tijd en geld kosten, wat niet altijd haalbaar is voor alle bedrijven. Daarom kiezen bedrijven soms voor een alternatief hiervoor. In dit project wordt MKI toegepast voor kwantificering van de milieueffecten van de maatregelen. MKI is een LCA-alternatief dat vaak toegepast is in de Nederlandse infrasector, en bevat de LCA-delen die de meeste impact hebben binnen de infraprojecten. Hiermee wordt de langdurige LCA-berekeningen vermeden, en er is een consistente meetmethode voor de diverse partijen, om hun MKI-waarden te kunnen communiceren en vergelijken (Pianoo, 2020). Een MKI-berekening (voorbeeld te zien in *Figuur 7*) betreft de vermenigvuldiging van een LCA-berekening met de financiële waarde van een project (Pianoo, 2020). Financiële waarde zegt iets over de beoogde maatschappelijke kosten om de optredende milieueffecten; bijv. “het verlagen van de maximumsnelheid om de hoeveelheid stikstofuitstoot te verminderen” (Pianoo, 2020).

Milieueffect categorie:	Equivalente eenheid:	Hoeveelheid (eq.) A1 - A3:	Weegfactor (€/kg eq.):	Resultaat:
Functionele eenheid: MKI A1 - A3 van 1m ³ betonmortel C20/25				
1. Uitputting abiotische grondstoffen	kg Sb eq.	1.11E-4	€ 0,16	€ 0,00
2. Uitputting fossiele energiedragers	kg Sb eq.	3.39E-01	€ 0,16	€ 0,05
3. Klimaatverandering	kg CO ₂ eq.	1.17E+02	€ 0,05	€ 5,83
4. Aantasting ozonlaag	kg CFK 11 eq.	5.82E-06	€ 30,00	€ 0,00
5. Smogvorming	kg C ₂ H ₄ eq.	4.56E-02	€ 2,00	€ 0,09
6. Verzuring	kg SO ₂ eq.	5.30E-01	€ 4,00	€ 2,12
7. Vermesting	kg (PO ₄) ³ eq.	8.62E-02	€ 9,00	€ 0,78
8. Toxicologische effecten op de mens	kg 1,4-DB eq.	1.80E+01	€ 0,09	€ 1,62
9. Toxicologische effecten op zoetwaterorganismen	kg 1,4-DB eq.	4.81E-01	€ 0,03	€ 0,01
10. Toxicologische effecten op zoutwaterorganismen	kg 1,4-DB eq.	2.81E+03	€ 0,0001	€ 0,28
11. Toxicologische effecten op landorganismen	kg 1,4-DB eq.	1.88E-01	€ 0,06	€ 0,01

Figuur 7: Voorbeeld omkering LCA naar MKI voor 1m³ betonmortel. Figuur uit Pianoo (2020).

Om de nodige MKI-berekeningen te kunnen vinden, bestaan er meerdere bronnen; een daarvan is *Nationale Milieudatabase (NMD)*, een onafhankelijke organisatie, die helpt bij de realisatie van milieuprestatie van de bouwwerken (NMD, z.d.). Daarin zijn meerdere bouwmaterialen onderzocht en hun totale LCA- en MKI-scores zijn te zien. In NMD rapportages voor een materiaal zijn de volgende aanwezig (NMD, z.d.): productiedatum, bron van berekening, toelichtingen, eenheid, levensduur, categorie, LCA-waarde, MKI-waarde, met de berekenings-details die in *Figuren 6 en 7* zijn te zien.

4.3.2 Kwantitatieve kostenberekening

Drie van de economische indicatoren van deze DSS gaan over de kosten gemaakt in de verschillende fases van een project. Normaal gesproken gaan de besluitvormers met een ontwerp of oplossing, wat de minste investeringskosten bereikt (Schade, 2007). Dit lijkt een voordelige keuze, maar hier zijn de onderhoudskosten niet in meegenomen. Een *Life Cycle Costing (LCC)* berekent alle kosten van een oplossing in de hele levenscyclus ervan, dat helpt met de identificering van de voordeligste oplossing (Schade, 2007). In een LCC-berekening zijn de kosten in drie aparte levensfasen gecommuniceerd,

namelijk: bouwfase, onderhoudsfase en levenseinde (Gluch & Baumann, 2004). Dit zijn precies de eerste drie economische indicatoren in de DSS van dit project.

De berekeningen binnen een LCC zijn anders voor de investeringkosten vergeleken met toekomstige kosten. De investeringskosten worden berekend met de huidige kosten in de markt, maar in de toekomst hebben verschillende factoren zoals inflatie, een grote impact op de marktprijzen. Hiervoor worden twee begrippen *Inflation-rate* en *Discount-rate* gebruikt om de *Net Present Value (NPV)* van de toekomstige kosten te kunnen berekenen (Mearig et al., 1999). *Inflation-rate* beduidt de rate van de stijging in de marktprijzen, en *discount-rate* bepaalt de ware waarde van het geld dat in de toekomst is besteden (Mearig et al., 1999). Aansluitend maakt NPV het mogelijk om de toekomstige kosten met de huidige kosten te vergelijken en de LCC-waarde te vinden. De berekening van de NPV- en LCC-waarden zijn te zien in de onderstaande (Mearig et al., 1999):

$$(1) NPV = \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+i-j)^t} \quad (2) LCC = C_0 + \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+i-j)^t}$$

Waar, C_0 = Initiële kosten; C_t = Kosten op jaar t ; t = Jaar; i = Discount-rate; j = Inflation-rate

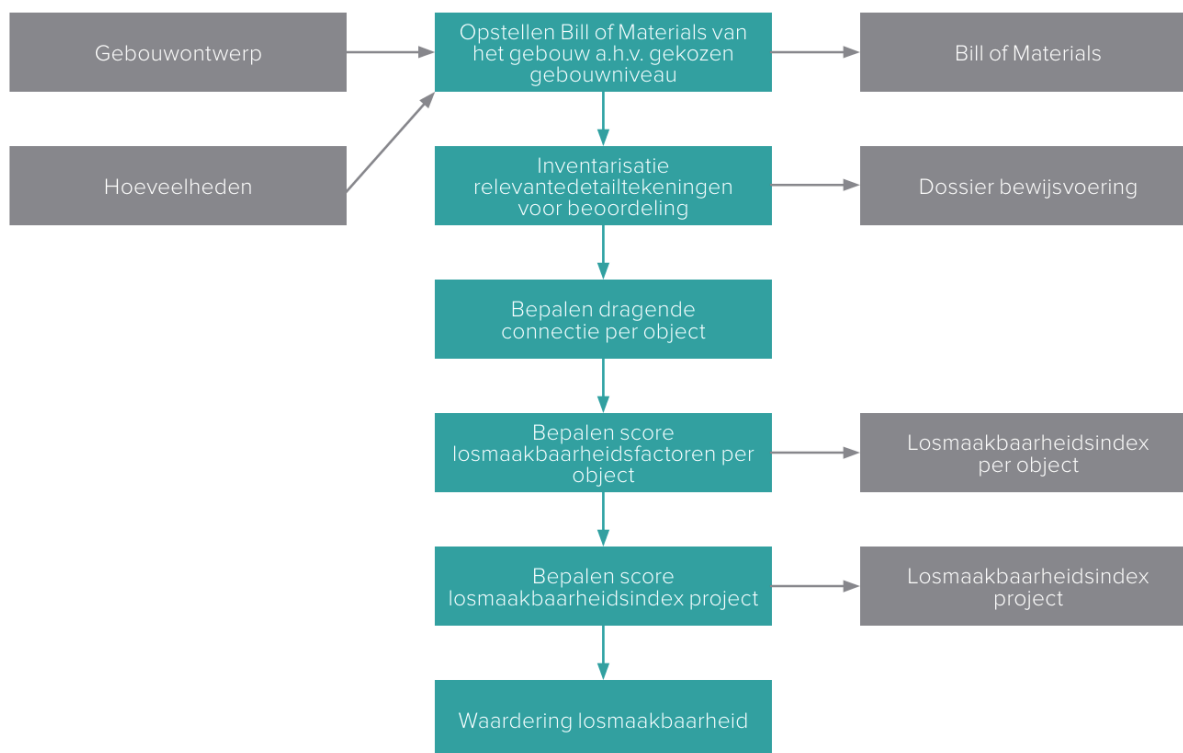
Niettemin wordt de LCC-waarde zelf niet binnen de DSS ingevoerd, omdat de drie economische indicatoren van deze DSS geven deze waarde expliciet aan voor elk van de levensfasen. Op deze manier hebben de besluitvormers de mogelijkheid om meer of minder belang te geven aan een bepaalde levensfase. Als input voor deze LCC, wordt dezelfde inventory van de vorige paragraaf (MKI) gebruikt die alle gebruikte materialen in een maatregel aangeeft. Daarnaast zijn er aspecten die kunnen worden opgenomen in de afbakening van deze LCC (te zien in *Tabel 3*). Omdat de volle berekening van LCC niet een wens in dit project is, worden de kosten in de drie levensfasen berekend, zonder diep onderzoek naar elke subcategorie, en zonder toepassing van discount- en inflation-rates.

Tabel 3: Componenten van een LCC. Gluch & Baumann (2004); Martinez-Sanchez et al. (2015); Rebitzer & Hunkeler (2003); Schade (2007).

Bouwfase	Onderhoudsfase	Levenseinde
Materiaalkosten	Materiaalkosten	Sloopkosten en Afvalbeheer
Transport	Arbeidskosten	Recycling en Hergebruik
Arbeidskosten		Arbeidskosten

4.3.3 Losmaakbaarheidsberekening

Aangezien dat losmaakbaarheid een technische indicator voor dit project is, kan het van nut zijn als er verder kennis wordt gemaakt met Meetmethodiek Losmaakbaarheid. Om een uniforme meetmethode voor losmaakbaarheid in de bouw te bereiken, heeft Alba Concepts in medewerking met diverse partijen, deze methode ontwikkeld. Hiermee zijn de ingewikkelde berekeningen vermeden en de methodiek berekent de losmaakbaarheids-index van een project op basis van de verbindingen tussen elementen, toegankelijkheid van de verbindingen, doorkruisingen en vorminsluitingen (Alba Concepts, 2019). De stappen van deze methodiek zijn te zien in *Figuur 8*.

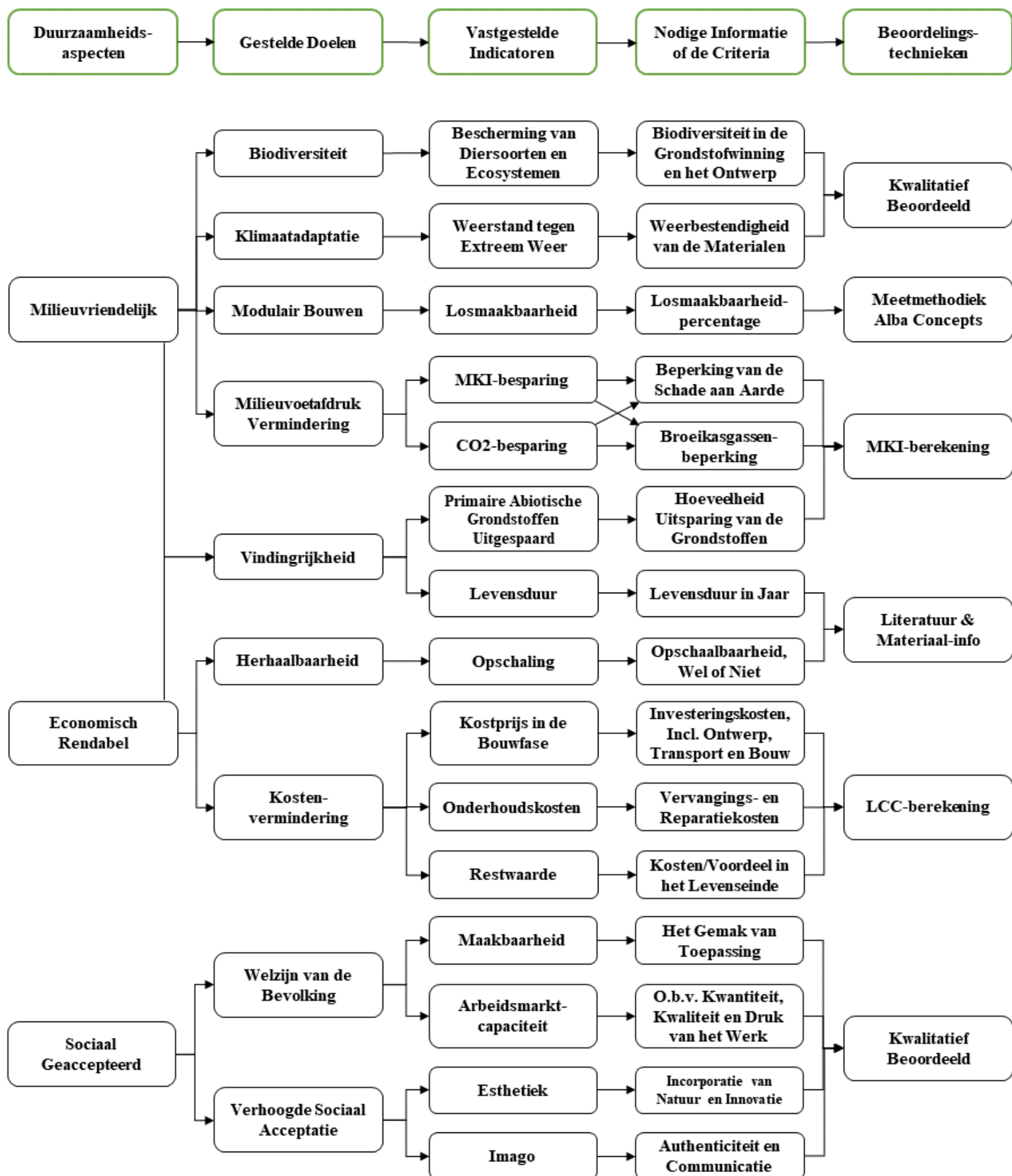


Figuur 8: Stappenplan bepalingmethodiek losmaakbaarheid. Alba Concepts (2019).

4.3.4 Kwalitatieve beoordelingsaanpak

Er zijn zes kwalitatieve indicatoren in deze DSS (*Sectie 4.2*). Voor meeste van dit soort indicatoren bestaat er geen techniek of methode van afweging. Hiervoor is de input en beoordeling van mensen nodig om een schatting te kunnen maken over de verwachte impact van een maatregel. Dit kan met verschillende methoden zoals: events, interviews, surveys, enz. (Krywkow, 2009). Voor deze opdracht is expert-opinion gekozen. De criteria voor de kwalitatieve beoordelingen werden in *Sectie 4.2* genoemd. Hierbij wordt de nodige input gecommuniceerd met de experts van Greenteam en ze worden gevraagd om hun beoordelingen te delen. Om de kwalitatieve indicatoren mee te kunnen nemen in het afwegingskader, worden deze indicatoren gekwantificeerd op een schaal van één tot en met vijf. In deze vaak toegepaste schaal betekent elk getal zoals volgt (LogAlto, 2024): 1: vrij slecht; 2: slecht; 3: neutraal; 4: passend; en 5: uitstekend. Deze schaal volgt de andere vaak toegepaste schaal van --, -, 0, + en ++ die ook bekend is in de praktijk.

Alle sociale indicatoren van dit project zijn kwalitatief en expert-opinion is de beoordelingstechniek die voor hen wordt toegepast. Daarnaast worden twee van de technische indicatoren, namelijk maakbaarheid (T1) en weerstand tegen extreem weer (T4), kwalitatief beoordeeld. Dit komt doordat er geen kwantiteit kan worden gegeven aan hoe maakbaar iets is. Bovendien kan de nauwkeurige kwantificering van de weerstand tegen extreem weer een langdurig onderzoek zijn dat in het geval en doelen van dit onderzoek niet haalbaar is. Bescherming van diersoorten en ecosystemen (M4) is de laatste kwalitatieve indicator van deze DSS. Deze kan wel worden gekwantificeerd door LCA (Damiani et al., 2023), maar als gevolg van de ingewikkeldheid en onnauwkeurigheid van deze kwantificering, wordt deze indicator eveneens kwalitatief beoordeeld. Uiteindelijk laat *Figuur 9* zien het verband tussen alle indicatoren met hun onderlinge beoordelingstechnieken en -criteria. Hierbij zijn ook de bedoelingen voor het opnemen van elke indicator aanwezig. Deze figuur werkt als een samenvatting voor wat tot nu toe in dit hoofdstuk was besproken.



Figuur 9: Het verband tussen duurzaamheidsaspecten, doelen, indicatoren, criteria en technieken.

4.4 Integrale beoordeling van de maatregelen

Voor de integratie van verschillende aspecten van duurzaamheid wordt hier een *Multi-Criteria Decision-Making (MCDM)* toegepast. MCDM is een systematische aanpak voor problemen met variërende mate van structuur (Eom, 1999) die passend is voor de integrale afweging van duurzaamheid (Zavadskas et al., 2018). Deze methode levert besluitvormers een geïnformeerde aanbeveling, die de diverse alternatieven (hier, duurzaamheidsmaatregelen) op bepaalde criteria (hier, indicatoren) beoordeelt (Chai et al., 2013). Aangezien zowel kwalitatieve als kwantitatieve indicatoren in dit project aanwezig zijn, kan het gebruik van *Analytic Hierarchy Process (AHP)* van grote hulp zijn (Chai et al., 2013; Wedley, 1990). AHP is een van de meest toegepaste technieken van MCDM, die *pairwise comparisons* van de indicatoren samen met expert-opinion gebruikt; en dit maakt het meten van de kwalitatieve indicatoren mogelijk (Chai et al., 2013). AHP staat toe dat de besluitvormers hun besluit op een objectieve manier te nemen (Alonso & Lamata, 2006). Voor de juiste uitvoering van AHP, worden hier Saaty (1990) en Wedley (1990) gevolgd, die over de ontwikkeling en toepassing van AHP gaan. Meerdere artikelen passen AHP toe voor de beoordeling van duurzaamheid, die kunnen van grote hulp zijn in de opstelling van deze DSS (Alam Bhuiyan & Hammad, 2023; Bansal et al., 2017; Rajabi et al., 2022; Wang et al., 2012). Hoewel de gewichtsbepaling-proces van AHP hier niet toegepast is, wordt de integrale afweging van de maatregelen nog door AHP uitgevoerd. Dit proces wordt verder in *Sectie 5.1* bediscussieerd.

4.5 Vormgeving van de DSS

Het eindontwerp van de DSS in deze opdracht zal worden bereikt door iteratie van een feedbackloop met expert-opinion. De eenvoud van het ontwerp is hier het hoofddoel dat tot het gemak bij gebruik leidt. Een ideaal ontwerp van een DSS de volgende bevat (Fildes et al., 2005): 1) acceptabel voor gebruikers; 2) gemakkelijk in het gebruik; 3) biedt een brede reeks van faciliteiten; 4) voldoet aan alle gestelde doelen voor het ontwerp; en 5) bevordert de juiste mix van oordeel en statistische methoden. Verder is het voorzien van eenvoudig bereikbare kwantitatieve schattingen in dit soort tools van groot belang, dat wordt gerealiseerd door het volgende (Fildes & Beard, 1992): i) eenvoudig aanpasbaarheid; ii) vaardigheid om zowel een individuele element als de combinatie van elementen te verwerken en beoordelen; iii) een dynamische beoordeling die de impact van de tijd in de gaten heeft, in plaats van een statische schatting die alleen waar is voor een bepaald tijdstip. Om deze behoeften te kunnen beantwoorden, is de beslissing genomen om deze DSS in *Microsoft Excel* te ontwikkelen. Dit komt door de relatief hoge bekendheid van Excel door allebei de praktische en academische werelden. De informatie uit deze sectie wordt in *Sectie 5.2* voor de evaluatie van de DSS gebruikt, naast de doelstellingen voor een oplossing (*Activity 2*) die in *Sectie 3.3* werden vastgesteld.

5. Structuur en interface van de DSS

In dit hoofdstuk wordt de DSS van dit onderzoek ontwikkeld, geëvalueerd en gecommuniceerd. Hier wordt ten eerste de ontwikkeling van de DSS beschreven. Daarna wordt de DSS geëvalueerd door de gestelde ontwerpeisen. In het einde wordt bediscussieerd hoe en waarom deze DSS van nut kan zijn.

5.1 Activity 3: Ontwerp en ontwikkeling

Hier wordt de ontwikkeling van deze DSS behandeld met hoe deze DSS werkt, hoe een gebruiker moet ermee omgaan, hoe de indicatorsgewichten zijn bepaald en hoe de maatregelen met elkaar zijn vergeleken om de beste mogelijke maatregelen te kunnen identificeren. Hiervoor is deze DSS onder meerdere ontwerpcyclus gegaan (beschreven in *Hoofdstuk 2*) om dit final ontwerp te bereiken. In *Bijlage B* zijn drie versies van de DSS te zien met welke verbeterstappen er zijn gedaan. Vervolgens gebruikt *Paragraaf 5.2.3* deze versies om de evaluatie van de DSS te uitvoeren.

5.1.1 Ontwerp van de DSS

Gebaseerd op de doelstellingen voor een oplossing (*Activity 2 in Sectie 3.3*) en *Sectie 4.5*, moet het ontwerp van deze DSS zo eenvoudig mogelijk zijn om het klaar te maken voor het praktijkgebruik. De processen in de dataverzameling voor de inhoud van de DSS waren al in *Hoofdstuk 4* behandeld, zoals het bepalen van de indicatoren en de beoordelingstechnieken. Deze sectie focust meer op de vormgeving van de DSS. *Figuur 10* geeft een overzicht van de interface van DSS, waar een paar elementen zijn te zien, zoals volgt:

Input-tabel: In de linkerkant, waar de diverse duurzaamheidsmaatregelen worden ingevoerd. In de bovenkant van de tabel zijn de vastgestelde indicatoren voor dit project genoemd, met aangeraden eenheden daarvoor. Deze eenheden zijn aangeraden voor de eenduidigheid van gegevens, maar vanwege de normalisering van de gegevens (*Paragraaf 5.1.3*), kunnen de eenheden worden gewijzigd door de gebruikers, en dus hoeven deze eenheden niet dezelfde worden gehouden. Bovendien worden de maatregelenamen in de linkerkant van de tabel gedefinieerd en hun input voor de indicatoren ingevuld. In de figuur zijn drie maatregelen als voorbeeld met fictieve waarden ingevoerd.

Prestatie-scores: In de rechterkant en in de onderkant, waar de overall-scores van de ingevoerde maatregelen worden vertoond. Deze scores zijn afkomstig van de berekeningen in aparte tabs die over gewichtsbepaling (*Paragraaf 5.1.2*) en de integrale scores van de maatregelen (*Paragraaf 5.1.3*) gaan. Zoals te zien, staan de prestatie-scores in twee tabellen, een is geordend per positie van de maatregel in de tabel en de andere per rangorde van de maatregelen. Daarnaast zijn twee illustraties ingebouwd om een beter gevoel van de prestatie van maatregel op te leveren. *Paragraaf 5.1.3* behandelt verder hoe een gebruiker met deze scores moet omgaan.

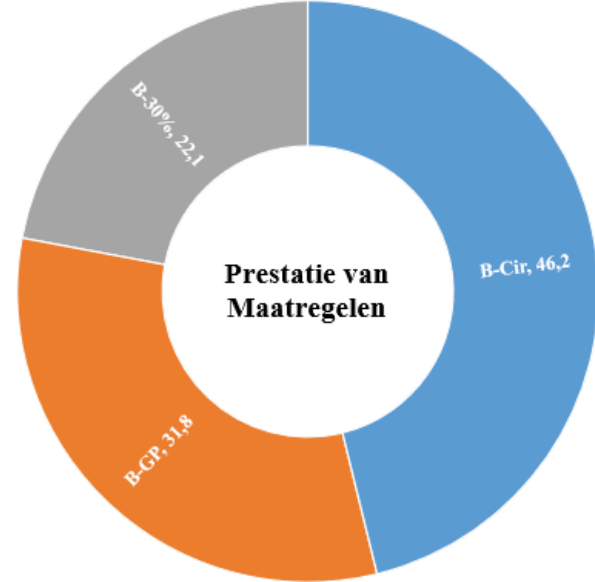
Instructies voor het gebruik: Er bestaan instructies voor de invoering van de gegevens die moeten worden beschouwd. Deze punten zijn gemerkt in de verificatie van de DSS, door invoering van allerlei waarden om de limieten van de DSS te kunnen vinden. Deze instructies zijn aanwezig in de DSS in rood (linkerkant onder in *Figuur 10*) en ze worden verder uitgelegd in *Paragraaf 5.2.1*.

Maatregelenamen: Uiteindelijk worden de verschillende maatregelen gecodeerd om het gebruik van de DSS eenvoudiger te maken, in plaats van MR1, MR2, enz. Deze namen worden in de rechterkant boven van de DSS ingevuld (te zien *Figuur 10*) als een gids over wat elke code betekent. Bijvoorbeeld, geopolymerbeton (een maatregel in dit project) is hier “B-GP” genoemd.

	Hoeveelheid Materiaal	Opschaalbaar	Kostprijs in de Bouwfase	Onderhoudskosten	Matrivaalwaarde	Kosten in het Levensende	Primaire Abiotische Grondstoffen Uitgespaard	MKI-besparing	CO2-besparing	Biodiversiteit	Arbeidsmarktpactiteit	Esthetiek	Imago	Maaikbaarheid	Lommaakbaarheid	Levensduur	Weerstand tegen Extrem Weer
Indicatio	H	E0	E1	E2	E3+	E3-	M1	M2	M3	M4	S1	S2	S3	T1	T2	T3	T4
Eenheid	m3	0 of 1	€	€	€	€	Kg	€	kg eq.	1 t/m 5	1 t/m 5	1 t/m 5	1 t/m 5	1 t/m 5	%	jaar	1 t/m 5
B-30%	600	1	5000	100	1000	5000	5000	500	500	500	2	2	2	2	50	5	2
B-GP	600	1	3000	100	3000	4000	3000	1000	1000	1000	3	3	3	3	75	10	3
B-Cir	600	1	2000	100	2000	3000	1000	1000	3000	3000	5	5	5	5	90	20	5
MR4																	
MR5																	
MR6																	
MR7																	
MR8																	
MR9																	
MR10																	
MR11																	
MR12																	
MR13																	
MR14																	
MR15																	
MR16																	
MR17																	
MR18																	
MR19																	
MR20																	
MR21																	
MR22																	
MR23																	
MR24																	
MR25																	
MR26																	
MR27																	
MR28																	
MR29																	
MR30																	

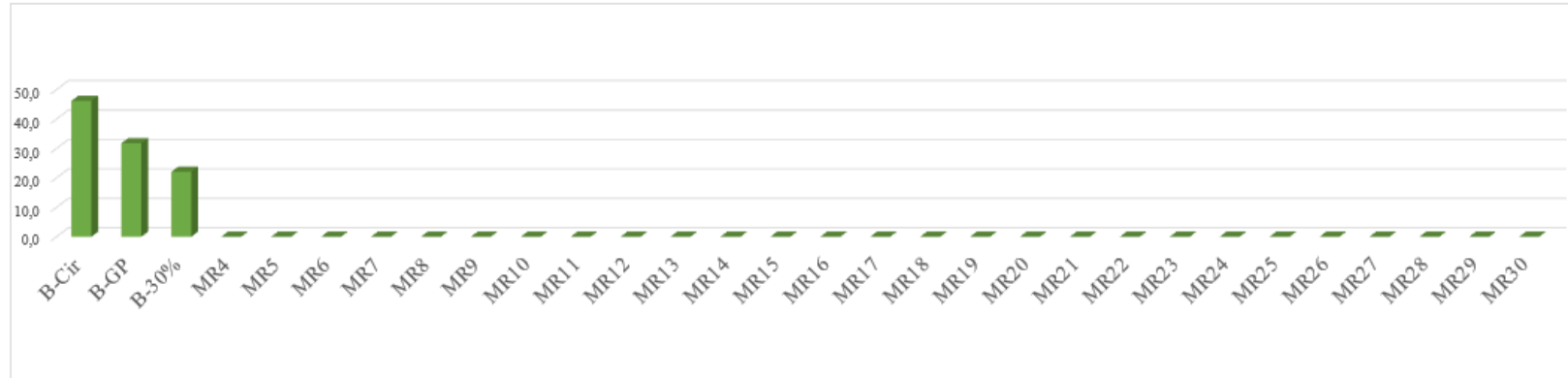
Maatregelenamen	B-30% = Beton met Betongranulaat 30% B-GP = Geopolymeerbeton B-Cir = Circuton
-----------------	--	-----	-----

MR-Scores		MR-Rankings		
MR	Score	R	MR	Procent
B-30%	0,221	1	B-Cir	46,2
B-GP	0,318	2	B-GP	31,8
B-Cir	0,462	3	B-30%	22,1
MR4	0,000	4	MR4	0,0
MR5	0,000	5	MR5	0,0
MR6	0,000	6	MR6	0,0
MR7	0,000	7	MR7	0,0
MR8	0,000	8	MR8	0,0
MR9	0,000	9	MR9	0,0
MR10	0,000	10	MR10	0,0
MR11	0,000	11	MR11	0,0
MR12	0,000	12	MR12	0,0
MR13	0,000	13	MR13	0,0
MR14	0,000	14	MR14	0,0
MR15	0,000	15	MR15	0,0
MR16	0,000	16	MR16	0,0
MR17	0,000	17	MR17	0,0
MR18	0,000	18	MR18	0,0
MR19	0,000	19	MR19	0,0
MR20	0,000	20	MR20	0,0
MR21	0,000	21	MR21	0,0
MR22	0,000	22	MR22	0,0
MR23	0,000	23	MR23	0,0
MR24	0,000	24	MR24	0,0
MR25	0,000	25	MR25	0,0
MR26	0,000	26	MR26	0,0
MR27	0,000	27	MR27	0,0
MR28	0,000	28	MR28	0,0
MR29	0,000	29	MR29	0,0
MR30	0,000	30	MR30	0,0



Instructies voor het Gebruik

- Voor H, bepaal een uniforme eenheid en geef de hoeveelheid van dat soort materiaal aan (bijv. per een station). Dit heeft geen impact op de scores maar is in de kaartjes vertoond.
- Voor E0, voer in 1 als opschaalbaar, en 0 als niet opschaalbaar.
- Voer alleen de waarde in, geen eenheid of Euroteken daarmee.
- Voer geen negatieve getalen in.
- Als er geen waarde is, voer in een verwaarloosbare waarde i.p.v. 0.
- De cells niet verplaatsen of knippen. Kopieren en uitbreiden mag.
- Let op de aangegeven hoeveelheden.
- Vul in ten minste twee maatregelen om de output te krijgen.
- Vul in alle indicatoren voor een maatregel om de output te krijgen.
- Bewaar uw input ook ergens anders behalve hier voor de zekerheid.



Figuur 10: Overzicht van de interface van de DSS van dit onderzoek.

5.1.2 Gewichtsbepaling voor de indicatoren

De integrale beoordeling van deze DSS wordt bepaald door middel van een MCDM-methode, namelijk AHP. AHP bestaat uit verschillende stappen die tot de relatieve integrale score van de maatregelen leiden. Dit proces begint met het bepalen van de relatieve gewichten van de duurzaamheidsindicatoren. Daarna worden deze gewichten gecheckt voor consistentie. Uiteindelijk worden de maatregelen ingevoerd om de relatieve ranglijst van de maatregelen te bepalen. Door de ingewikkeldheid van de AHP-methode, zijn de twee eerste stappen van AHP (gewichtsbepaling en consistentie-check) niet toegepast in deze DSS. Deze twee stappen zijn wel onderzocht en zijn te zien in *Bijlage A, Figuren A.1 t/m A.8*. In plaats daarvan en om de DSS eenvoudiger te maken worden hier expert-beoordeelde gewichten gebruikt voor de definitieve versie van de DSS (*Tabel 4*). Deze gewichten zijn bepaald door de verdeling van de gemiddelde expert-scores (in de schaal van 1 t/m 5) voor elke indicator door de som van alle gemiddelde scores.

Hiervoor werden drie inputs gekregen van de experts in het Greenteam, die allemaal behalve S3 en T4 lijken om consistent te zijn. Maar ook bij S3 en T4 kan het worden begrepen dat verschillende experts en belanghebbenden aparte meningen hebben over hoe belangrijk een indicator is. Deze gewichten zijn dus bepaald door de input van slechts drie mensen, maar dit betekent niet dat ze van geen waarde zijn. Het feit dat deze drie experts de besluitvormers zijn in Project Reddyn, betekent dat deze gewichten, de einddoelen van dit project beter kunnen realiseren. Toch is deze beperkte input niet ideaal, en het is aangeraden dat gewichtsbepaling door de inputs van alle betrokken belanghebbenden wordt uitgevoerd. Daarbij wordt een hoger vertrouwen in de eindresultaten van de DSS bereikt.

Tabel 4: Expert-gewichten voor de duurzaamheidsindicatoren van de DSS.

Indicator	Ex. 1	Ex. 2	Ex. 3	Gemiddeld	Gewicht
M1: Primaire Abiotische Grondstoffen Uitgespaard	5	5	3	4,33	0,076
M2: MKI-besparing	3	4	4	3,67	0,064
M3: CO ₂ -besparing	5	5	3	4,33	0,076
M4: Bescherming van Diersoorten en Ecosystemen	5	5	5	5,00	0,088
E1: Kostprijs in de Bouwfase	5	4	3	4,00	0,070
E2: Onderhoudskosten	5	4	3	4,00	0,070
E3: Restwaarde	5	3	4	4,00	0,070
S1: Arbeidsmarktcapaciteit	3	2	4	3,00	0,053
S2: Esthetiek	2	2	3	2,33	0,041
S3: Imago	1	3	5	3,00	0,053
T1: Maakbaarheid	4	4	4	4,00	0,070
T2: Losmaakbaarheid	4	4	4	4,00	0,070
T3: Levensduur	5	5	4	4,67	0,082
T4: Weerstand tegen Extreem Weer	1	3	4	2,67	0,047

5.1.3 Integrale scores van de maatregelen

In de laatste stap van AHP wordt de relatieve rangorde van verschillende duurzaamheidsmaatregelen berekend. Hiervoor, na de invoering van de maatregelen, worden de gegevens genormaliseerd voor elke indicator. De beoordelingswaarden van de indicatoren in deze DSS komen uit verschillende schalen. Bijvoorbeeld, de kosten worden ingevoerd in Euros, de CO₂-besparing is gegeven in kg CO₂-eq, en de kwalitatieve scores komen uit de schaal van één t/m vijf. Na de normalisering van de getallen, liggen alle nieuwe waarden in het bereik van nul t/m één. Dit maakt de vergelijking van de waarden uit diverse indicatoren mogelijk; ongeacht of ze van aard kwantitatief of kwalitatief zijn (Saaty, 1990). Deze normalisering is gedaan door de onderstaande formules (te zien met fictieve gewichten en maatregelen in *Figuren A.9 en A.10 in Bijlage A*):

$$(3) \text{ Benefit Indicatoren: } r_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^m X_{ij}} \quad (4) \text{ Cost Indicatoren: } r_{ij} = \frac{(1/X_{ij})}{\sum_{i=1}^m (1/X_{ij})}$$

Waar,

r_{ij} = Genormaliseerde waarde

m = Het aantal ingevoerde maatregelen

x_{ij} = Beoordelingswaarde van de i -de maatregel in de j -de indicator

(Çelen, 2014)

Uiteindelijk worden de relatieve scores van de maatregelen bereikt door de vermenigvuldiging van de genormaliseerde gegevens van de maatregelen met de indicatorsgewichten (te zien met fictieve gewichten en maatregelen in *Figuur A.11 in Bijlage A*). De eindresultaten in deze vergelijking zijn relatieve prestaties van de maatregelen vergeleken met elkaar. Elke maatregel krijgt een percentage als de eindscore, waar alle deze percentages tellen op 1. Na de overall afweging van de maatregelen, kan een minder belangrijke maatregel worden verwijderd en de afweging wordt uitgevoerd zonder die maatregel (Saaty, 1990). Dit proces kan worden herhaald totdat tien of vijf beste maatregelen zijn geïdentificeerd. Dan kan de beslissing worden genomen over welke maatregel de meeste impact heeft.

Als een korte samenvatting en om de haalbaarheid van de maatregelen te checken, zijn naast de eindscores, prestatie-kaartjes ontwikkeld die verder helpen met het nemen van een besluit (*Figuur 11*). Deze kaartjes geven de informatie van de maatregelen aan, die in Project Reddyn van groot belang is. Deze informatie is de volgende: rang, naam, hoeveelheid per station, prestatie-score, de kosten per levenscyclus, MKI-besparing, grondstof-uitsparing, maakbaarheid, losmaakbaarheid, biodiversiteit en levensduur. Hoewel deze indicatoren allemaal zijn opgenomen in de DSS, hebben ze grote impact op de haalbaarheid van een maatregel. Bijvoorbeeld, een maatregel kan een zeer hoge eindscore hebben, maar tegelijkertijd meer dan de begroting van het project kost. In dat geval zou de maatregel sowieso niet worden geïmplementeerd. Deze kaartjes zullen ervoor zorgen dat er meer dan alleen een score is beschikbaar voor de definitieve besluitvorming.

1	B-Cir	Hoeveel	600 m3	Score	46,2 %
Kosten in Bouwfase	2000 €	MKI-besparing	1000 €	Maakbaarheid	5 /5
Onderhoudskosten	100 €	Grondstofuitsparing	1000 Kg	Losmaakbaarheid	90 %
Rest-waarde	-1000 €	Bio-diversiteit	3 /5	Levens-duur	20 jaar

Figuur 11: De prestatie-kaartjes van de maatregelen. (Fictieve waarden)

5.2 Activity 4&5: Demonstratie & Evaluatie

Deze sectie behandelt de demonstratie en evaluatie van de DSS. Deze stap is van groot belang omdat hier wordt bepaald wanneer de DSS aan alle ontwerpdoelen voldoet. Hiervoor wordt gebruikgemaakt van de herontwerp-cyclus die in *Hoofdstuk 2* was geïntroduceerd, waarin aanpassingen worden gemaakt aan de DSS, totdat die een voldoende prestatie bereikt. Hierbij worden de verificatie en validatie van de DSS geanalyseerd, en de evaluatie-checklist voor de DSS wordt ingevuld.

5.2.1 Verificatie van de DSS

De verificatie van de DSS is hierbij de eerste stap in evaluatie van de DSS. In de verificatie wordt een model voortdurend gecheckt tijdens de ontwikkeling, wat laat zien of dat model correct is ontwikkeld (zonder fout). Terwijl validatie (*Paragraaf 5.2.2*) is uitgevoerd pas nadat het model klaar is. De verificatie van deze DSS is uitgevoerd door meerdere pogingen om de nauwkeurigheid en de limieten van de DSS te identificeren. Deze limieten zijn bijv. als een bepaald soort input niet juist wordt verwerkt in de DSS. Meeste deze limieten werden opgelost met aanpassingen die werden gedaan. Maar nog steeds blijven er een paar punten die moeten worden beschouwd in het gebruik van de DSS. Deze punten zijn in de DSS als “instructies voor het gebruik” gegeven in de DSS (*Paragraaf 5.1.1*). Dus dit zijn niet zomaar instructies, maar ze communiceren de limieten van de DSS die niet konden worden opgelost, vanwege de ingewikkeldheid van een oplossing of de limieten van Microsoft Excel (de omgeving van de DSS). Deze instructies zijn in het onderstaande uitgelegd:

- 1) Voer alleen de waarde in, geen eenheid daarmee: De DSS verwerkt getallen en niet de getallen met hun eenheden daarmee.
- 2) Voer geen negatieve getallen in: In de normalisering van de getallen (*Paragraaf 5.1.3*) tellen de getallen op om de som daarvan te berekenen. Als hier een negatief getal bestaat, dan wordt die niet opgeteld maar aftrekt, dat niet logisch is in de normalisering van de getallen.
- 3) Als er geen waarde is, voer in een verwaarloosbare waarde in plaats van 0: In de normalisering van de Cost Indicatoren (*Paragraaf 5.1.3*), worden de omkering van de getallen opgeteld ($1/x + 1/y + \dots$). Omdat $1/0$ niet gedefinieerd is in wiskunde, negert de DSS alle waarden die 0 zijn. Dit probleem geldt niet in Benefit Indicatoren, maar als de waarden voor alle maatregelen in een Benefit Indicator 0 zijn, dan wordt die indicator niet beschouwd in de eindscores. De gebruiker zelf bepaalt hier welk getal is verwaarloosbaar, omdat dit hangt af welke eenheid door de gebruiker is gegeven. Bijvoorbeeld, als

alle getallen voor een indicator tussen 100 en 200 liggen, dan is 0,01 verwaarloosbaar, maar als de getallen tussen 0,01 en 0,05 liggen, kan 0,000001 verwaarloosbaar worden neergezet.

4) De cellen niet verplaatsen of knippen, kopiëren en uitbreiden mag: De verwerkingen zijn gedaan op basis van de cell-posities. Verplaatsen en knippen onderbreken de verwerkingen.

5) Vul ten minste twee maatregelen in om output te krijgen: De scores in deze DSS zijn vergelijking-scores, en geen vaste scores voor de maatregelen (*Paragraaf 5.1.3*).

6) Vul alle indicatoren in voor een maatregel om de output te krijgen: Alleen als de input voor de maatregelen volledig is, kan de vergelijking correct worden uitgevoerd.

7) Bewaar uw input ook ergens anders behalve de DSS voor de zekerheid: Dit is aangeraden in het geval dat er een ongeluk is en/of de Excel Sheet ongewenst is afgesloten.

Als de laatste stap van verificatie wordt in *Paragraaf 5.2.3* een evaluatie-checklist ingevuld, om te checken of de DSS aan de gestelde ontwerpeisen (*Activity 2 in Hoofdstuk 2 en Sectie 4.5*) voldoet.

5.2.2 Validatie van de DSS

Voor de validatie van de DSS m.b.t. indicatoren en beoordelingstechnieken, worden in dit paragraaf drie duurzaamheidsmaatregelen (bedacht door Strukton) onderzocht (*Activity 4&5 in Sectie 3.3*). Zoals genoemd in *Hoofdstuk 1*, het uitgebreide onderzoek van maatregelen valt buiten de omvang van deze bachelor eindopdracht, daarvoor moeten de gegevens uit dit paragraaf nog verder worden onderzocht. Deze gegevens bieden toch een goed inzicht aan over wat de definitieve berekeningen zullen eruitzien, wat voldoende is voor een complete validatie van deze DSS. In deze validatie, wordt het concept van de DSS gebruikt dat aangeeft hoe een gebruiker met de DSS moet omgaan (*Figuur 5*).

Omdat alle deze drie maatregelen over het gebruik van diverse soorten beton gaan, krijgen een paar beoordelingen binnen bepaalde indicatoren dezelfde waarden. Bijvoorbeeld, alle soorten beton krijgen hier dezelfde score voor esthetiek (S2), omdat beton geen aanzienlijke invloed heeft op de esthetiek van de stations. Maar in de verificatiefase werd ervoor zorgen gemaakt dat de DSS geen problemen heeft met verschillende inputs en maatregel-typen. In het volgende worden de beoordelingen van deze maatregelen berekend.

Kostprijs in de bouwfase (E1)

Een onderscheid ontstaat tussen de kostprijzen van betonsoorten, gebaseerd op verschillende toeslagen die de leveranciers bepalen. Deze prijzen voor de drie betonsoorten zijn zoals volgt (Strukton): Beton met 30% granulaat €90/m³, Geopolymeer €100/m³ en Circuiton €95/m³. Voor de constructie van een energieverdeelstation is er gemiddeld ca. 600m³ beton nodig (Strukton). Dit leidt tot de onderstaande berekeningen voor de kosten in de bouw van een energieverdeelstation:

$$\text{Maatregel 1: } €90/\text{m}^3 * 600\text{m}^3 = \mathbf{€54.000}$$

$$\text{Maatregel 2: } €100/\text{m}^3 * 600\text{m}^3 = \mathbf{€60.000}$$

$$\text{Maatregel 3: } €95/\text{m}^3 * 600\text{m}^3 = \mathbf{€57.000}$$

Onderhoudskosten (E2), Levensduur (T3) en Losmaakbaarheid (T2)

Door de hoge sterkte en lange levensduur van beton, zijn er geen onderhoudskosten nodig voor het beton (Betonhuis, 2024). Dit komt doordat er geen reparaties of vervangingen nodig zullen zijn voor

beton in de levensduur ervan (ongeveer 100 jaar voor alle drie soorten). De drie betonsoorten zijn ook vergelijkbaar in de berekening van losmaakbaarheids-index, omdat deze index gaat om de losmaakbaarheid van een station en niet het beton zelf. Door de gelijkheid van deze index voor alle drie maatregelen, worden ze allemaal als default met 50% ingevoerd, dat leidt tot dezelfde score (1/3) voor alle maatregelen na normalisering (*Paragraaf 5.1.3*). Dit mag zolang alle maatregelen over het gebruik van beton gaan, dus indien andere maatregelen worden ingevoerd, moet de precieze losmaakbaarheids-index worden gevonden door meetmethodiek losmaakbaarheid (*Paragraaf 4.3.3*).

Restwaarde (E3)

Alle betonsoorten kunnen worden gerecycleerd en/of hergebruikt (Betonhuis, 2020). Hiervoor kunnen beter NPV-waarden worden berekend om de ware waarde van het geld in de toekomst te weten (*Paragraaf 4.3.2*). Maar zoals gezegd, is NPV niet een wens bij Project Reddyn. Door de berekeningen is de recycling en hergebruik van beton in maatregelen één en drie €30/m³ en in maatregel twee €15/m³ waard (Strukton). Dit leidt tot de restwaarde van **€18.000** voor maatregelen één en drie, en **€9.000** voor maatregel twee.

Primaire abiotische grondstoffen uitgespaard (M1), MKI- (M2) en CO₂-besparing (M3)

De input voor deze milieu-indicatoren zijn allemaal gevonden in NMD. Hier moet een materiaal precies zijn, omdat NMD inzicht geeft over precieze materialen, bijv. er zijn verschillende betonsterkten. Voor Project Reddyn wordt beton met cementtype CEM III en sterkte C30/37 gebruikt (Strukton). NMD heeft berekeningen voor twee soorten beton die hier van nut zijn (NMD, z.d.):

1. Betonmortel voor GWW - C30/37 CEM III

$$\text{MKI-waarde} = \text{€}26,99/\text{m}^3$$

$$\text{CO}_2\text{-waarde} = 212,3 \text{ kg}/\text{m}^3$$

2. Betonmortel voor GWW - C30/37 CEM III 30% granulaat

$$\text{Primaire Abiotische Grondstoffen Uitgespaard} = 0,198 \text{ g antimoon}/\text{m}^3$$

$$\text{MKI-waarde} = \text{€}26,82/\text{m}^3$$

$$\text{CO}_2\text{-waarde} = 211,738 \text{ kg}/\text{m}^3$$

Deze twee soorten kunnen worden gebruikt om de milieu-indicatoren van de eerste en derde maatregelen van dit rapport te berekenen, door de aftrek van de tweede soort van de eerste soort:

$$\text{Primaire Abiotische Grondstoffen Uitgespaard (M1)} = 0,198 \text{ g antimoon}/\text{m}^3 * 600\text{m}^3 = \mathbf{118,8 \text{ g an.}}$$

$$\text{MKI-besparing (M2)} = (\text{€}26,99/\text{m}^3 - \text{€}26,82/\text{m}^3) * 600\text{m}^3 = \mathbf{€102}$$

$$\text{CO}_2\text{-besparing (M3)} = (212,3 \text{ kg}/\text{m}^3 - 211,738 \text{ kg}/\text{m}^3) * 600\text{m}^3 = \mathbf{337,2 \text{ kg}}$$

Dit kan door het feit dat de eerste maatregel beton met 30% betongranulaat is en de derde maatregel is eveneens beton met ten minste 15% betongranulaat. Met de huidige limiet van 30% betongranulaat, kan deze maatregel ook beton met 30% betongranulaat worden vermoed. Maar de tweede maatregel van deze evaluatie is een nieuw betonsoort (nog onder ontwikkeling) dat gebruikt alternatieven voor cement. Er bestaat nog geen MKI-berekening voor zo'n betonsoort op NMD. De tweede maatregel is bedacht om de MKI-waarde te verminderen (BETONIEK, 2022), dat tot hogere uitsparing van grondstoffen en MKI- en CO₂-besparing leidt. Dus het wordt hier hogere fictieve waarden gegeven aan de milieu-indicatoren van maatregel twee, om de vergelijking te kunnen uitvoeren.

Arbeidsmarktcapaciteit (S1), Esthetiek (S2), Imago (S3), Bescherming van diersoorten en ecosystemen (M4), Maakbaarheid (T1) en Weerstand tegen extreem weer (T4)

Deze kwalitatieve indicatoren zijn in een meeting met de experts van het Greenteam beoordeeld (expert-opinion, *Sectie 4.3.4*). Zoals vermeld in *Tabel 5*, hebben de drie maatregelen vergelijkbare of dezelfde gewichten gekregen voor de meeste kwalitatieve indicatoren. Dit komt door de gelijkenis van deze indicatoren van aard. Ook invloedrijk is dat hier de score 3 in de schaal van 1 t/m 5 is aangenomen als neutraal, met geen (aanzienlijke) impact. Ten slotte vertoont *Tabel 5* alle berekende input als samenvatting.

Tabel 5: Input uit de drie onderzochte duurzaamheidsmaatregelen.

Indicator	MR1	MR2	MR3
M1: Primaire Abiotische Grondstoffen Uitgespaard	118,8 g an.	125 g an.	118,8 g an.
M2: MKI-besparing	€102	€130	€102
M3: CO ₂ -besparing	337,2 kg	360 kg	337,2 kg
M4: Bescherming van Diersoorten en Ecosystemen	3	3	3
E1: Kostprijs in de Bouwfase	€54.000	€60.000	€57.000
E2: Onderhoudskosten	€0	€0	€0
E3: Restwaarde	€18.000	€9.000	€18.000
S1: Arbeidsmarktcapaciteit	3	2	2
S2: Esthetiek	3	3	3
S3: Imago	3	4	5
T1: Maakbaarheid	5	3	2
T2: Losmaakbaarheid	50%	50%	50%
T3: Levensduur	100 jaar	100 jaar	100 jaar
T4: Weerstand tegen Extreem Weer	3	3	3

Na de invoering van de gegevens van *Tabel 5* in de DSS, zijn de volgende resultaten verwerkt:

Maatregel 1: Beton met betongranulaat 30%: 0,349 (Rang 1)

Maatregel 2: Geopolymeerbeton: 0,323 (Rang 3)

Maatregel 3: Circuton (conform CUR 127 aanbeveling): 0,328 (Rang 2)

Zoals te zien, scoort de eerste maatregel de hoogste en de tweede maatregel de laagste in deze vergelijking. Maar zoals verteld in het begin, de input voor deze maatregelen is niet diep uitgezocht, omdat dat buiten de omvang van dit onderzoek ligt. Niettemin is deze vergelijking met een vrij hoge nauwkeurigheid uitgevoerd, en het lage verschil in de scores komt doordat deze maatregelen nogal vergelijkbaar zijn. Dezelfde scores in sommige indicatoren voor alle maatregelen heeft hier ook een grote invloed gehad. Het moet dus dieper worden onderzocht of deze scores eigenlijk dezelfde moeten blijven, of er een onderscheid kan worden gemaakt in de scores voor de verschillende betonsoorten.

Wat hier wel is bekend, is dat maatregel één (beton met betongranulaat 30%) iets beter doet dan maatregel twee (geopolymeerbeton) en drie (circuton). Dit kan ook worden vermeld in *Tabel 5*, waar de beoordelingen van maatregel één, dezelfde of beter zijn dan de andere twee, vooral in maakbaarheid, wat een hoge impact heeft gehad op de eindscores. Beton met betongranulaat 30% is dus de maatregel met de meeste impact in deze vergelijking, met de input die beschikbaar was. Hoewel geen precieze vergelijking hier is uitgevoerd, laat deze validatie zien dat de DSS juiste verwerkingen maakt en is verenigbaar met de diverse soorten input die zullen worden ingevoerd.

5.2.3 Evaluatie-checklist van de DSS

Tijdens de ontwikkeling van de DSS, was de gewichtsbepaling een lastig proces om te ontwerpen. Hiervoor werden drie verschillende versies ontwikkeld om de best mogelijke versie te kunnen vinden. De eerste versie vindt AHP-gewichten en de input moet handmatig worden voorzien. De tweede versie vindt ook AHP-gewichten, maar dit proces is geautomatiseerd. De derde en definitieve versie past de AHP-gewichtsbepaling niet toe, om begrijpelijker te zijn. Inderdaad zijn er behalve gewichtsbepaling meerdere andere aanpassingen geweest aan de DSS, vooral tijdens de verificatiefase. Een van deze aanpassingen was bijv. de verdeling van de indicator restwaarde (E3) door twee nieuwe indicatoren materiaalwaarde (E3+) en de kosten in het levenseinde (E3-). Dit is gedaan omdat de DSS de negatieve getallen niet juist kan verwerken (*Paragraaf 5.2.1*). Restwaarde was de enige indicator die kon tot een negatief getal leiden en daarom was deze aanpassing toegepast. Maar de gewichtsbepaling was het proces waarin het meeste verschil was gemerkt tussen de versies.

De evaluatie van de drie gewichtsbepaling-versies (*Bijlage B*) wordt uitgevoerd door de invulling van de *Tabel 6*, inclusief de gestelde ontwerpeisen (*Activity 2* in *Sectie 3.3* en *Sectie 4.5*). Zoals te zien, voldoet de eerste versie alleen aan elf eisen uit twintig, wat betekent dat dit ontwerp ver is van de verwachtingen en is dus geen passend ontwerp. De tweede versie is verbeterd in een paar aspecten en voldoet aan vijftien eisen uit twintig, maar nog niet aan alle aspecten. Hoewel de derde versie geen AHP-gewichtsbepaling toepast, voldoet die aan alle twintig eisen vanwege het eenvoudiger en begrijpelijker ontwerp daarvan. Daardoor is er geen behoefte aan verdere ontwerpen, en dit ontwerp is de definitieve versie van de DSS. Ook te noemen is dat deze versies allemaal dezelfde interface gebruiken, die in *Paragraaf 5.1.1* was besproken en vertoond. Deze interface is eveneens door meerdere herontwerpen gegaan en is beschouwd in de evaluatie in *Tabel 6*.

Tabel 6: Evaluatie-checklist voor de versies van de DSS.

Doelstelling	DSS Versie	V1	V2	V3
1. De tool realiseert wat ervan verwacht is, op een juist en nauwkeurige manier. De DSS moet dus de maatregelen met de meeste impact m.b.t. integrale duurzaamheid juist kunnen identificeren.			✓	✓
2. De tool blijft werkzaam onder bepaalde omstandigheden en tijdsperiode. De DSS kan worden gebruikt in diverse omgevingen en blijft werkzaam voor zolang dat die open is.		✓	✓	✓
3. De tool is gemakkelijk gebruikt en begrijpelijk. De DSS moet door alle experts en niet-experts kunnen worden begrepen en gebruikt.				✓

Doelstelling	DSS Versie	V1	V2	V3
4. De tool presteert op een efficiënte manier m.b.t. tijd en middelen. Het is verwacht dat de DSS de resultaten (bijna) onmiddellijk verwerkt.			✓	✓
5. De tool is gemakkelijk aangepast om relevant en nuttig te blijven. Een gebruiker heeft de mogelijkheid de indicatoren of indicatorsgewichten wijzigen.			✓	✓
6. De tool is werkzaam als die op verschillende omgevingen worden geplaatst. De DSS moet op elk systeemtype (zoals laptops) werkzaam zijn.	✓	✓	✓	✓
7. De tool kan de gegevens beschermen en de onbevoegde toegang voorkomen. Een offline omgeving wordt gebruikt die voor een hogere beveiliging zorgt.	✓	✓	✓	✓
8. De tool functioneert met andere software, hardware en systemen. De DSS kan worden gebruikt in diverse systeemspecificaties.	✓	✓	✓	✓
9. De tool moet de drie pijlers van duurzaamheid opnemen, om de duurzaamheidsmaatregelen met de meeste impact te kunnen identificeren.	✓	✓	✓	✓
10. De tool moet op een eenvoudige manier worden ontwikkeld, om begrijpelijk te zijn in het gebruik en in de communicatie van de resultaten.				✓
11. De tool moet het effect van voorkeursmaatregelen uitschakelen om een onbevooroordeeld keuze te kunnen identificeren.	✓	✓	✓	✓
12. De tool moet op een generieke manier worden ontworpen, om voor andere onderzoeken nuttig te kunnen zijn.	✓	✓	✓	✓
13. De tool is acceptabel voor gebruikers.				✓
14. De tool biedt een brede reeks van faciliteiten.			✓	✓
15. De tool bevordert de juiste mix van oordeel en statistische methoden.	✓	✓	✓	✓
16. De tool realiseert eenvoudig kwantitatieve schattingen.	✓	✓	✓	✓
17. De tool kan zowel een individuele element als de combinatie van elementen verwerken en beoordelen.	✓	✓	✓	✓
18. De tool levert een dynamische beoordeling die de impact van de tijd in de gaten heeft.	✓	✓	✓	✓
19. De tool is op een verstaanbare manier in Microsoft Excel ontworpen.				✓
20. De tool voldoet aan alle gestelde doelen voor het ontwerp.				✓

5.3 Activity 6: Communicatie

Deze stap gaat over de communicatie van de DSS, die een specifiek ontwerp is om een oplossing aan te bieden, namelijk integrale duurzaamheid in de bouw van energieverdeelstations. Zoals behandeld in

dit rapport, de integratie van de drie pijlers van duurzaamheid is tegenwoordig een behoefte maar wel uitdagend, dat soms tot het vermijden van deze integratie leidt. De ontworpen DSS zal ervoor zorgen dat deze integratie makkelijker kan worden toegepast in de praktijk. Zoals besproken, was hier ook een vierde indicatorgroep toegevoegd (technische indicatoren) die de vergelijking nog preciezer maakt. Eveneens kan dit generieke ontwerp verdere vergelijkbare onderzoeken helpen m.b.t. de integrale duurzaamheid en/of de toepassing van de AHP-methode, wat garandeert dat naast praktijk, het theoretische deel van het onderzoek is aangepakt. Tijdens de ontwikkeling van de DSS, was het Greenteam vanuit Strukton geïnformeerd en gevraagd over de belangrijke ontwerpkeuzes. Hiermee zijn er oplossingen bedacht die de hoofdgebruikers bevredigen. De betrokkenheid van het Greenteam als de gebruikers en implementatie van hun mening zorgt ervoor dat deze DSS het hoofddoel ervan zal bereiken, dat is om te worden aangenomen door Strukton. Daarnaast is de mening van de begeleider uit UT opgenomen en aanpassingen zijn gemaakt om deze eindopdracht eveneens theoretisch-relevant te maken. Uiteindelijk wordt het ontwerp naast dit eindrapport overgedragen aan zowel de Universiteit Twente als de onderzoeksorganisatie, en Strukton als het stagebedrijf, middels een eindexamen voor de universiteit en een presentatie aan het Greenteam. Deze sessies zorgen ervoor dat er geen onduidelijkheden blijven over wat tijdens deze stage was gedaan en over wat het eindontwerp van de DSS wel kan en ook niet kan realiseren.

Discussie

Dit onderzoek ging in de meeste gevallen zoals verwacht, en waardevolle bevindingen werden gerealiseerd. Het eindontwerp kon ten slotte aan alle gestelde ontwerpeisen voldoen. Tegelijkertijd zijn er valkuilen tegengekomen. Hierbij zijn deze discussiepunten besproken.

Theoretische implicaties

De uitkomsten van dit onderzoek helpen met de invulling van een gap in de literatuur, namelijk de integratie van de drie pijlers van duurzaamheid in de bouw van energieverdeelstations. Zoals bediscussieerd, is er momenteel een gebrek aan een besluitvormingstool voor dit specifieke situatie. Bovendien kan het eindontwerp van deze DSS van nut zijn voor de ontwikkeling van soortgelijke tools in enig ander project in de bouwsector, bijv. de bouw van woongebouwen. Dit komt door het feit dat deze DSS op een generieke manier is gebouwd en met wat aanpassingen, kan worden herhaald voor verschillende situaties. Toch kan deze DSS een waardevol inzicht meebrengen voor andere organisaties die een onderzoek voeren over de energieverdeelstations. De ontwikkeling van deze DSS was uitgevoerd volgens een DSR-methodologie. Deze aanpak kan in andere situaties en organisaties worden gebruikt om zulke tools in het thema van duurzaamheid te ontwerpen. De beperkingen in dit onderzoek en de bijbehorende aanbevelingen (onder besproken) kunnen eveneens behulpzaam zijn voor een verder onderzoek naar duurzaamheid in de bouwsector.

Praktische implicaties

De output van deze DSS levert inzicht over welke duurzaamheidsmaatregelen de meeste impact hebben in de bouw van energieverdeelstations. De beslissingen over duurzaamheid zijn soms nog zonder een besluitvormingstool genomen. Dit leidt tot onzekerheid over of de beste maatregelen zijn gekozen. Anderzijds met een tool zoals deze DSS, is er een hoger niveau van zekerheid tijdens de besluitvorming. Daarnaast zijn de indicatoren in deze DSS grondig onderzocht en met het stagebedrijf vastgesteld. Door gebruik te maken van deze DSS, hebben de besluitvormers dus een kwantitatief inzicht over welke duurzaamheidsmaatregelen zij moeten implementeren. Dit leidt tot de realisatie van een output door de DSS, die de vergelijking van de maatregelen toestaat. Bovendien, door het begrijpelijke ontwerp van de DSS, kunnen de beslissingen eenvoudiger worden gepresenteerd aan de betrokken belanghebbenden, dat het makkelijker maakt om de beslissingen te rechtvaardigen.

Invloedrijke ontwerpbeslissing

Het hoofddoel was om een integrale afweging van duurzaamheid te bereiken. In dit onderzoek werd deze integratie neergezet als de drie pijlers van duurzaamheid. Maar er bestaan afwijkende definities voor duurzaamheid. Deze keuze van het duurzaamheidsbegrip heeft grote invloed gehad op de uitwerking van de DSS, en heeft zo sterke invloed op de besluitvorming over de maatregelen. Er moet dus in het begin van een verder onderzoek kritisch aandacht worden besteed aan wat duurzaamheid betekent. Daarnaast hebben de begrippen van duurzaamheid een enorme impact in de praktijk en hoe de beslissingen zijn genomen. Daarvoor zou het van nut zijn als ervoor wordt gezorgd dat een passende definitie is aangenomen door de bedrijven in hun projecten.

Onderzoeksbependingen en verder onderzoek

Het onderzoek kent door de opzet en randvoorwaarden verschillende beperkingen. Ten eerste levert de beperkte duur van een bachelor eindopdracht, tien weken, weinig mogelijkheden voor diepgravend onderzoek. Vanwege de integrale visie op duurzaamheid en de veelheid van indicatoren die daarbij komen kijken, zijn die indicatoren op een laag detailniveau behandeld. Voor een nauwkeurigere integrale duurzaamheidsafweging zou vervolgonderzoek nodig zijn naar de afzonderlijke indicatoren

van de DSS en hun onderlinge samenhang. Sommige van de indicatoren in deze DSS zijn niet door sterke methoden beoordeeld. Bijvoorbeeld, maakbaarheid is hierbij op een kwalitatieve manier en door expert-opinion beoordeeld. Bij deze expert-opinion waren er ook niet meerdere experts besproken. Door de subjectiviteit in deze aanpak, verschilt de beoordeling van maakbaarheid in een ander project met andere experts. De indicatoren in de sociale duurzaamheid zijn vooral onderontwikkeld in dit onderzoek. Sociale duurzaamheid is volgens ervaring het duurzaamheidsaspect waarop het minste aandacht is besteed, omdat het niet kwantitatief meetbaar is. Er stond nog een valkuil met betrekking tot de indicatoren. Sommige van de indicatoren in dit project hebben invloed op de anderen. Bijvoorbeeld, MKI-besparing bevat elf delen, twee daarvan zijn namelijk grondstof-uitsparing en CO₂-besparing. Niettemin zijn deze drie hierbij als drie aparte indicatoren vastgesteld, vanwege het grote belang daarvan. In een verder onderzoek moet er dus worden gezorgd dat de indicatoren elkaar niet overlappen.

Ten tweede was de AHP-methode beperkt toegepast, aangezien de gewichtsbepaling door experts is uitgevoerd. De gewichtsbepaling van AHP is een langdurig proces dat niet eenvoudig kan worden aangepast. Hiervoor was een systeem bedacht om deze gewichtsbepaling te automatiseren. Niettemin was hierbij een spanning tussen de objectiviteit van de methode en de toepasbaarheid in de praktijk. Voor een objectievere aanpak is het aan te raden om in toekomstig onderzoek, de AHP-gewichtsbepaling volledig en met betrokkenheid van de experts wordt toegepast. Op deze manier zou er meer draagvlak zijn voor de aanpak van de gewichtsbepaling.

Ten derde bleek er spanning te zijn tussen de eisen vanuit wetenschappelijk oogpunt, vanuit de universiteit en toepasbaarheid in de praktijk. In tegenstelling tot universitaire projecten, werkt men met mensen die meestal volle roosters of andere prioriteiten hebben. Daarom moeten de gesprekken worden ingepland een paar weken van tevoren. Het is echter soms lastig om deze meetings te voorspellen, wat tot het verkrijgen van enkele input bij e-mail leidt. Soms leidt dit zelfs tot het gebrek aan voldoende input, dat negatieve gevolgen heeft voor een onderzoek. Bovendien is er een afstand tussen de theoretische en praktische zeden van een onderzoek. De experts moeten hun besluiten aan alle betrokken belanghebbenden met succes kunnen uitleggen. Daarom moeten de werkwijzen zoveel mogelijk eenvoudig worden gehouden. De laatste aanbeveling gaat hierover en is om in het begin van onderzoek, een gesprek te voeren met de externe organisaties over de cultuur van de organisatie. Een goed begrip over de organisatie kan veel helpen met het bereiken van juist wat in een project verwacht is. Zo'n gesprek is ook aanbevolen met de begeleider uit de universiteit, omdat er eveneens theoretische verwachtingen bestaan naast de praktische.

Ten slotte, werden bij de evaluatie van de DSS, vooral de gestelde ontwerpeisen en de drie validatie-maatregelen onderzocht. Deze validatie-maatregelen gingen allemaal over het gebruik van duurzame beton soorten, namelijk: Beton met betongranulaat 30%, Geopolymeerbeton en Circuton. Hoewel er voortdurend gezorgd werd dat de DSS geen probleem heeft met diverse inputs, is de DSS niet diep geëvalueerd, door bijv. gevoeligheid-check. Volgens deze evaluatie voldoet de DSS aan alle gestelde doelen, maar verdere evaluaties kunnen inderdaad van nut zijn.

Conclusie

In dit onderzoek is een Decision Support System (DSS) ontwikkeld dat ontwerpers van energieverdeelstation ondersteunt bij een integrale afweging rondom duurzaamheidsmaatregelen. Om dit einddoel te kunnen realiseren, werden de deelvragen van dit onderzoek beantwoord. In het onderstaande zijn te zien hoe deze vragen dragen bij het bereiken van het onderzoeksdoel:

Deelvraag 1: Welke milieu-, economische en sociale duurzaamheidsindicatoren zijn de meest relevant in de constructie van energieverdeelstations?

De indicatoren werden gevonden door literatuuronderzoek naar de drie pijlers duurzaamheid, en verder afgestemd met het stagebedrijf. Dit heeft geleid tot vijftien indicatoren, waarvan er zes kwalitatief en negen kwantitatief van aard zijn. Wellicht zijn de indicatoren het meest invloedrijke deel van dit onderzoek, omdat de maatregelen uiteindelijk op basis van de indicatoren zijn beoordeeld.

Deelvraag 2: Hoe kunnen verschillende technieken worden toegepast voor de beoordelingen binnen de vastgestelde indicatoren?

De gekozen technieken in dit onderzoek zijn de meest relevante en haalbare technieken. Een passende selectie van de technieken, hielp bij de realisatie van de nodige input voor elke indicator. De belangrijkste technieken waren LCA-, MKI- en LCC-berekening. Deze technieken zijn gebruikt om de prestatie van de maatregelen binnen de indicatoren te kunnen kwantificeren.

Deelvraag 3: Hoe kan de integrale impact van de verschillende maatregelen worden berekend, met de toepassing van de gevonden technieken op de diverse duurzaamheidsindicatoren?

In dit onderzoek is gekozen voor een analytical hierarchy process (AHP) aanpak. AHP is een wegingsaanpak, waarbij besluiten kunnen worden genomen in projecten met zowel kwalitatieve als kwantitatieve indicatoren. Deze aanpak helpt bij de besluitvorming in een project waarbij veel aspecten met elkaar afgewogen moeten worden, door het verwerken van een integrale score. Hierbij werden de indicatorsgewichten bepaald door expert-opinion, input voor de maatregelen gegeven, en de scores verwerkt door gebruik te maken van AHP.

Deelvraag 4: Hoe moet de DSS van dit project eruitzien en eenvoudig worden gebruikt?

Door literatuur en gesprekken met de stageorganisatie waren meerdere ontwerpeisen geïdentificeerd. De invulling van een evaluatie-checklist liet zien dat het ontwerp aan alle gestelde eisen voldeed. Er was ook voor gezorgd dat de juiste verwerkingen zijn hierbij uitgevoerd, door een paar instructies voor het gebruik aan te bieden.

Hoofdvraag: Hoe zorgt een DSS voor de integrale afweging van diverse duurzaamheidsmaatregelen, met betrekking tot milieu-, economische en sociale duurzaamheid, in de bouw van energieverdeelstations?

Uiteindelijk leidden de deelvragen tot het antwoord van de hoofdvraag. De integrale scores voor duurzaamheid is de hoofd-output van deze DSS. Deze scores geven een beter inzicht over de prestatie van een duurzaamheidsmaatregel. De scores zijn verwerkt door de invloed van alle indicatoren uit de drie pijlers van duurzaamheid. Met zo'n besluitvormingstool is er een hogere zekerheid over de impact van de maatregelen vergeleken met de huidige situatie, waarin losse informatie op papier staat, zonder een helder verband daartussen. Nieuwe tools zoals deze DSS kunnen dus van grote hulp zijn in de verhoging van duurzaamheid, en de realisering van de wereldwijde duurzaamheidsdoelstellingen.

Bibliografie

- Alam Bhuiyan, M. M., & Hammad, A. (2023). *A hybrid multi-criteria decision support system for selecting the most sustainable structural material for a multistory building construction*. Sustainability, 15(4), 3128. <https://doi.org/10.3390/su15043128>
- Alavi, B., Taviana, M., & Mina, H. (2021). *A Dynamic Decision Support System for sustainable supplier selection in circular economy*. Sustainable Production and Consumption, 27, 905–920. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.015>
- Alba Concepts. (2019). *Circular Buildings - Meetmethodiek Losmaakbaarheid*. V 1.1, Alba Concepts.
- Alonso, J. A., & Lamata, M. T. (2006). *Consistency in the analytic hierarchy process: A new approach*. International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems, 14(04), 445–459. <https://doi.org/10.1142/s0218488506004114>
- Alliander. (z.d.-a). *About Alliander*. Alliander. Opgehaald op 26 april 2024 van: <https://www.alliander.com/en/organisation/>
- Alliander. (z.d.-b). *Mission and strategy*. Alliander. Opgehaald op 26 april 2024 van: <https://www.alliander.com/en/organisation/mission-and-strategy/>
- Alwafi, A. A. M. (2022). *Sustainable Material Selection Criteria Framework for Environmental Building Enhancement*. American Journal of Civil Engineering and Architecture, 10(1), 31-44.
- Ametepey, O., Aigbavboa, C., & Ansah, K. (2015). *Barriers to successful implementation of sustainable construction in the Ghanaian construction industry*. Procedia Manufacturing, 3, 1682–1689. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.988>
- Akadiri, P. O., & Olomolaiye, P. O. (2012). *Development of Sustainable Assessment Criteria for Building Materials Selection*. Engineering, Construction and Architectural Management, 19(6), 666–687. <https://doi.org/10.1108/09699981211277568>
- Bain, P. G., Kroonenberg, P. M., Johansson, L.-O., Milfont, T. L., Crimston, C. R., Kurz, T., Bushina, E., Calligaro, C., Demarque, C., Guan, Y., & Park, J. (2019). *Public Views of the sustainable development goals across countries*. Nature Sustainability, 2(9), 819–825. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0365-4>
- Bansal, S., Biswas, S., & Singh, S. K. (2017). *Fuzzy decision approach for selection of most suitable construction method of green buildings*. International Journal of Sustainable Built Environment, 6(1), 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2017.02.005>
- Beninde, J., Veith, M., & Hochkirch, A. (2015). *Biodiversity in cities needs space: A meta-analysis of factors determining intra-urban biodiversity variation*. Ecology Letters, 18(6), 581–592. <https://doi.org/10.1111/ele.12427>
- Betonhuis. (2020). *De Waarde van Circulair Beton*. Opgehaald op 12 juni 2024 van:

<https://betonhuis.nl/betonhuis/de-waarde-van-circulair-beton#:~:text=Beton%20is%20recyclebaar%2C%20betonproducten%20zijn,oude%20beton%20her%20te%20gebruiken.>

Betonhuis. (2024). *Duurzaam beton in de ontwerpfase*. Opgehaald op 12 juni 2024 van: <https://betonhuis.nl/betonhuis/duurzaam-beton-de-ontwerpfase#:~:text=Beton%20heeft%20een%20lange%20levensduur,bij%20herbestemming%20opnieuw%20worden%20gebruikt.>

BETONIEK. (2022). *Milieuaspecten en technische eigenschappen geopolymerbeton*. *Geopolymerbeton: hoe zit het nu?* 10–17. Opgehaald op 12 juni 2024 van: <https://pointer.kro-ncrv.nl/system/files/2022-12/Betoniiek%20okt%202022%20GPB.pdf>

Caspari, S., Eriksson, K., & Nåden, D. (2011). *The importance of aesthetic surroundings: A study interviewing experts within different aesthetic fields*. *Scandinavian Journal of Caring Sciences*, 25(1), 134–142. <https://doi.org/10.1111/j.1471-6712.2010.00803.x>

CBS. (2023). *Drie kwart van de ondernemers ervaart personeelstekort*. CBS.nl. Opgehaald op 19 mei 2024 van: <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2023/34/drie-kwart-van-de-ondernemers-ervaart-personeelstekort>

Çelen, A. (2014). *Comparative analysis of normalization procedures in TOPSIS method: With an application to Turkish deposit banking market*. *Informatica*, 25(2), 185–208. <https://doi.org/10.15388/informatica.2014.10>

Chai, J., Liu, J. N. K., & Ngai, E. W. T. (2013). *Application of decision-making techniques in supplier selection: A systematic review of literature*. *Expert Systems with Applications*, 40(10), 3872–3885. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.12.040>

Chivian, E. (2002). *Biodiversity: its importance to human health*. Center for Health and the Global Environment. Harvard Medical School, Cambridge, MA, 23.

Damiani, M., Sinkko, T., Caldeira, C., Tosches, D., Robuchon, M., & Sala, S. (2023). *Critical review of methods and models for Biodiversity Impact Assessment and their applicability in the LCA context*. *Environmental Impact Assessment Review*, 101, 107134. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107134>

de Lange, D. E., Busch, T., & Delgado-Ceballos, J. (2012). *Sustaining sustainability in organizations*. *Journal of Business Ethics*, 110(2), 151–156. <https://doi.org/10.1007/s10551-012-1425-0>

Dyson, A., Keena, N., Lokko, M., Reck, B., & Ciardullo, C. (2023). *BUILDING MATERIALS AND THE CLIMATE: CONSTRUCTING A NEW FUTURE*. UNEP Communications Division.

Eom, S.B. (1999). *Decision support systems research: current state and trends*. *Industrial Management & Data Systems*. 99 (5), 213–221. <https://doi.org/10.1108/02635579910253751>

Fath, B. D. (2017). *Systems ecology, energy networks, and a path to sustainability*. *International Journal of Design; Nature and Ecodynamics*, 12(1), 1–15. <https://doi.org/10.2495/dne-v12-n1-1-15>

- Fildes, R., & Beard, C. (1992). *Forecasting systems for production and inventory control*. *International Journal of Operations*. Production Management, 12(5), 4–27. <https://doi.org/10.1108/01443579210011381>
- Fildes, R., Goodwin, P., & Lawrence, M. (2006). *The design features of forecasting support systems and their effectiveness*. *Decision Support Systems*, 42(1), 351–361. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2005.01.003>
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., & Suh, S. (2009). *Recent developments in life cycle assessment*. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
- Gemeente Amsterdam. (z.d.). *Commissie Omgevingskwaliteit de Schoonheid van Amsterdam*. Commissie Ruimtelijke Kwaliteit - Home. Opgehaald op 6 mei 2024 van: <https://www.crk.amsterdam.nl/>
- Gluch, P., & Baumann, H. (2004). *The Life Cycle Costing (LCC) approach: A conceptual discussion of its usefulness for environmental decision-making*. *Building and Environment*, 39(5), 571–580. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2003.10.008>
- Gogan, P. L., & Wyckoff, G. D. (2012). *Design and construction of sustainable substations*. PES T&D 2012. <https://doi.org/10.1109/tdc.2012.6281717>
- Grazuleviciute-Vileniske, I., Viliunas, G., Daugelaite, A. (2021). *The role of aesthetics in building sustainability assessment*. *Spatium*, (45), 79–89. <https://doi.org/10.2298/spat2145079g>
- Grogan, R. (2011, October). *Choosing sustainability: a case study of service stations*. In *actes de colloque*, 151–168.
- Guy, B., & McLendon, S. (2000). *Building deconstruction: reuse and recycling of building materials*. Gainesville, FL: Center for Construction and Environment, Report to the Florida Department of Environmental Protection, September 1999.
- Hatefi, S. M., Asadi, H., Shams, G., Tamošaitienė, J., & Turskis, Z. (2021). *Model for the sustainable material selection by applying integrated Dempster-Shafer Evidence Theory and additive ratio assessment (ARAS) method*. *Sustainability*, 13(18), 10438. <https://doi.org/10.3390/su131810438>
- Heralova, R. S. (2017). *Life cycle costing as an important contribution to feasibility study in construction projects*. *Procedia Engineering*, 196, 565–570. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.031>
- HNN. (2024). *Circulaire ambities Binnen Handbereik*. Het Nieuwe Normaal | Cirkelstad. Opgehaald op 12 mei 2024 van: <https://www.hetnieuwenormaal.nl/>
- Huisingh, D., Zhang, Z., Moore, J. C., Qiao, Q., & Li, Q. (2015). *Recent advances in carbon emissions reduction: Policies, technologies, monitoring, assessment and modeling*. *Journal of*

Cleaner Production, 103, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.098>

International Organization for Standardization. (2011). ISO/IEC 25010:2011: *Systems and software engineering - Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) - System and software quality models*.

ISO-14040 (2004). *Life cycle assessment. Committee Trade and Investment*. https://www.apec.org/docs/default-source/Publications/2004/2/Life-Cycle-Assessment-Best-Practices-of-International-Organization-for-Standardization-ISO-14040-Ser/04_cti_scsc_lca_rev.pdf

ISO-14044 (2006). *Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. Management Environnemental*. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/38498/17324bfe9ec44e27a2f84e1a8ac3ca26/ISO-14044-2006.pdf>

Ji, S., Lee, B., & Yi, M. Y. (2021). *Building life-span prediction for life cycle assessment and life cycle cost using Machine Learning: A big data approach*. Building and Environment, 205, 108267. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108267>

Karakhan, A. A., Gambatese, J., and Simmons, D. R. (2020). *Development of assessment tool for workforce sustainability*. J. Constr. Eng. Manag. 146 (4), 04020017. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001794](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001794)

Krywkwow, J. (2009). *A methodological framework for participatory processes in water resources management*. [PhD Thesis - Research UT, graduation UT, University of Twente]. University of Twente. <https://doi.org/10.3990/1.9789036528351>

Leje, M. I., Shamsulhadi, B., Fadhlin, A., and Muhammad-Jamil, A. (2020). *Impacts of skilled workers on sustainable construction practices*. Int. J. Sci. Technol. Res. 9 (3), 6699–6706.

Lepczyk, C. A., Aronson, M. F., Evans, K. L., Goddard, M. A., Lerman, S. B., & MacIvor, J. S. (2017). *Biodiversity in the city: Fundamental questions for understanding the ecology of urban green spaces for biodiversity conservation*. BioScience, 67(9), 799–807. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix079>

Li, H., Zhang, C., & Sun, B. (2022). *Deep Integration Planning of sustainable energies in District Energy System and Distributed Energy Station*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 154, 111892. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111892>

LogAlto. (2024). *Qualitative indicators*. LogAlto Knowledge Base. LogAlto Knowledge Base. Opgehaald op 6 mei 2024 van: <https://help.logalto.com/article/80-qualitative-indicators>

Malla, F. A., Mushtaq, A., Bandh, S. A., Qayoom, I., Hoang, A. T., & Shahid-e-Murtaza. (2022). *Understanding climate change: Scientific opinion and public perspective*. Climate Change, 1–20. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86290-9_1

Martinez-Sanchez, V., Kromann, M. A., & Astrup, T. F. (2015). *Life cycle costing of Waste*

- Management Systems: Overview, calculation principles and case studies*. Waste Management, 36, 343–355. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.10.033>
- Mearig, T., Coffee, N. and Morgan, M. (1999). *Life Cycle Cost Analysis Handbook*. Alaska Department of Education and Early Development
- Nagaraju, S. K., & Reddy, B. S. (2012). *Resource Management in Construction Projects—a case study*. *Resource*, 2(4), 660-665.
- Neilson, E. W., Lamb, C. T., Konkolics, S. M., Peers, M. J., Majchrzak, Y. N., Doran-Myers, D., Garland, L., Martinig, A. R., & Boutin, S. (2020). *There's a storm a-coming: Ecological resilience and resistance to extreme weather events*. *Ecology and Evolution*, 10(21), 12147–12156. <https://doi.org/10.1002/ece3.6842>
- NMD. (z.d.). Het fundament voor Duurzame Bouw. Opgehaald op 14 juni 2024 van: <https://milieudatabase.nl/nl/>
- Opoku, A. (2019). *Biodiversity and the built environment: Implications for the sustainable development goals (SDGs)*. *Resources, Conservation and Recycling*, 141, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.011>
- Pedersen Zari, M. (2019). *Ecosystem services impacts as part of Building Materials Selection Criteria*. *Materials Today Sustainability*, 3–4, 100010. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2019.100010>
- Peffers, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A., & Chatterjee, S. (2007). *A design science research methodology for information systems research*. *Journal of Management Information Systems*, 24(3), 45–77. <https://doi.org/10.2753/mis0742-1222240302>
- Pianoo. (2020). *Stappenplan: Inkopen met de milieukostenindicator*. Opgehaald op 5 mei 2024 van: https://www.pianoo.nl/sites/default/files/media/documents/2020-12/inkopen_met_de_milieukostenindicator-augustus2020.pdf
- PuinRecycling. (2018). *Netwerk “Beton voor Beton” voorziet in Behoeft*. Twee “R” Recycling Groep BV. Opgehaald op 6 juni 2024 van: <https://www.puinrecycling.nl/netwerk-beton-voor-beton-voorziet-in-behoeft/>
- Purvis, B., Mao, Y., & Robinson, D. (2018). *Three pillars of sustainability: In Search of Conceptual Origins*. *Sustainability Science*, 14(3), 681–695. <https://doi.org/10.1007/s11625-018-0627-5>
- Rajabi, S., El-Sayegh, S., & Romdhane, L. (2022). *Identification and assessment of Sustainability Performance Indicators for construction projects*. *Environmental and Sustainability Indicators*, 15, 100193. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2022.100193>
- Rebitzer, G., & Hunkeler, D. (2003). *Life cycle costing in LCM: Ambitions, opportunities, and limitations*. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(5), 253–256. <https://doi.org/10.1007/bf02978913>

- Rijksoverheid. (2023). *Tekort aan personeel vraagt blijvende inzet*. Nieuwsbericht | Rijksoverheid.nl. Opgehaald op 27 april 2024 van: <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2023/02/03/tekort-aan-personeel-vraagt-blijvend-e-inzet>
- Rossignoli, F., & Lionzo, A. (2018, May). *Network impact on business models for sustainability: Case study in the energy sector*. *Journal of Cleaner Production*, 182(1), 694–704. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.015>
- RVO. (2023). *Netcongestie, flexibel energieverbruik en opslag van energie*. RVO.nl. Opgehaald op 19 juni 2024 van: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/netcongestie-en-opslag-van-energie>
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGrawHill, New York.
- Saaty, T. L. (1990). *How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process*. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-i](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-i)
- Saaty, T. L. (1994). *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory, with the Analytical Hierarchy Process*. Pittsburgh, PA: RWS Publications.
- Schade, J. (2007). *Life cycle cost calculation models for buildings*. *Proceedings of 4th Nordic Conference on Construction Economics and Organisation : Development Processes in Construction Management*, 321–329. Opgehaald op 23 mei 2024 van: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-32123>
- Strukton. (2023). *CO2-Prestatieladder*. Strukton NL. <https://strukton.nl/about-us/duurzaamheid-bij-strukton/co2-reductiedoelen/>
- Swart, P., Alvarenga, R. A., & Dewulf, J. (2015). *Abiotic resource use. Life Cycle Impact Assessment*, 247–269. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9744-3_13
- TU Delft. (2023). *Closing the concrete waste loop*. Opgehaald op 14 juni 2024 van: <https://www.tudelft.nl/en/innovation-impact/pioneering-tech/articles/closing-the-concrete-waste-loop-1>
- Van Aken, J., Chandrasekaran, A., & Halman, J. (2016). *Conducting and publishing design science research*. *Journal of Operations Management*, 47–48(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2016.06.004>
- Vinodh, S., Jayakrishna, K., Kumar, V., & Dutta, R. (2013). *Development of Decision Support System for Sustainability Evaluation: A case study*. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16(1), 163–174. <https://doi.org/10.1007/s10098-013-0613-7>
- United Nations. (2023). *Net zero coalition*. Opgehaald op 19 juni 2024 van: <https://www.un.org/en/climatechange/net-zero-coalition>
- Wang, H., Bai, H., Liu, J., & Xu, H. (2012). *Measurement indicators and an evaluation approach for Assessing Strategic Environmental Assessment Effectiveness*. *Ecological Indicators*, 23,

413–420. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.04.021>

Wang, Y. (2023). *Exploring the importance of sustainability in the construction industry*. *Applied and Computational Engineering*, 9(1), 312–318. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/9/20230011>

Wedley, W. C. (1990). *Combining qualitative and quantitative factors—an analytic hierarchy approach*. *Socio-Economic Planning Sciences*, 24(1), 57–64. [https://doi.org/10.1016/0038-0121\(90\)90028-6](https://doi.org/10.1016/0038-0121(90)90028-6)

Zavadskas, E., Šaparauskas, J., & Antucheviciene, J. (2018). *Sustainability in Construction Engineering*. *Sustainability*, 10(7), 2236. <https://doi.org/10.3390/su10072236>

Zuo, J., Jin, X. H., and Flynn, L. (2012). *Social sustainability in construction - an explorative study*. *Int. J. Constr. Manag*, 12 (2), 51–63. <https://doi.org/10.1080/15623599.2012.10773190>

Bijlage A: Toepassing van AHP

Bepalen van de Indicatorsgewichten

In de eerste stap van AHP worden de relatieve gewichten van indicatoren bepaald. Dit is gedaan door pairwise comparisons, waar elke indicator is vergeleken met een andere indicator, bijv. hoe belangrijker E1 is dan E2, E3, M1, enz. Deze vergelijking wordt uitgevoerd door informatie uit een fundamentele schaal (*Figuur A.1*), die helpt met een precieze vergelijking. Zoals te zien, kan de intensiteit van de belangrijkheid van een indicator vergeleken met een andere indicator, een getal zijn van één t/m negen, waar negen het sterkste belang beduidt.

The Fundamental Scale for Pairwise Comparisons		
Intensity of Importance	Definition	Explanation
1	Equal importance	Two elements contribute equally to the objective
3	Moderate importance	Experience and judgment slightly favor one element over another
5	Strong importance	Experience and judgment strongly favor one element over another
7	Very strong importance	One element is favored very strongly over another; its dominance is demonstrated in practice
9	Extreme importance	The evidence favoring one element over another is of the highest possible order of affirmation
Intensities of 2, 4, 6, and 8 can be used to express intermediate values. Intensities 1.1, 1.2, 1.3, etc. can be used for elements that are very close in importance.		

Figuur A.1: De fundamentele schaal. Figuur uit Saaty (1994).

Het moet hier worden gecommuniceerd dat uit de indicatoren van deze DSS, geen gewicht wordt gegeven aan opschaling (E0). Dit komt omdat zoals besproken in *Paragraaf 4.2.2*, opschaling een knock-out indicator is. Daarnaast is hier de restwaarde (E3) die een negatief getal kan zijn, verdeeld door materiaalwaarde (E3+) en de kosten in het levenseinde (E3-), omdat AHP geen negatieve getallen kan verwerken. Hiermee zijn E3+ een Benefit Indicator en E3- een Cost Indicator, maar ze krijgen hetzelfde gewicht, omdat ze allebei afkomstig zijn van E3.

De gebruikelijke manier van uitvoering van de pairwise comparisons in AHP is dat iemand (besluitvormer, onderzoeker, enz.) de waarde van elke pairwise comparison bepaalt. Niettemin bestaan er veertien indicatoren in deze DSS. Dit betekent dat in dit proces moeten 196 (14*14) getallen worden berekend, veertien daarvan zijn één (elke indicator vergeleken met zichzelf), en de helft van de resterende zijn dezelfde vergelijking (E1-belang van 5 tegen E2 betekent dat de E2-belang tegen E1 1/5 is). Nog steeds blijven er 91 pairwise comparisons die handmatig moeten worden bepaald. De uitvoering van de pairwise comparisons voor alle indicatoren van deze DSS is dus een heel langdurig proces. Dit proces kan eveneens met onnauwkeurige resultaten eindigen, wat was ervaren tijdens de eerste poging bij het bepalen van gewichten dat handmatig was gedaan.

Voor het gemak van de gebruikers en aanpasbaarheid van de gewichten is een systeem bedacht. Vinodh et al. (2013) was de inspiratie voor dit grading-systeem. Hoewel dezelfde vergelijking of getallen waren daar niet onderzocht, het idee van het toewijzen van een waarde aan een bereik van nummers was geïnspireerd door het genoemde onderzoek. Dit systeem is in het volgende uitgelegd. Ten eerste werd het Greenteam (als de hoofdgebruikers van de DSS) gevraagd om hun mening over de belangrijkheden van de indicatoren te delen, op de schaal van één t/m vijf (te zien in *Tabel A.1*). Deze schaal was gekozen omdat die verstandiger was voor het betrekken van de mensen in het proces, die geen ervaring hebben met de AHP-schaal.

Tabel A.1: Expert-scores aan de duurzaamheidsindicatoren van de DSS.

Aspect	Indicator	Ex. 1	Ex. 2	Ex. 3	Gemiddeld
Milieu-duurzaamheid	M1: Primaire Abiotische Grondstoffen Uitgespaard	5	5	3	4,33
	M2: MKI-besparing	3	4	4	3,67
	M3: CO ₂ -besparing	5	5	3	4,33
	M4: Bescherming van Diersoorten en Ecosystemen	5	5	5	5,00
Economische Duurzaamheid	E1: Kostprijs in de Bouwfase	5	4	3	4,00
	E2: Onderhoudskosten	5	4	3	4,00
	E3: Restwaarde	5	3	4	4,00
Sociale Duurzaamheid	S1: Arbeidsmarktcapaciteit	3	2	4	3,00
	S2: Esthetiek	2	2	3	2,33
	S3: Imago	1	3	5	3,00
Technische Indicatoren	T1: Maakbaarheid	4	4	4	4,00
	T2: Losmaakbaarheid	4	4	4	4,00
	T3: Levensduur	5	5	4	4,67
	T4: Weerstand tegen Extreem Weer	1	3	4	2,67

Ten tweede, om de gekregen inputs naar de pairwise comparisons te kunnen vertalen, werden de gemiddelde scores in *Tabel A.1* door elkaar verdeeld (te zien in *Figuur A.2*), om een relatie te kunnen vinden tussen twee bepaalde indicatoren. Zoals te zien in de figuur, de indicatoren zijn geordend door hun gemiddelde expert-scores, waar de belangrijkste indicator (M4) zich aan de linkerkant boven bevindt, en de minst belangrijke indicator (S2) aan de rechterkant onder ligt. Ook te vermelden is dat elke indicator verdeeld door zichzelf is gelijk 1, waarbij een diagonale lijn van 1 in het midden is gevormd. In de boven van deze lijn zijn de verdelingswaarden gelijk of hoger dan 1, en onder deze lijn is een omgekeerde afspiegeling van de verdelingen gevormd. Bijvoorbeeld, in de bovenkant is M4/S2 gelijk aan 2,14, en in de onderkant is S2/M4 gelijk aan $1/2,14 = 0,47$.

	M4	T3	M1	M3	E1	E2	E3+	E3-	T1	T2	M2	S1	S3	T4	S2
M4	1,00	1,07	1,15	1,15	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,36	1,67	1,67	1,88	2,14
T3	0,93	1,00	1,08	1,08	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,27	1,56	1,56	1,75	2,00
M1	0,87	0,93	1,00	1,00	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,18	1,44	1,44	1,63	1,86
M3	0,87	0,93	1,00	1,00	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,18	1,44	1,44	1,63	1,86
E1	0,80	0,86	0,92	0,92	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,09	1,33	1,33	1,50	1,71
E2	0,80	0,86	0,92	0,92	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,09	1,33	1,33	1,50	1,71
E3+	0,80	0,86	0,92	0,92	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,09	1,33	1,33	1,50	1,71
E3-	0,80	0,86	0,92	0,92	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,09	1,33	1,33	1,50	1,71
T1	0,80	0,86	0,92	0,92	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,09	1,33	1,33	1,50	1,71
T2	0,80	0,86	0,92	0,92	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,09	1,33	1,33	1,50	1,71
M2	0,73	0,79	0,85	0,85	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	1,00	1,22	1,22	1,38	1,57
S1	0,60	0,64	0,69	0,69	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,82	1,00	1,00	1,13	1,29
S3	0,60	0,64	0,69	0,69	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,82	1,00	1,00	1,13	1,29
T4	0,53	0,57	0,62	0,62	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,73	0,89	0,89	1,00	1,14
S2	0,47	0,50	0,54	0,54	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,64	0,78	0,78	0,88	1,00

Figuur A.2: De verdelingswaarden van de indicators door elkaar.

Ten derde, werden bereiken van getallen gedefinieerd om AHP-scores te kunnen geven aan de verdelingswaarden uit *Figuur A.2*. Voor deze DSS zijn de bereiken in *Tabel A.2* gekozen, door meerdere kalibraties om naar verstandige gewichten te komen. De kalibratie was begonnen met het kijken naar de hoogste en laagste gemiddelde expert-scores, namelijk bescherming van diersoorten en ecosystemen (M4) met een gemiddelde score van 5 uit 5, en esthetiek (S2) met een gemiddelde score van 2,33 uit 5. Volgens de AHP-schaal van 1 t/m 9, was een 7 gegeven aan de verdeling van $5/2,33=2,15$, omdat 2,33 uit 5 is vrij laag maar niet zo laag als bijv. 1,5. Hiervoor is een 9 gegeven aan de verdelingswaarde van hoger dan 2,5 (een gemiddelde score van 5 verdeeld door een gemiddelde score lager dan 2), dat de hoogste belangrijkheid is tussen twee indicatoren.

Tabel A.2: Belangrijke bereiken tussen twee bepaalde indicatoren.

Belang	Verdeling	Belang	Verdeling	Belang	Verdeling
1	$1 \leq x \leq 1,1$	4	$1,5 < x \leq 1,7$	7	$2,1 < x \leq 2,3$
2	$1,1 < x \leq 1,3$	5	$1,7 < x \leq 1,9$	8	$2,3 < x \leq 2,5$
3	$1,3 < x \leq 1,5$	6	$1,9 < x \leq 2,1$	9	$2,5 < x$

Bij de toepassing van deze bereiken, werden de AHP-waarden voor alle pairwise comparisons gevonden en zijn te zien in *Figuur A.3*. Hier eindigt het bedachte systeem en de verdere stappen zijn aanwezig in alle onderzoeken die een AHP-methode toepassen. Zoals eerder gezegd, zijn de waarden in *Figuur A.3* de AHP-waarden die gebruikelijk handmatig worden bepaald, maar met dit bedachte en gekalibreerde systeem, worden deze waarden automatisch berekend. Met dit systeem en mits nodig, zijn de indicatorsgewichten eenvoudig aanpasbaar. Deze aanpasbaarheid van de gewichten kan van nut zijn als er bijv. meer input is van meer belanghebbenden, of minder of hoger belang van een bepaalde indicator ontstaat in de toekomst, enz.

	M4	T3	M1	M3	E1	E2	E3+	E3-	T1	T2	M2	S1	S3	T4	S2
M4	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	4	4	5	7
T3	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	4	4	5	6
M1	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	4	5
M3	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	4	5
E1	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	5
E2	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	5
E3+	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	5
E3-	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	5
T1	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	5
T2	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	5
M2	0,33	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	4
S1	0,25	0,25	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,5	1	1	2	2
S3	0,25	0,25	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,5	1	1	2	2
T4	0,2	0,2	0,25	0,25	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,5	0,5	1	2
S2	0,14	0,17	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,25	0,5	0,5	0,5	1
SOM	7,1762	8,3667	12,617	12,617	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	17,583	37	37	44,5	64

Figuur A.3: De AHP-waarden van de indicatoren in de DSS.

De volgende stap van AHP is de normalisering van de AHP-waarden (Figuur A.4), waar elk getal is verdeeld door de som van hun kolom. Na de normalisering wordt de som van alle kolommen gelijk 1.

	M4	T3	M1	M3	E1	E2	E3+	E3-	T1	T2	M2	S1	S3	T4	S2
M4	0,139	0,120	0,159	0,159	0,141	0,141	0,141	0,141	0,141	0,141	0,171	0,108	0,108	0,112	0,109
T3	0,139	0,120	0,079	0,079	0,141	0,141	0,141	0,141	0,141	0,141	0,114	0,108	0,108	0,112	0,094
M1	0,070	0,120	0,079	0,079	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,114	0,081	0,081	0,090	0,078
M3	0,070	0,120	0,079	0,079	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,114	0,081	0,081	0,090	0,078
E1	0,070	0,060	0,079	0,079	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,057	0,081	0,081	0,067	0,078
E2	0,070	0,060	0,079	0,079	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,057	0,081	0,081	0,067	0,078
E3+	0,070	0,060	0,079	0,079	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,057	0,081	0,081	0,067	0,078
E3-	0,070	0,060	0,079	0,079	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,057	0,081	0,081	0,067	0,078
T1	0,070	0,060	0,079	0,079	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,057	0,081	0,081	0,067	0,078
T2	0,070	0,060	0,079	0,079	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,057	0,081	0,081	0,067	0,078
M2	0,046	0,060	0,040	0,040	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,057	0,054	0,054	0,067	0,063
S1	0,035	0,030	0,026	0,026	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,028	0,027	0,027	0,045	0,031
S3	0,035	0,030	0,026	0,026	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,028	0,027	0,027	0,045	0,031
T4	0,028	0,024	0,020	0,020	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,019	0,014	0,014	0,022	0,031
S2	0,020	0,020	0,016	0,016	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,011	0,016
SOM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figuur A.4: Normalisering van de AHP-waarden.

In de laatste stap van het bepalen van de gewichten, wordt de gemiddelde waarde van elke rij berekend, en die waarde is het gewicht van de indicator aangegeven in de links van die rij. De gevonden gewichten zijn gesorteerd en te zien in Tabel A.3.

Tabel A.3: De gewichten van de duurzaamheidsindicatoren in deze DSS.

M1	M2	M3	M4	E1	E2	E3+	E3-	S1	S2	S3	T1	T2	T3	T4
0,081	0,060	0,081	0,135	0,072	0,072	0,072	0,072	0,028	0,015	0,028	0,072	0,072	0,120	0,022

Consistentie-check op de Gewichten

Na de indicatorsgewichten zijn bepaald, worden ze gechecked of ze consistent zijn. Hier worden de gevonden gewichten (Tabel A.3) vermenigvuldigd door alle getallen in een rij in AHP-waarden (Figuur A.3) en opgeteld bij elkaar (Figuur A.5). Dit is genoemd de gewogen som, die wordt vervolgens verdeeld door het gewicht in de linkerkant van die rij (Figuur A.6). De gemiddelde waarde

van deze nieuwe nummers is namelijk λ_{\max} . Daarna worden *Consistency Index (CI)* en *Consistency Ratio (CR)* volgens de onderstaande formules berekend (*Figuur A.7*):

$$(A.1) \quad CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (A.2) \quad CR = \frac{CI}{RI}$$

Waar, n = Aantal rijen (hier, 15); en RI = *Random Index* (volgens *Figuur A.8*, 1,58).

Hoe lager de CR, hoe meer consistent, waar de maximale toegestane CR is 0,1 en onder 0,1 beduidt consistente gewichten (Saaty, 1990). In de eerste poging van het bepalen van de gewichten, toen de gewichten handmatig waren bepaald, was de CR-waarde gelijk 0,1083, wat hoger is dan 0,1 en dus niet toegestaan. Maar de nieuwe gewichten die met het bedachte systeem (beschreven in *Paragraaf 5.1.1*) zijn berekend, realiseren de CR-waarde van 0,0079 dat vrij consistent is, wat laat al zien hoe voordelig het bedachte systeem kan zijn. De gevonden gewichten in *Tabel A.3* zijn dus consistent, en geen herberekening is nodig. Zoals genoemd in *Hoofdstuk 5*, was deze AHP-gewichtsbepaling niet toegepast, maar de laatste AHP-stap is wel toegepast (uitgelegd in *Paragraaf 5.1.3*).

MULT f_x =MMULT(C5:Q5;\$Q\$24:\$Q\$38)

Verwerkte Scores																Genormaliseerde Scores																
	M4	T3	M1	M3	E1	E2	E3+	E3-	T1	T2	M2	S1	S3	T4	S2		M4	T3	M1	M3	E1	E2	E3+	E3-	T1	T2	M2	S1	S3	T4	S2	
M4	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	4	4	5	7	M4	0,13935	0,119522	0,15852	0,15852	0,140845	0,140845	0,140845	0,140845	0,140845	0,140845	0,170616	0,108108	0,108108	0,11236	0,109375	
T3	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	4	4	5	6	T3	0,13935	0,119522	0,07926	0,07926	0,140845	0,140845	0,140845	0,140845	0,140845	0,140845	0,113744	0,108108	0,108108	0,11236	0,09375	
M1	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	4	5	M1	0,069675	0,119522	0,07926	0,07926	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,113744	0,081081	0,081081	0,089888	0,078125	
M3	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	4	5	M3	0,069675	0,119522	0,07926	0,07926	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,113744	0,081081	0,081081	0,089888	0,078125	
E1	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	5	E1	0,069675	0,059761	0,07926	0,07926	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,056872	0,081081	0,081081	0,067416	0,078125	
E2	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	5	E2	0,069675	0,059761	0,07926	0,07926	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,056872	0,081081	0,081081	0,067416	0,078125	
E3+	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	5	E3+	0,069675	0,059761	0,07926	0,07926	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,056872	0,081081	0,081081	0,067416	0,078125	
E3-	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	5	E3-	0,069675	0,059761	0,07926	0,07926	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,056872	0,081081	0,081081	0,067416	0,078125	
T1	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	5	T1	0,069675	0,059761	0,07926	0,07926	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,056872	0,081081	0,081081	0,067416	0,078125	
T2	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	5	T2	0,069675	0,059761	0,07926	0,07926	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,056872	0,081081	0,081081	0,067416	0,078125	
M2	0,333333	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	4	M2	0,04645	0,059761	0,03963	0,03963	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,070423	0,056872	0,054054	0,054054	0,067416	0,0625	
S1	0,25	0,25	0,333333	0,333333	0,333333	0,333333	0,333333	0,333333	0,333333	0,333333	0,5	1	1	2	2	S1	0,034837	0,02988	0,02642	0,02642	0,023474	0,023474	0,023474	0,023474	0,023474	0,023474	0,028436	0,027027	0,027027	0,044944	0,03125	
S3	0,25	0,25	0,333333	0,333333	0,333333	0,333333	0,333333	0,333333	0,333333	0,333333	0,5	1	1	2	2	S3	0,034837	0,02988	0,02642	0,02642	0,023474	0,023474	0,023474	0,023474	0,023474	0,023474	0,028436	0,027027	0,027027	0,044944	0,03125	
T4	0,2	0,2	0,25	0,25	0,333333	0,333333	0,333333	0,333333	0,333333	0,333333	0,333333	0,5	0,5	1	2	T4	0,02787	0,023904	0,019815	0,019815	0,023474	0,023474	0,023474	0,023474	0,023474	0,023474	0,018957	0,013514	0,013514	0,022472	0,03125	
S2	0,142857	0,166667	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,25	0,5	0,5	0,5	1	S2	0,019907	0,01992	0,015852	0,015852	0,014085	0,014085	0,014085	0,014085	0,014085	0,014085	0,014218	0,013514	0,013514	0,011236	0,015625	
SOM	7,17619	8,366667	12,61667	12,61667	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	17,58333	37	37	44,5	64	SOM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Indic.	Gewicht	GS	GS / Gew.
M4	0,135303	15,20522	
T3	0,119902	15,18147	
M1	0,080945	15,19466	
M3	0,080945	15,19466	
E1	0,071671	15,17562	
E2	0,071671	15,17562	
E3+	0,071671	15,17562	
E3-	0,071671	15,17562	
T1	0,071671	15,17562	
T2	0,071671	15,17562	
M2	0,060193	15,17778	
S1	0,027806	15,13935	
S3	0,027806	15,13935	
T4	0,02213	15,12591	
S2	0,014943	15,16153	
		0,0078	

Figuur A.5: Gewogen sommen.

Indic.	Gewicht	GS	GS / Gew.
M4	0,135303	2,057317	=S24/Q24
T3	0,119902	1,820291	15,18147
M1	0,080945	1,229928	15,19466
M3	0,080945	1,229928	15,19466
E1	0,071671	1,087653	15,17562
E2	0,071671	1,087653	15,17562
E3+	0,071671	1,087653	15,17562
E3-	0,071671	1,087653	15,17562
T1	0,071671	1,087653	15,17562
T2	0,071671	1,087653	15,17562
M2	0,060193	0,913603	15,17778
S1	0,027806	0,420962	15,13935
S3	0,027806	0,420962	15,13935
T4	0,02213	0,334742	15,12591
S2	0,014943	0,226558	15,16153
			0,0078

Figuur A.6: Gewogen sommen verdeeld door gewichten.

GS	GS / Gew.
2,057317	15,20522
1,820291	15,18147
1,229928	15,19466
1,229928	15,19466
1,087653	15,17562
1,087653	15,17562
1,087653	15,17562
1,087653	15,17562
1,087653	15,17562
1,087653	15,17562
1,087653	15,17562
0,913603	15,17778
0,420962	15,13935
0,420962	15,13935
0,334742	15,12591
0,226558	15,16153

=((AVERAGE(STS24:STS38)-15)/14)/1,58

Figuur A.7: Berekening van de Consistency Ratio (CR). Waarde = 0,0078.

Number of elements (n)	R.I.
3	0.52
4	0.89
5	1.11
6	1.25
7	1.35
8	1.40
9	1.45
10	1.49
11	1.51
12	1.54
13	1.56
14	1.57
15	1.58

Figuur A.8: Random index-waarden in een matrix. Figuur uit Saaty (1980).

Beoordelingsresultaten																Genormaliseerde Beoordelingsresultaten																
	F1	F2	E3+	E3-	M1	M2	M3	M4	S1	S2	S3	T1	T2	T3	T4		E1	E2	E3+	E3-	M1	M2	M3	M4	S1	S2	S3	T1	T2	T3	T4	
MR1	5000	100	1000	5000	5000	500	500	500	2	2	2	2	50	5	2	MR1	SDS35;0	0,333333	0,166667	0,255319	0,555556	0,2	0,111111	0,111111	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,232558	0,142857	0,2
MR2	3000	100	3000	4000	3000	1000	1000	1000	3	3	3	3	75	10	3	MR2	0,322581	0,333333	0,5	0,319149	0,333333	0,4	0,222222	0,222222	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,348837	0,285714	0,3
MR3	2000	100	2000	3000	1000	1000	3000	3000	5	5	5	5	90	20	5	MR3	0,483871	0,333333	0,333333	0,425532	0,111111	0,4	0,666667	0,666667	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,418605	0,571429	0,5
MR4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N.SOM	0,001033	0,03	6000	0,000783	9000	2500	4500	4500	10	10	10	10	215	35	10	SOM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figuur A.9: Normalisering van de Cost Indicatoren.

Beoordelingsresultaten																Genormaliseerde Beoordelingsresultaten															
	E1	E2	E3+	E3-	M1	M2	M3	M4	S1	S2	S3	T1	T2	T3	T4		E1	E2	E3+	E3-	M1	M2	M3	M4	S1	S2	S3	T1	T2	T3	T4
MR1	5000	100	1000	5000	5000	500	500	500	2	2	2	2	50	5	2	MR1	0,193548	0,333333	0,166667	0,255319	0,333333	0,2	0,111111	0,111111	0,2	0,2	0,2	0,2	0,232558	0,142857	0,2
MR2	3000	100	3000	4000	3000	1000	1000	1000	3	3	3	3	75	10	3	MR2	0,322581	0,333333	0,5	0,319149	0,333333	0,4	0,222222	0,222222	0,3	0,3	0,3	0,3	0,348837	0,285714	0,3
MR3	2000	100	2000	3000	1000	1000	3000	3000	5	5	5	5	90	20	5	MR3	0,483871	0,333333	0,333333	0,425532	0,111111	0,4	0,666667	0,666667	0,5	0,5	0,5	0,5	0,418605	0,571429	0,5
MR4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MR30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MR30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N.SOM	0,001033	0,03	6000	0,000783	9000	2500	4500	4500	10	10	10	10	215	35	10	SOM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figuur A.10: Normalisering van de Benefit Indicatoren.

=MMULT(U5:A15;\$A15:\$A19)

T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO
Genormaliseerde Beoordelingsresultaten																Gewichten		MR-Scores			
	E1	E2	E3+	E3-	M1	M2	M3	M4	S1	S2	S3	T1	T2	T3	T4	Indic.	Gewicht		MR	Score	
MR1	0,193548	0,333333	0,166667	0,255319	0,555556	0,2	0,111111	0,111111	0,2	0,2	0,2	0,2	0,232558	0,142857	0,2	E1	0,071671		MR1	\$A15\$19)	
MR2	0,322581	0,333333	0,5	0,319149	0,333333	0,4	0,222222	0,222222	0,3	0,3	0,3	0,3	0,348837	0,285714	0,3	E2	0,071671		MR2	0,3134	
MR3	0,483871	0,333333	0,333333	0,425532	0,111111	0,4	0,666667	0,666667	0,5	0,5	0,5	0,5	0,418605	0,571429	0,5	E3-	0,071671		MR3	0,470891	
MR4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	E3+	0,071671		MR4	0	
MR5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	M1	0,080945		MR5	0	
MR6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	M2	0,060193		MR6	0	
MR7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	M3	0,080945		MR7	0	
MR8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	M4	0,135303		MR8	0	
MR9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S1	0,027806		MR9	0	
MR10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S2	0,014943		MR10	0	
MR11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	S3	0,027806		MR11	0	
MR12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	T1	0,071671		MR12	0	
MR13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	T2	0,071671		MR13	0	
MR14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	T3	0,119902		MR14	0	
MR15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	T4	0,02213		MR15	0	
MR16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				MR16	0	
MR17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				MR17	0	
MR18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				MR18	0	
MR19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				MR19	0	
MR20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				MR20	0	
MR21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				MR21	0	
MR22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				MR22	0	
MR23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				MR23	0	
MR24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				MR24	0	
MR25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				MR25	0	
MR26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				MR26	0	
MR27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				MR27	0	
MR28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				MR28	0	
MR29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				MR29	0	
MR30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				MR30	0	
SOM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				SOM	1	

Figuur A.11: Relatieve score van de maatregelen. Waarde van MR1 = 0,21571.

Bijlage B: Gewichtsbepalings-versies van de DSS

Versie 1: Gewichtsbepaling met AHP voor gewichtsbepaling (meestal handmatig)

In deze versie, waren de AHP-waarden handmatig ingevuld door mij, met de gemiddelde expert-scores (Tabel 4) in de gaten. Bijvoorbeeld als twee indicatoren de scores van 5 (hoogste score mogelijk) en 1 (laagste score mogelijk) hadden, zou ik op basis van de AHP-schaal (Figuur A.1) een 9 geven. Deze AHP-tabel was ingevuld en genormaliseerd (Figuur B.1) en de consistentie-error van de gewichten was berekend als 0,1018 (Figuur B.2), wat niet toegestaan is (maximaal 0,1 is toegestaan). Daarvoor was de beslissing genomen om dit proces te automatiseren, wat al was uitgelegd in Bijlage A.

	PV	WS	W/P
M4	0,18976	3,13585	16,5253
T3	0,15267	2,56589	16,8067
M1	0,12902	2,21631	17,1776
M3	0,11137	1,94776	17,4883
E1	0,08057	1,37913	17,1173
E2	0,08057	1,37913	17,1173
T1	0,05766	0,96657	16,7637
T2	0,0508	0,82653	16,2708
E3	0,0422	0,65925	15,6224
M2	0,03559	0,54377	15,2777
S1	0,02632	0,38967	14,8026
S3	0,01837	0,2657	14,4603
T4	0,01447	0,21211	14,6586
S2	0,01061	0,15923	15,0007
	1		16,078
			0,1018

Figuur B.2: Consistentie-check van de gewichten in Versie 1.

Handmatig Ingevulde Scores														Genormaliseerde Scores																
	M4	T3	M1	M3	E1	E2	T1	T2	E3	M2	S1	S3	T4	S2		M4	T3	M1	M3	E1	E2	T1	T2	E3	M2	S1	S3	T4	S2	
M4	1	2	2	3	4	4	5	5	5	5	6	7	7	8	M4	0,23749	0,33084	0,25775	0,26526	0,23749	0,23749	0,19367	0,17554	0,15008	0,13532	0,11834	0,11185	0,10553	0,1	
T3	0,5	1	2	3	3	3	4	4	4	5	6	7	7	7	T3	0,11874	0,16542	0,25775	0,26526	0,17812	0,17812	0,15494	0,14043	0,12006	0,13532	0,11834	0,11185	0,10553	0,0875	
M1	0,5	0,5	1	2	3	3	4	4	4	5	6	6	6	7	M1	0,11874	0,08271	0,12887	0,17684	0,17812	0,17812	0,15494	0,14043	0,12006	0,13532	0,11834	0,09587	0,09045	0,0875	
M3	0,33333	0,33333	0,5	1	3	3	4	4	4	4	6	6	6	7	M3	0,07916	0,05514	0,06444	0,08842	0,17812	0,17812	0,15494	0,14043	0,12006	0,10825	0,11834	0,09587	0,09045	0,0875	
E1	0,25	0,33333	0,33333	0,33333	1	1	3	3	4	4	5	6	6	7	E1	0,05937	0,05514	0,04296	0,02947	0,05937	0,05937	0,1162	0,10532	0,12006	0,10825	0,09862	0,09587	0,09045	0,0875	
E2	0,25	0,33333	0,33333	0,33333	1	1	3	3	4	4	5	6	6	7	E2	0,05937	0,05514	0,04296	0,02947	0,05937	0,05937	0,1162	0,10532	0,12006	0,10825	0,09862	0,09587	0,09045	0,0875	
T1	0,2	0,25	0,25	0,25	0,33333	0,33333	1	3	3	3	4	5	5	6	T1	0,0475	0,04135	0,03222	0,02211	0,01979	0,01979	0,03873	0,10532	0,09005	0,08119	0,0789	0,07989	0,07538	0,075	
T2	0,2	0,25	0,25	0,25	0,33333	0,33333	0,33333	1	3	3	4	5	5	6	T2	0,0475	0,04135	0,03222	0,02211	0,01979	0,01979	0,01291	0,03511	0,09005	0,08119	0,0789	0,07989	0,07538	0,075	
E3	0,2	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,33333	0,33333	1	2	4	5	5	6	E3	0,0475	0,04135	0,03222	0,02211	0,01484	0,01484	0,01291	0,0117	0,03002	0,05413	0,0789	0,07989	0,07538	0,075	
M2	0,2	0,2	0,2	0,25	0,25	0,25	0,33333	0,33333	0,5	1	3	4	5	6	M2	0,0475	0,03308	0,02577	0,02211	0,01484	0,01484	0,01291	0,0117	0,01501	0,02706	0,05917	0,06391	0,07538	0,075	
S1	0,16667	0,16667	0,16667	0,16667	0,2	0,2	0,25	0,25	0,25	0,33333	1	4	4	5	S1	0,03958	0,02757	0,02148	0,01474	0,01187	0,01187	0,00968	0,00878	0,0075	0,00902	0,01972	0,06391	0,0603	0,0625	
S3	0,14286	0,14286	0,16667	0,16667	0,16667	0,16667	0,2	0,2	0,2	0,25	0,25	1	3	4	S3	0,03393	0,02363	0,02148	0,01474	0,0099	0,0099	0,00775	0,00702	0,006	0,00677	0,00493	0,01598	0,04523	0,05	
T4	0,14286	0,14286	0,16667	0,16667	0,16667	0,16667	0,2	0,2	0,2	0,2	0,25	0,33333	1	3	T4	0,03393	0,02363	0,02148	0,01474	0,0099	0,0099	0,00775	0,00702	0,006	0,00541	0,00493	0,00533	0,01508	0,0375	
S2	0,125	0,14286	0,14286	0,14286	0,14286	0,14286	0,16667	0,16667	0,16667	0,16667	0,2	0,25	0,33333	1	S2	0,02969	0,02363	0,01841	0,01263	0,00848	0,00848	0,00646	0,00585	0,005	0,00451	0,00394	0,00399	0,00503	0,0125	
SUM	4,21071	6,04524	7,75952	11,3095	16,8429	16,8429	25,8167	28,4833	33,3167	36,95	50,7	62,5833	66,3333	80	SUM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figuur B.1: Gewichtsbepaling Versie 1.

Versie 2: Gewichtsbeplating met AHP voor gewichtsbeplating (geautomatiseerd)

Zoals uitgebreid uitgelegd in *Bijlage A*, de automatisering was ontwikkeld in deze versie om de langdurige en onnauwkeurige verwerkingen van AHP te verminderen. Zoals te zien in *Figuur B.3* hier zijn alleen de gemiddelde expert-scores (*Tabel 4*) als input gegeven en de AHP-scores worden als output vertoond (*Figuur B.3*). In de figuur is het ook te zien dat de consistentie-error van de gewichten in deze versie is gelijk 0,0078, wat zeer beter is dan 0,1018 dat in versie 1 was berekend. Niettemin was deze versie door de ingewikkeldheid ervan niet toegepast, om een eenvoudiger ontwerp te kunnen vinden.

Verwerkte Scores															
	M4	T3	M1	M3	E1	E2	E3+	E3-	T1	T2	M2	S1	S3	T4	S2
M4	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	4	4	4	5
T3	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	4	4	4	5
M1	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	4	5
M3	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	4	5
E1	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	5
E2	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	5
E3+	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	5
E3-	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	5
T1	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	5
T2	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	5
M2	0,3333	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	4
S1	0,25	0,25	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5	1	1	2	2
S3	0,25	0,25	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5	1	1	2	2
T4	0,2	0,2	0,25	0,25	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,5	0,5	0,5	1	2
S2	0,1429	0,1667	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,25	0,5	0,5	0,5	1
SOM	7,176	8,367	12,62	12,62	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	17,58	37	37	44,5	64

Genormaliseerde Scores															
	M4	T3	M1	M3	E1	E2	E3+	E3-	T1	T2	M2	S1	S3	T4	S2
M4	0,1393	0,1195	0,1585	0,1585	0,1408	0,1408	0,1408	0,1408	0,1408	0,1408	0,1706	0,1081	0,1081	0,1124	0,1094
T3	0,1393	0,1195	0,0793	0,0793	0,1408	0,1408	0,1408	0,1408	0,1408	0,1408	0,1137	0,1081	0,1081	0,1124	0,0938
M1	0,0697	0,1195	0,0793	0,0793	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,1137	0,0811	0,0811	0,0899	0,0781
M3	0,0697	0,1195	0,0793	0,0793	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,1137	0,0811	0,0811	0,0899	0,0781
E1	0,0697	0,0598	0,0793	0,0793	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,0569	0,0811	0,0811	0,0674	0,0781
E2	0,0697	0,0598	0,0793	0,0793	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,0569	0,0811	0,0811	0,0674	0,0781
E3+	0,0697	0,0598	0,0793	0,0793	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,0569	0,0811	0,0811	0,0674	0,0781
E3-	0,0697	0,0598	0,0793	0,0793	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,0569	0,0811	0,0811	0,0674	0,0781
T1	0,0697	0,0598	0,0793	0,0793	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,0569	0,0811	0,0811	0,0674	0,0781
T2	0,0697	0,0598	0,0793	0,0793	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,0569	0,0811	0,0811	0,0674	0,0781
M2	0,0464	0,0598	0,0396	0,0396	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,0704	0,0569	0,0541	0,0541	0,0674	0,0625
S1	0,0348	0,0299	0,0264	0,0264	0,0235	0,0235	0,0235	0,0235	0,0235	0,0235	0,0284	0,027	0,027	0,0449	0,0313
S3	0,0348	0,0299	0,0264	0,0264	0,0235	0,0235	0,0235	0,0235	0,0235	0,0235	0,0284	0,027	0,027	0,0449	0,0313
T4	0,0279	0,0239	0,0198	0,0198	0,0235	0,0235	0,0235	0,0235	0,0235	0,0235	0,019	0,0135	0,0135	0,0225	0,0313
S2	0,0199	0,0199	0,0159	0,0159	0,0141	0,0141	0,0141	0,0141	0,0141	0,0141	0,0142	0,0135	0,0135	0,0112	0,0156
SOM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

PV		Consistentie	
Indic.	Gewicht	GS	SS / Gew.
M4	0,1353	2,0573	15,205
T3	0,1199	1,8203	15,181
M1	0,0809	1,2299	15,195
M3	0,0809	1,2299	15,195
E1	0,0717	1,0877	15,176
E2	0,0717	1,0877	15,176
E3+	0,0717	1,0877	15,176
E3-	0,0717	1,0877	15,176
T1	0,0717	1,0877	15,176
T2	0,0717	1,0877	15,176
M2	0,0602	0,9136	15,178
S1	0,0278	0,421	15,139
S3	0,0278	0,421	15,139
T4	0,0221	0,3347	15,126
S2	0,0149	0,2266	15,162
		0,0078	

Verdeling van de Scores															
	M4	T3	M1	M3	E1	E2	E3+	E3-	T1	T2	M2	S1	S3	T4	S2
M4	10000	10714	11538	11538	12500	12500	12500	12500	12500	12500	13636	16667	16667	18750	21429
T3	0,9333	10000	10769	10769	11667	11667	11667	11667	11667	11667	12727	15556	15556	17500	20000
M1	0,8667	0,9286	10000	10000	10833	10833	10833	10833	10833	10833	11818	14444	14444	16250	18571
M3	0,8667	0,9286	10000	10000	10833	10833	10833	10833	10833	10833	11818	14444	14444	16250	18571
E1	0,8000	0,8571	0,9231	0,9231	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10909	13333	13333	15000	17143
E2	0,8000	0,8571	0,9231	0,9231	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10909	13333	13333	15000	17143
E3+	0,8000	0,8571	0,9231	0,9231	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10909	13333	13333	15000	17143
E3-	0,8000	0,8571	0,9231	0,9231	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10909	13333	13333	15000	17143
T1	0,8000	0,8571	0,9231	0,9231	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10909	13333	13333	15000	17143
T2	0,8000	0,8571	0,9231	0,9231	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10909	13333	13333	15000	17143
M2	0,7333	0,7857	0,8462	0,8462	0,9167	0,9167	0,9167	0,9167	0,9167	0,9167	10000	12222	12222	13750	15714
S1	0,6000	0,6429	0,6923	0,6923	0,7500	0,7500	0,7500	0,7500	0,7500	0,7500	0,8182	10000	10000	11250	12857
S3	0,6000	0,6429	0,6923	0,6923	0,7500	0,7500	0,7500	0,7500	0,7500	0,7500	0,8182	10000	10000	11250	12857
T4	0,5333	0,5714	0,6154	0,6154	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,7273	0,8889	0,8889	10000	11429
S2	0,4667	0,5000	0,5385	0,5385	0,5833	0,5833	0,5833	0,5833	0,5833	0,5833	0,6364	0,7778	0,7778	0,8750	10000

Input	
Input	Indic.
4	E1
4	E2
4	E3+
4	E3-
4,3333	M1
3,6667	M2
4,3333	M3
5	M4
3	S1
2,3333	S2
3	S3
4	T1
4	T2
4,6667	T3
2,6667	T4

Output	
Indic.	Gewicht
E1	0,0717
E2	0,0717
E3-	0,0717
E3+	0,0717
M1	0,0809
M2	0,0602
M3	0,0809
M4	0,1353
S1	0,0278
S2	0,0149
S3	0,0278
T1	0,0717
T2	0,0717
T3	0,1199
T4	0,0221

Figuur B.3: Gewichtsbeplating en consistentie-check van de gewichten in Versie 2.

Versie 3: Gewichtsbepaling, puur met expert-input

Deze versie is de definitieve versie van gewichtsbepaling die in *Hoofdstuk 5* is beschreven, waar dezelfde verhoudingen van expert-scores zijn gehouden. Hier worden de expert-scores gegeven als input en de gewichten worden verwerkt en vertoond (*Figuur B.4*). Omdat deze gewichtsbepaling de AHP-methode niet volgt, is er geen behoefte aan consistentie-check. Die check is nodig in AHP om zeker te zijn dat de pairwise comparisons verstandig zijn gedefinieerd, maar in deze versie is er geen gebruik gemaakt van pairwise comparisons.

Input

Indic.	Input
E1	4,00
E2	4,00
E3+	4,00
E3-	4,00
M1	4,33
M2	3,67
M3	4,33
M4	5,00
S1	3,00
S2	2,33
S3	3,00
T1	4,00
T2	4,00
T3	4,67
T4	2,67

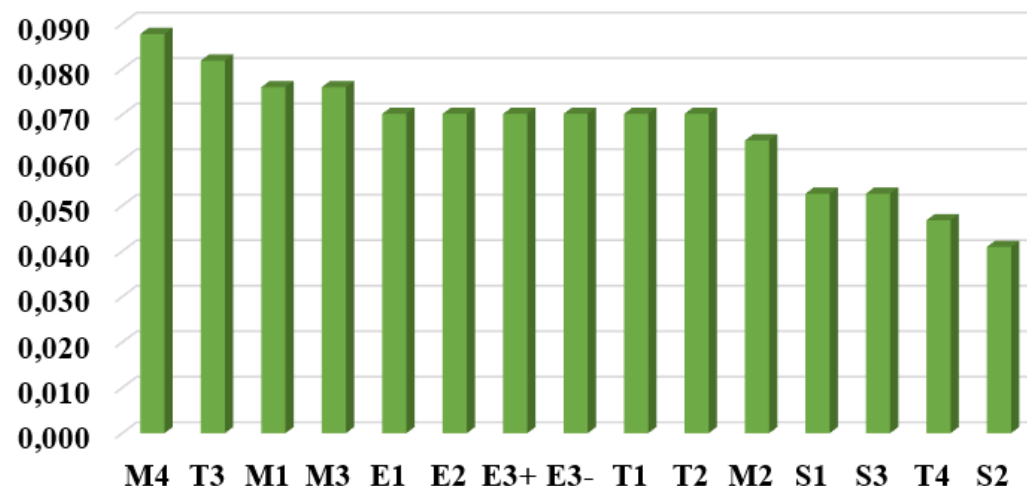
Gewichten

Indic.	Gewicht
E1	0,070
E2	0,070
E3+	0,070
E3-	0,070
M1	0,076
M2	0,064
M3	0,076
M4	0,088
S1	0,053
S2	0,041
S3	0,053
T1	0,070
T2	0,070
T3	0,082
T4	0,047

Gewichten Ranked

R	Indic.	Gewicht
1	M4	0,088
2	T3	0,082
3	M1	0,076
4	M3	0,076
5	E1	0,070
6	E2	0,070
7	E3+	0,070
8	E3-	0,070
9	T1	0,070
10	T2	0,070
11	M2	0,064
12	S1	0,053
13	S3	0,053
14	T4	0,047
15	S2	0,041

Indicatorsgewichtengewichten



Figuur B.4: Gewichtsbepaling Versie 3.