



BSC Thesis Civil Engineering

Het minimaliseren van uitvaltijd als
gevolg van inspecties en onderhoud
van vergistingsbollen bij de
rioolwaterzuiveringsinstallatie in
Hengelo

Sem Bijen

Waterschappen Vechtstromen supervisor: Thijs Evers

University of Twente supervisor: Wilco Tjhuis

31-01-2025

UNIVERSITY OF TWENTE.



Colofon

DATUM

31-01-2025

AUTEUR

Sem Bijen

PROJECT

Bachelor scriptie Civiele Techniek

EMAIL

S.Bijen@student.utwente.nl

S.bijen@vechtstromen.nl

SUPERVISIE UNIVERSITEIT TWENTE

Dr. Ir. W. Tijhuis

2^{de} BEOORDELAAR UNIVERSITEIT TWENTE

Dr. Ir. J.J. van der Werf

SUPERVISIE Waterschap Vechtstromen

Ir. T.T. Evers MBA

Voorwoord

Op dit moment gaat u de eind versie lezen voor mijn BSc scriptie Civiele Techniek aan de universiteit van Twente over het legen, inspecteren en onderhouden van de vergistingsbollen gelokaliseerd op de rioolwaterzuivering in Hengelo. Deze eindopdracht is uitgevoerd van 4-11-2024 tot 31-01-2025 bij het waterschap Vechtstromen. Het opstellen van deze scriptie was een waardevolle en leerzame uitdaging, die mijn kennis over de constructie wereld heeft verdiept.

Ik wil graag Thijs Evers en Hans Letteboer bedanken voor de supervisie die zij mij hebben gegeven vanuit het waterschap Vechtstromen en voor alle vragen die ik bij hen kwijt kon. Ook wil ik alle werknemers van het waterschap bedanken voor het beantwoorden van mijn vragen en mij een plezierige stage hebben gegeven.

Ook wil ik Wilco Tjihuis graag bedanken voor de supervisie vanuit de Universiteit van Twente. Wilco heeft mij het gehele proces begeleid en stond altijd voor mij klaar om feedback te geven op het geschreven werk.

Ik wens u veel leesplezier

Hengelo, Januari 2025

Sem Bijen

Samenvatting

Waterschap Vechtstromen beheert 23 rioolwaterzuiveringen, waarvan Hengelo en Emmen uniek zijn door hun biogasinstallaties. In Hengelo wordt slib vergist om biogas te produceren, wat jaarlijks 16 miljoen kWh elektriciteit oplevert voor 3500 huishoudens. Dit draagt bij aan de energietransitie van Nederland, met als doel om in 2050 volledig energieneutraal te zijn.

Met behulp van experts en literaire informatie wordt de huidige manier van legen, inspecteren en onderhouden van de vergistingsbollen geanalyseerd worden en kan er uiteindelijk een alternatief worden gekozen wat ervoor zorgt dat de uitvaltijd van de vergistingsbollen tijdens het legen, inspecteren en onderhouden geminimaliseerd kan worden. Waarbij het eerste alternatief een X12 laser scanner die al enige toepassing heeft in de civiele wereld voor het scannen en inspecteren van bruggen en hoge gebouwen. Het tweede alternatief is een drone die met behulp van zijn camera de inspectie kan laten uitvoeren door een arbeider buiten de vergistingsbol. Het derde alternatief is een ultrasone drone die met behulp van zijn payload ultrasone golven door de muur kan sturen en zo scheuren en breuken kan ontdekken. En tot slot is er een onderhoudsrobot aangesteld die kan helpen bij het repareren van deze scheuren en breuken. Al deze alternatieven worden getest aan elkaar door middel van een Multi Criteria decision analysis (MCDA). De criteria en wegingsfactoren zijn bepaald door de literaire werken, interviews en de wensen van het waterschap. Uiteindelijk is hier het beste alternatief uitgekomen.

Uiteindelijk is de conclusie dat de normale drone het beste alternatief is om de huidige manier van inspecteren te vervangen. Dit alternatief heeft de beste score gekregen ten opzichte van de andere alternatieven.

Summary

The Waterboard Vechtstromen compiles of 23 water treatment plants, of whom Hengelo en Emmen are unique due to their biogas installation. In Hengelo sludge is fermented in order to produce biogas, which generates 16 million kWh electricity for 3500 households. This contributes to the energy transition in the Netherlands, which states that the goal is to be completely energy neutral in 2050.

With the help of the experts and literary sources it was possible to analyze the current way of emptying, inspecting and maintaining the fermentation silo's. In the end it was possible to choose one alternative that could minimize the downtime of the fermentation silo's while they were being emptied, inspected and maintained. The first alternative will be the X12 laser scanner which is already used in the field of Civil Engineering in order to scan and inspect bridges and high buildings. The second alternative will be a drone who with the help of the camera can help the worker inspect the fermentation silo while the worker is staying outside the fermentation silo. The third alternative will be a drone that has a ultrasonic payload on his back, which can send ultrasonic waves through the fermentation silo's walls and so inspect cracks and fractions inside the wall. The last alternative is a maintenance robot which can crawl on the fermentation silo and with the help of path finding can find the cracks and fractions and eventually repair them. All these alternative will be analyzed with the help of a Multi Criteria Decision Analysis (MCDA). The criteria and weights were determined by literature, interviews and the wishes of the water board and in the end the best alternative will be chosen.

In conclusion, the best alternative to replace the current way of working is the normal drone. This alternative scored for the highest overall in comparison to the other alternatives and the current way of working.

Inhoudsopgave

Colofon.....	i
Voorwoord	ii
Samenvatting.....	iii
Summary.....	iv
Lijst met figuren en tabellen	vii
1. Introductie	1
1.1 Aanleiding	1
1.2 Onderzoeksopzet	1
1.2.1 Probleemstelling	1
1.2.2 Onderzoeksdoel.....	2
1.2.3 Onderzoeksvragen.....	2
1.2.4 Scope van het onderzoek.....	3
1.3 Leeswijzer.....	5
1.4 Samenvatting.....	5
2. De rioolwaterzuiveringsinstallatie in Hengelo.....	7
2.1 Het verwerkingsproces van de rioolwaterzuiveringsinstallatie	7
2.1.1 Het proces bij de rioolwaterzuiveringsinstallatie.....	7
2.1.2 Het proces in de vergistingsbollen	8
2.2 Legen van de vergistingsbollen.....	9
2.3 Inspectie van de vergistingsbollen	10
2.4 Onderhoud aan de vergistingsbollen	12
2.5 Verschillende types onderhoudsfilosofieën.....	13
2.5.1 Preventief onderhoud	13
2.5.2 Voorspellend onderhoud	13
2.5.3 Correctief onderhoud.....	13
2.6 Veiligheidsrichtlijnen (ATEX-richtlijnen).....	14
2.6.1 ATEX 153 richtlijn	14
2.6.2 ATEX 114 richtlijn	16
2.7 Samenvatting.....	16
3. Theoretisch raamwerk.....	17
3.1 Lean Management Theorie	19
3.2 Barrière Management Theorie	19
3.3 Samenvatting.....	20
4. Methodologie.....	21

5.	Bestaande methodes voor legen, inspecteren en onderhouden van de vergistingsbollen	22
5.1	Lasers.....	22
5.2	Drones.....	23
5.3	Onderhoud robot.....	25
5.4	Samenvatting.....	26
6.	Criteria en de bijbehorende wegingsfactoren.....	27
6.1	Multicriteria decision analysis (MCDA).....	27
6.2	Criteria voor de alternatieven	28
6.3	De bijbehorende wegingsfactoren voor de criteria	28
7.	Resultaten.....	32
7.1	Uitslagen van de methodes.....	32
7.2	Vergelijking.....	33
7.3	Multi criteria decision analysis	41
8.	Discussie	42
9.	Conclusie/aanbeveling waterschap	43
10.	Aanbeveling voor een vervolgonderzoek	46
11.	Referenties	47
	Bijlagen	54
	Bijlage A: RWZI processchema in Hengelo	54
	Bijlage B: Invloed factoren rondom de slibgisting.....	55
	Bijlage C: De vragen voor de expertinterviews	56
	C.1 - Expertinterview 'Legen van de vergistingsbollen' vragen.....	56
	C.2 - Expertinterview 'Inspectie van de vergistingsbollen' vragen	59
	Bijlage D: Inspectielijst.....	61
	Bijlage E: Herstelmaatregelen vloeistofdichte voorzieningen	62
	Bijlage F: LCA berekeningen	73

Lijst met figuren en tabellen

Figuur 1: Proces in de vergistingsbollen	4
Figuur 2: Interventie cyclus (Van Aken & Berends, 2018).....	4
Figuur 3: Processchema rioolwaterzuiveringsinstallatie	8
Figuur 4: In- en output van de vergistingsbollen	9
Figuur 5: Proces voor het legen van de vergistingsbollen	10
Figuur 6: Preventief, voorspellend en correctief onderhoud wegend tegen de aantal storingen en kosten (Beenen Industrial Automation, 2018).....	14
Figuur 7: Swiss Cheese Model volgens James Reason (Reason, 2000).....	18
Figuur 8: Algemeen voorbeeld van een Bowtie methodologie (Delvosalle et al., 2006).....	18
Figuur 9: Kader voor de extractie en analyse van de scheuren (Xu & Yang, 2019).....	22
Figuur 10: Scheur omschrijving: (a) een project van de puntwolk en (b) een grijze foto van de puntwolk (Xu & Yang, 2019).....	23
Figuur 11: X12 laser scanner (Geometius, z.d.).....	23
Figuur 12: Flyability ELIOS 3 (Flyability, 2022b).....	24
Figuur 13: Drone uitgerust met ultrasone lading (Flyability, 2022c).....	25
Figuur 14: MARVEL, bewegende robot (PR Office, 2022).....	25
Figuur 15: Raamwerk van om van een MCDA naar een aanbeveling te gaan	27
Figuur 16: Afmetingen robot.....	77
Tabel 1: Verschillende protocollen voor de inspectie van de vergistingsbollen (SIKB, 2018)	11
Tabel 2: Zone indeling + risicobeoordeling (Van Hulst, 2023).....	15
Tabel 3: Lijst van geïnterviewden.....	21
Tabel 4: Interview onderwerpen.....	21
Tabel 5: De criteria en hun bijbehorende wegingsfactoren waarop de alternatieven worden beoordeeld.....	29
Tabel 6: Uitslag van de MCDA voor de verschillende alternatieven	41
Tabel 7: Uitslag van de MCDA voor de verschillende altneratieven	45
Tabel 8: Afmetingen onderdelen robot	77

1. Introductie

In dit hoofdstuk wordt de aanleiding voor het onderzoek geformuleerd evenals de probleemstelling en het onderzoeksdoel. Vervolgens zullen aan de hand van de probleemstelling en het onderzoeksdoel enkele onderzoeksvragen worden geformuleerd die naarmate het onderzoek worden beantwoord. Vervolgens zal de scope van het onderzoek worden uitgelegd, zodat het onderzoek niet oneindig groot wordt en als laatste wordt er verteld wat er verwacht kan worden in dit document aan de hand van een leeswijzer.

1.1 Aanleiding

In de huidige maatschappij is er hoge nood voor duurzame energie, hier wordt dan ook hard aan gewerkt bij het waterschap Vechtstromen. Met maar liefst 23 rioolwaterzuiveringen loopt het waterschap op volle toeren (Waterschap Vechtstromen, z.d.). Hiervan zijn er 21 klassieke zuiveringen, twee zuiveringen zijn bijzonderder: Hengelo en Emmen. Wat deze locaties speciaal maakt ten opzichte van de andere rioolwaterzuivering van Vechtstromen is dat hier een biogasinstallatie staat.

In Hengelo staat een waterzuiveringsinstallatie die niet alleen ons water zuivert, maar het levert ook nog eens energie voor 3500 huishoudens en het produceert jaarlijks ook nog eens 16 miljoen kWh elektriciteit (Waterschap Vechtstromen, 2018). Dankzij de nieuwe energietransitie die Nederland is ingegaan door het ondertekenen van het Klimaatakkoord in Parijs (United Nations Climate Change, 2016). Betekent het dat Nederland in 2050 volledig energieneutraal wilt zijn (Rijkswaterstaat, 2015). Hierbij zou de duurzame slibvergisting een handje bij kunnen helpen.

Voor het opwekken van de duurzame energie voor Hengelo worden de slibvergistingsbollen gebruikt deze staan bij de rioolwaterzuiveringsinstallatie, volgend dit document RWZI genoemd, in Hengelo. Deze vergistingsbollen maken door middel van vergisting van slib biogas, waar dan uiteindelijk weer energie van gemaakt kan worden. Om het gehele proces te zien, van afvalwater tot energie, wordt er verwezen naar Bijlage A 'RWZI processchema in Hengelo'. Hierin zijn alle stappen zichtbaar die aantonen hoe het afvalwater wordt omgezet tot energie. Tevens zal hier ook nog een korte uitleg over komen in hoofdstuk 2.1 'De rioolwaterzuiveringsinstallatie in Hengelo'.

1.2 Onderzoeksopzet

In de onderzoeksopzet zullen de probleemstelling en het onderzoeksdoel worden geformuleerd. Aan de hand van het onderzoeksdoel en de probleemstelling zullen verschillende onderzoeksvragen worden geformuleerd die helpen om de probleemstelling te voorzien van een antwoord en het bereiken van het onderzoeksdoel.

1.2.1 Probleemstelling

De RWZI in Hengelo levert aan 3500 inwoners energie, dit komt doordat de vergistingsbollen dag en nacht draaien waardoor er dag en nacht energie geleverd kan worden. Daarentegen moeten de vergistingsbollen eens in de zoveel jaar ook worden gecontroleerd. Dit betekent zoals zichtbaar is in het processchema in bijlage A, dat de RWZI niet op volle toeren kan draaien vanwege het tijdelijk buiten gebruik stellen van een van de drie vergistingsbollen vanwege de controle. Voordat de controle uitgevoerd kan worden moeten ze eerst gelegeerd worden en daarna eventueel onderhouden worden.

Het waterschap wil de inspecties zo snel mogelijk achter zich laten, zodat alle drie de vergistingsbollen weer operationeel worden, zodat zij de kosten die ze maken kunnen minimaliseren.

“Het waterschap heeft momenteel geen alternatieve leging, inspectie en onderhoud methodes om uitval van de vergistingsbollen te minimaliseren.”

Door het vaststellen van het probleem kan er een doel worden opgesteld wat er dan weer voor kan zorgen dat het onderzoek in dezelfde richting blijft gaan en niet afwijkt naar randzaken.

1.2.2 Onderzoeksdoel

Zoals hierboven is beschreven in de probleemstelling heeft het waterschap beperkte informatie over het minimaliseren van de uitvaltijd van de vergistingsbollen. Hierbij kan het volgende project doel worden geformuleerd:

“Het doel is om meer inzicht te krijgen in wat de mogelijkheden zijn om de uitvaltijd van de vergistingsbollen te minimaliseren, zodat de leging, inspectie en onderhoud aan de vergistingsbollen kan worden uitgevoerd. Waarbij veiligheid van hoogst belang is.”

Aan de hand van zowel het project doel als de probleemstelling, zullen de volgende hoofdvraag en deelvragen worden geformuleerd en deze zullen dan helpen om ervoor te zorgen dat het project doel wordt gehaald.

1.2.3 Onderzoeksvragen

In de volgende paragrafen worden de hoofdvraag en de deelvragen geformuleerd, hierbij zal er een beschrijving worden getoond die de desbetreffende vraag kort omschrijft en aangeeft waarom de deelvraag in kwestie helpt bij het beantwoorden van de hoofdvraag. Ook zal er een uitleg gegeven worden over waarom de hoofdvraag op deze manier geformuleerd is.

Hier zal de hoofdvraag omschreven worden, hierbij zal er ook uitleg worden gegeven over de inhoud van de hoofdvraag en een uitleg over de interpretatie van de hoofdvraag.

“Hoe kan ervoor gezorgd worden dat de uitvaltijd van de vergistingsbollen geminimaliseerd wordt tijdens het legen, inspecteren en het plegen van onderhoud aan de vergistingsbollen in Hengelo?”

De hoofdvraag beoogt een aanbeveling te doen aan het waterschap, zodat er een oplossing gevonden kan worden om de uitvaltijd van de vergistingsbollen te minimaliseren, zodat deze geleegd, geïnspecteerd en onderhouden kunnen worden. Met het woord uitvaltijd wordt het volgende bedoeld: de tijd dat de vergistingsbollen niet operationeel zijn vanwege de leging, inspectie of onderhoud aan hen. De reden voor deze hoofdvraag is dat er op lange termijn meer energie geproduceerd kan worden door middel van het gebruiken van deze vergistingsbollen.

In deze paragrafen worden de deelvragen geformuleerd, met behulp van deze deelvragen kan de hoofdvraag beantwoord worden. Bij het benoemen van de deelvragen zal er ook uitleg gegeven worden over wat de deelvraag precies inhoudt.

1. *“Wat is op dit moment de handelwijze voor het legen, inspecteren en het onderhouden van de vergistingsbollen die wordt toegepast in Hengelo?”*

De eerste deelvraag is om te beschrijven wat de huidige handelwijze is om de vergistingsbollen te legen, inspecteren en onderhouden om vervolgens te onderzoeken wat de criteria zijn. Door te onderzoeken wat de huidige handelwijze is, kan de onderzoeker erachter gekomen wat de specifieke redenen voor

de huidige reparatie strategie zijn. Er zal gekeken worden naar de huidige handelwijze van legen, inspecteren en onderhouden van de vergistingsbollen en de redenen waarom deze handelwijze wordt toegepast.

2. *“Welke huidige methodes worden al toegepast in de huidige markt om vergistingsbollen of andere silo’s te legen, inspecteren en onderhouden en wat zijn de positieve en negatieve aspecten hiervan?”*

Door de tweede deelvraag kan er gekeken worden naar de methodes die al bestaan en de redenen achter het gebruik van deze methodes. Hierdoor kunnen deze methodes worden vergeleken met de criteria die zijn opgesteld, wat ervoor zorgt dat er een antwoord komt op de hoofdvraag. Ook bestaat er een mogelijkheid dat er gekeken wordt naar methodes die worden toegepast op andere silo’s, dit hoeven niet per se vergistingsbollen te zijn. Er zal voor iedere silo een manier zijn, waarop de controleurs de silo binnen treden of het inspecteren door middel van het gebruik van een ander hulpmiddel.

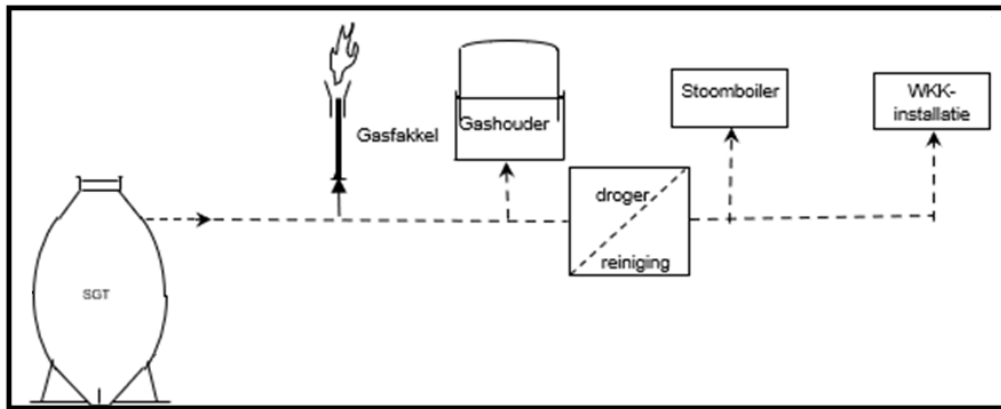
3. *“Wat zijn de criteria en wegingsfactoren voor het vaststellen van de meest optimale oplossing, zodat de uitvaltijd van de vergistingsbollen tijdens het legen, inspecteren en onderhouden geminimaliseerd in Hengelo kan worden?”*

De derde deelvraag is bedoeld voor het afbakenen van het project, waarbij verschillende factoren die buiten de criteria vallen uitgesloten kunnen worden. De criteria worden bepaald door middel van inzichten van experts en literatuuronderzoek. Met behulp van deze criteria en hun bijbehorende wegingsfactoren kan uiteindelijk een aanbeveling worden gedaan voor een van de onderzochte methoden.

1.2.4 Scope van het onderzoek

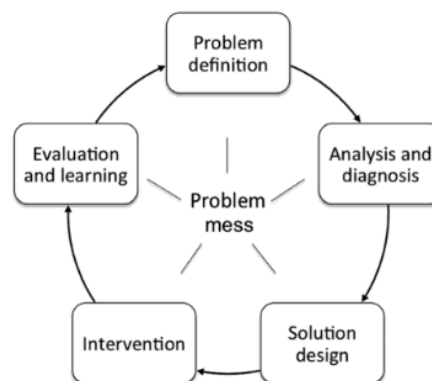
De scope van het onderzoek wordt beschreven in deze paragrafen. Er zijn drie scopes die worden geschetst, zodat er een goed domein kan worden vastgesteld en waar later naar kan verwezen worden waarom er niet naar andere factoren gekeken wordt.

Het eerste gedeelte van het domein ligt bij het processchema (bijlage A ‘RWZI processchema in Hengelo’), dit schema geeft weer wat het gehele proces, hoe het waterschap van afvalwater naar biogas/slibkoek gaat, is binnen de waterzuivering. Zoals bijlage A ‘RWZI processchema in Hengelo’ weergeeft, is dit een groot en uitbundig proces waarbij er veel kleine processen bezig zijn. Hierdoor zal de afbakening ook komen te liggen op een van de kleinere processen, namelijk het proces binnen en rondom de vergistingsbollen. Voor een beter beeld van dit proces wordt er verwezen naar figuur 1. De reden voor het buiten bestek laten van de overig processen is, omdat er niet een concreet probleem is vastgesteld bij deze processen, waardoor er nog geen actieplan gemaakt kan worden.



Figuur 1: Proces in de vergistingsbollen

Het tweede gedeelte van het domein is de interventie-cyclus die zichtbaar is figuur 2. Deze interventiecyclus is een cyclus die blijft doorgaan met elk probleem wat er bestaat. In dit onderzoek zal het blijven bij de design fase, dit is omdat er een probleem aanwezig is, waar nog een eventuele oplossing voor gevonden moet worden, hierbij is er dus behoefte aan een actieplan en dat is dus waarom het wordt afgebakend bij de design fase. Dit onderzoek richt zich erop dat er een aanbeveling wordt geformuleerd aan het einde van het onderzoek aan de hand van verschillende criteria. Deze aanbeveling wordt puur gebaseerd op deze criteria. Houdt bijvoorbeeld geen rekening met de storingen, inefficiënties en knelpunten die als gevolg van toepassing kunnen zijn. De aanbeveling wordt exclusief gebaseerd op de criteria die worden gegeven door experts van het waterschap en andere literaire bronnen, zoals veiligheidsrichtlijnen.



Figuur 2: Interventie cyclus (Van Aken & Berends, 2018)

Het laatste gedeelte van het domein is al genoemd, dit zijn namelijk de criteria die worden gebruikt, zodat er een aanbeveling geformuleerd kan worden. Deze criteria worden gebaseerd op de experts van het waterschap, dit zijn de werklieden die dagelijks bezig zijn met deze vergistingsbollen, de werklieden die de vergistingsbollen legen, inspecteren en onderhouden. Tevens zullen er ook literaire bronnen worden gebruikt die van toepassing zijn op deze vergistingsbollen. Factoren of criteria die niet worden opgenomen in de lijst met criteria, worden daarom ook niet meegenomen in dit onderzoek. Dit is omdat het onderzoek anders oneindig groot wordt vanwege de vele criteria die meegenomen kunnen worden.

1.3 Leeswijzer

Dit document bevat per hoofdstuk de volgende informatie: hoofdstuk 1 zal een introductie geven van het onderzoek, hierbij wordt de aanleiding voor het onderzoek genoemd. Wat het probleem is van het waterschap en wat het uiteindelijke doel van het onderzoek is. Vervolgens zullen de onderzoeksvragen geformuleerd worden met daarbij het domein van het onderzoek.

Daaropvolgend zal hoofdstuk 2 'De rioolwaterzuiveringsinstallatie in Hengelo' een uitleg geven over hoe het waterschap Vechtstromen van rioolwater biogas en oppervlaktewater maakt. Tevens wordt er ook een uitleg gegeven over het leeghalen, inspecteren en controleren van de vergistingsbollen, hierna zal er een uitleg geformuleerd zijn over de verschillende onderhoudsfilosofieën die toegepast kunnen worden. Waarna het hoofdstuk afgesloten wordt met een uitleg over twee ATEX-richtlijnen. Deze richtlijnen zijn van belang bij het legen, inspecteren en controleren van de vergistingsbollen.

Daarna zal hoofdstuk 3 'Theoretisch kader' formuleert de verschillende theorieën die als basis staan voor dit onderzoek.

Hierna zal hoofdstuk 4 'Methodologie' vertellen over de informatie die vergaard is voor zowel de deelvragen als de hoofdvraag, hierbij zal er verteld worden over hoe de onderzoeker de informatie heeft vergaard, zodat deze tot een antwoord kon komen. Om de hoofdvraag en deelvragen alvast te lezen wordt er verwezen naar hoofdstuk 1.2.3 'Onderzoeksvragen'.

Daaropvolgend vertelt hoofdstuk 5 'Bestaande methodes voor het legen, inspecteren en onderhouden van de vergistingsbollen' meer over de bestaande methodes die eventueel al worden gebruikt voor het legen, inspecteren en onderhouden van andere vergistingsbollen of silo's in de huidige markt.

Aansluitend zal hoofdstuk 6 'Criteria en de bijbehorende wegingsfactoren' formuleren wat de criteria worden voor het besluiten van de beste mogelijkheid van de bijbehorende methodes. Hier zullen ook de verschillende wegingsfactoren voor de criteria worden geformuleerd, zodat er een Multicriteria decision analysis (MCDA) verwoord kan worden.

Vervolgens zal hoofdstuk 7 'Resultaten' de resultaten weergeven van het onderzoek wat is opgesteld, hierbij zal er antwoord worden gegeven op de onderzoeksvragen. Deze zullen in detail zijn uitgewerkt aan de hand van de MCDA.

Daarna zal hoofdstuk 8 'Discussie' verwoorden wat de relevantie van het gehele onderzoek is en daarbij zal dit hoofdstuk ook uitleggen wat de zwakke punten van het onderzoek waren.

Vervolgens zal hoofdstuk 9 'Conclusie/aanbeveling waterschap' een antwoord geven op de hoofdvraag en direct ook een aanbeveling geven aan het waterschap.

Tot slot zal hoofdstuk 10 'Aanbeveling voor een vervolgonderzoek' de aanbeveling formuleren die een volgende onderzoeker kan toepassen als deze het huidige document dient te gebruiken.

1.4 Samenvatting

Samengevat heeft het waterschap Vechtstromen geen alternatieve legings-, inspectie- en onderhoudsmethodes voor het minimaliseren van de uitvaltijd van de vergistingsbollen, zodat de leging, inspectie en onderhoud geoptimaliseerd kunnen worden. Met als uiteindelijk doel om meer inzicht te krijgen in wat de mogelijkheden zijn om de uitvaltijd van de vergistingsbollen te minimaliseren, zodat de leging, inspectie en onderhoud aan de vergistingsbollen kan worden

uitgevoerd. Waarbij veiligheid van hoogst belang is. Hier zijn de hoofdvraag en drie deelvragen voor opgesteld, namelijk:

- 1) Hoe kan ervoor gezorgd worden dat de uitvaltijd van de vergistingsbollen geminimaliseerd wordt tijdens het legen, inspecteren en het plegen van onderhoud aan de vergistingsbollen in Hengelo?"

Wat is op dit moment de handelwijze voor het legen, inspecteren en het onderhouden van de vergistingsbollen die wordt toegepast in Hengelo?

Welke huidige methodes worden al toegepast om de vergistingsbollen of andere silo's te legen, inspecteren en onderhouden en wat zijn de positieve en negatieve aspecten hiervan?

Wat zijn de criteria en wegingsfactoren voor het vaststellen van de meest optimale oplossing, zodat de uitvaltijd van de vergistingsbollen tijdens het legen, inspecteren en onderhouden geminimaliseerd in Hengelo kan worden?

Met als laatste een aanscherping door middel van het stellen van een domein aan dit onderzoek. Het domein bestaat uit de interventiecyclus, de aangestelde criteria en het proces van de vergistingsbollen.

2. De rioolwaterzuiveringsinstallatie in Hengelo

In dit hoofdstuk er worden verteld over de verschillende processen die bezig zijn bij de rioolwaterzuiveringsinstallatie in Hengelo. Hierbij zal het gehele waterzuiveringsproces worden doorgelopen, er zal worden verteld hoe er van afvalwater energie wordt gemaakt en wat er met alle restanten van het proces gebeurt. Vervolgens wordt er ingezoomd op de vergistingsbollen en het legen, inspecteren en onderhouden van deze vergistingsbollen en wordt dit proces in het kort uitgelegd. Tot slot bevat dit hoofdstuk nog informatie over de veiligheidsrichtlijnen die in het achterhoofd gehouden moeten worden tijdens de hierboven geschreven processen bij de vergistingsbollen.

2.1 Het verwerkingsproces van de rioolwaterzuiveringsinstallatie

In de volgende paragrafen zal er geformuleerd worden hoe de rioolwaterzuiveringsinstallatie opereert, hierbij zal er door het gehele proces van afvalwater naar slibkoek gelopen worden, zodat er een beeld geschetst kan worden van hoe de rioolwaterzuiveringsinstallatie handelt. Vervolgens wordt er ingezoomd op de vergistingsbollen, hier gaat immers het onderzoek over, hier zal ook een uitleg gegeven worden voor hoe de vergistingsbollen functioneren en wat de in- en output van deze vergistingsbollen zijn.

2.1.1 Het proces bij de rioolwaterzuiveringsinstallatie

De rioolwaterzuiveringsinstallatie begint bij de aanvoer van het afvalwater vanuit Hengelo, Hengelose es en het Twentekanaal. Het afvalwater wat hier aankomt bevat nog allemaal vervuiling (bijvoorbeeld baby doekjes, kunstgebitten en telefoons (Waterschap Vechtstromen, 2018)) deze vervuiling moet eruit worden gefilterd, dit gebeurt door middel van een roostergoedinstallatie, hier zijn er twee van in gebruik aangezien het eerste rooster het afvalwater wat uit Hengelo, Hengelose es en het Twentekanaal komt filtert en de andere roostergoedinstallatie zuivert het afvalwater vanuit Borne en Delden.

Na het zuiveren van alle grote vervuiling, wordt het water omhoog gebracht door een schroef. Het water wordt omhoog gebracht, zodat het waterzuiveringsproces volledig kan opereren door middel van zwaartekracht. Het water loopt van bezinkingstank naar bezinkingstank.

Als het water eenmaal omhoog is gebracht, zal het zand uit het water worden gefilterd. Dit zand zit in het water, omdat er tijdens regenbuien water de riolering inspoelt, hierbij komt ook zand mee wat op de wegen of tussen de tegels is gevestigd. Het zand wordt uit het water gefilterd aangezien het zand zorgt voor slijtage bij de pompen.

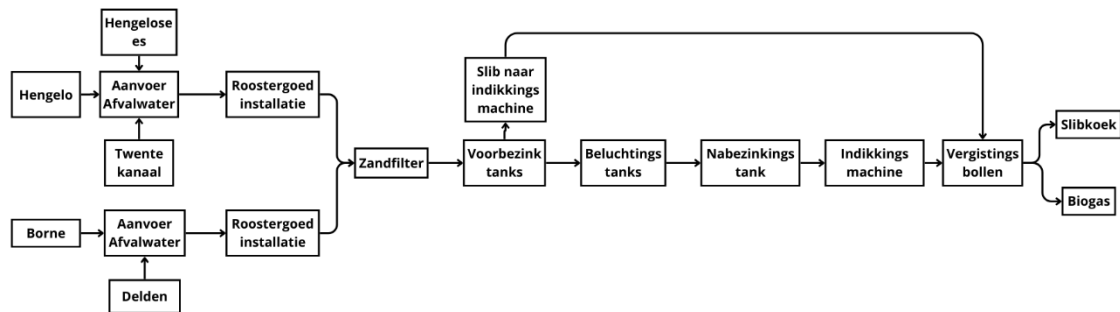
Na de zuivering van het zand uit het rioolwater, komt het water bij de voorbezinkingstanks. In deze voorbezinkingstanks wordt de poep gescheiden van het water, dit gebeurt doordat de poep bezinkt in de voorbezinkingstanks. Het slib wat hieruit voortkomt wordt primair slib genoemd. Het primaire slib wordt vervolgens afgevoerd naar de vergistingsbollen.

Het rioolwater komt vervolgens terecht in beluchtingstanks waar er bacteriën aan worden toegevoegd, deze bacteriën eten zich helemaal vol met vervuilende deeltjes, waardoor er nitrificatie plaatsvindt. Aangezien deze bacteriën zich volledig voeden met vervuilende deeltjes, waardoor ze zich zo snel vermenigvuldigen dat ze op de bodem neervallen en dan worden afgevoerd naar de industriefabriek.

Na de beluchtingstanks komt het water in de nabezinkingstank, hierdoor zakt het overige slib naar de bodem, wat wordt afgevoerd naar de indikkingsmachines. Het water wat overblijft gaat weer terug

naar de beluchtingstanks en uiteindelijk zal het water worden gedumpt in de sloot of wordt het opgenomen in het oppervlaktewater. Het water wat uit de nabezinkingstanks komt is geen drinkwater.

Vervolgens wordt het slib in de indikkingstanks even goed ingedikt tot een stroperige substantie, dit gebeurt alleen bij het secundaire slib. Secundair slib is het slib wat vanuit de nabezinkingstanks/afgevoerde bacteriën komt en primair slib komt vanuit de voorbezinkingstanks (STOWA, 2011). Hierna komt al het slib samen in de vergistingsbollen, hier wordt dan weer biogas en slibkoek van gemaakt. Om het proces in detail te zien wordt er verwezen naar bijlage A 'RWZI processchema in Hengelo' om een simpelere versie van het proces te zien wordt er verwezen naar figuur 3.

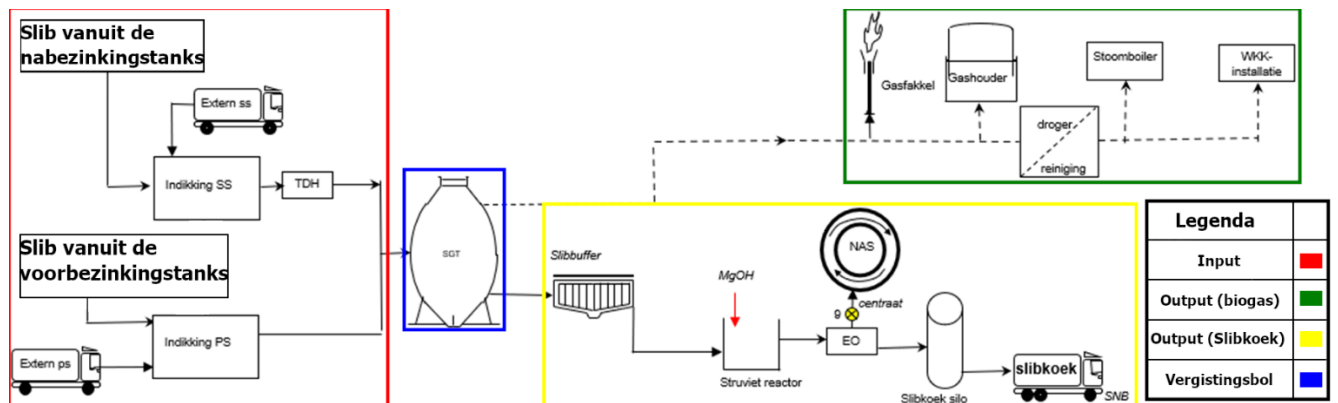


Figuur 3: Processchema rioolwaterzuiveringsinstallatie

2.1.2 Het proces in de vergistingsbollen

De vergistingsbollen zijn de machines waar het slib wordt omgezet tot biogas, dit gebeurt door middel van verschillende processen die hierin plaatsvinden. De input van de vergistingsbollen is de primaire slib en secundaire slib dat wordt aangevoerd vanuit de voorbezinkingstanks en de indikkingsmachines. Tevens wordt er rekening gehouden met het droge stofgehalte, droge stofgehalte betekent het vochtgehalte wat nog aanwezig is in het materiaal nadat het water is verwijderd (Nennich & Chase, 2019), en het organisch stofgehalte, is het organische materiaal wat aanwezig is in het materiaal na het bezinkingsproces (STOWA, 2011), wat in de primaire en secundaire slib bevindt.

Vervolgens zitten alle bestanddelen in de slibvergistingstank, waarna het vergistingsproces begint. Het slib wordt opgevangen in de slibvergistingstank, vervolgens wordt het primaire slib en het secundaire slib gemixt. Daarna zal de gasfakkel worden aangezet, dit zorgt ervoor dat het slib wordt verwarmd, zodat er biogas vrijkomt uit het gemixte slib. Het biogas wordt hierna gedroogd en gereinigd, daarna wordt het gestoomd. Tot slot wordt het biogas opgeslagen in silo's om daarna de warmtekrachtkoppeling (WKK) in te gaan, zodat er energie van gemaakt kan worden. De WKK heeft wel een maximum (1200 kWh) waardoor er niet een oneindige hoeveelheid biogas verbrandt kan worden op één moment. Voor de uitgebreide versie van de input, het proces en de output wordt er verwezen naar bijlage A 'RWZI processchema in Hengelo' en bijlage B 'Invloed factoren rondom de slibgisting'. Om een duidelijker beeld te krijgen van de input, output en het proces in de vergistingsbollen wordt er verwezen naar figuur 4.



Figuur 4: In- en output van de vergistingsbollen

2.2 Legen van de vergistingsbollen

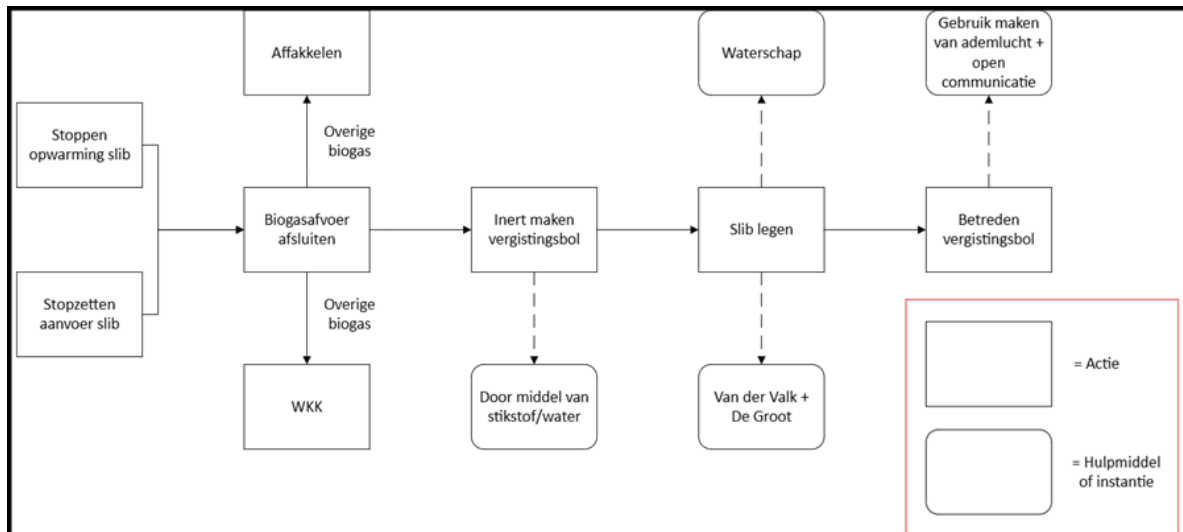
Aan het legingsproces van de vergistingsbollen zitten een hoop voorwaarden, zodat er niks fout kan gaan. Deze voorwaarden staan vermeld in de ATEX-veiligheidsrichtlijnen, om te weten welke richtlijnen dat wordt verwezen naar hoofdstuk 2.6 'Veiligheidsrichtlijnen (ATEX-richtlijnen)'. De ATEX-veiligheidsrichtlijnen staan in een document waarin beschreven wordt wat de richtlijnen zijn voor de leging van explosiegevaarlijke installaties, zodat onderhoudswerkzaamheden aan de vergistingsbollen op een veilige manier kunnen worden uitgevoerd. Voor elke situatie en locatie waar een slibvergistingsinstallatie staat en waaraan onderhoudswerkzaamheden moeten worden uitgevoerd, moet een nieuw document voor gemaakt worden wat dan weer wordt gecontroleerd aan de hand van de ATEX-veiligheidsrichtlijnen, eveneens zal hierbij altijd verwezen worden naar de explosieveiligheid/ATEX regels (Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid, 2014).

Het legen van de vergistingsbollen begint met het stopzetten van de opwarming van het slib, hierdoor daalt het biogasgehalte tot een minimum. Vervolgens moet de aanvoer van het slib worden stopgezet dit kan tegelijkertijd met het stopzetten van de opwarming, hierdoor komt er niet nog meer slib in de vergistingsbollen. Daarna wordt de biogasafvoer naar de gashouder afgesloten, hierdoor zorgt men ervoor dat de vergistingsbollen niet imploderen.

Naarmate de overvloed aan biogas is afgefakkeld indien nodig, kan het inertiseren van de tank beginnen. Volgens Air Products (z.d.) is inertiseren het volgende: "Inertiseren, ook wel blanketing genoemd, is het proces waarbij de atmosferische lucht rond een stof of materiaal wordt vervangen door een niet-reactief gas, zoals stikstof of argon, om ervoor te zorgen dat het in een passieve of niet-reactieve toestand blijft." De tank wordt geopend en middels natuurlijke ventilatie inert gemaakt door Van der Valk + De Groot, het bedrijf achter het reinigen van de vergistingsbollen, voor de rest van de informatie wordt er een verwijzing gemaakt naar bijlage C.1 Expertinterview 'Legen van de vergistingsbollen'. Zij doen dit met stikstof en/of met water, door hiermee de temperatuur snel omlaag te brengen is de duur van het inertiseren korter.

Hierna moet de tank nog zover dat mogelijk is leeg gemaakt worden meestal doet het waterschap dit zelf, maar Van der Valk + De Groot zou eventueel het rest slib zelf ook kunnen verwerken op locatie middels een centrifuge en slibscheiding installatie. Indien men geen centrifuge wil gebruiken, kan men slib/water op de zuivering laten verwerken en is alleen een slibscheiding installatie nodig. Er komen drie afvalstromen uit de vergistingsbol, namelijk zand, roostergoed en water/slib en deze komen dan in verschillende containers terecht.

Tot slot als al het slib in de tank zoevergedaald is dat het betreden mogelijk is, dan gebruikt VanderValk + DeGroot ademlucht met open communicatie om de reiniging in de tank te voltooien, hierbij worden de vergistingsbollen van de binnenkant schoon geschrobd, zodat de inspectie kan beginnen. Een simplere versie van het legings- en reinigingsproces is weergegeven in figuur 5.



Figuur 5: Proces voor het legen van de vergistingsbollen

2.3 Inspectie van de vergistingsbollen

Inspecties worden uitgevoerd aan de hand van verschillende protocollen. Hierbij wordt er vooral gebruik gemaakt van AS 6700, voor verdere uitleg over deze norm wordt er verwezen naar tabel 1, en de hierbij genoemde protocollen die beschikbaar zijn gemaakt door het Stichting Infrastructuur Kwaliteitsborging Bodembeheer (SIKB, 2018). Voor de inspectie wordt er gebruik gemaakt van een inspectielijst deze is weergegeven in bijlage D: Inspectielijst. De inspectielijst kijkt naar de volgende punten: oppervlak, afdichtingen, afwatering, bedrijfsriolering, algemene indruk en tot slot het geomembraanbaksysteem.

Hierbij wordt er nog onderscheid gemaakt tussen verschillende protocollen die gedaan kunnen worden. Protocol 6701 verwoordt een visuele inspectie van de vloeistofdichtheid (SIKB, 2024a), terwijl protocol 6702 een overzicht geeft voor een geo-elektrische meting (SIKB, 2024b), hiermee kunnen breuken of scheuren worden opgespoord die met het blote oog niet zichtbaar zijn en tot slot heb je protocol 6703 die aangeeft wat te doen bij een hydrologische meting vloeistofdichtheid (SIKB, 2024c), volgens Roel Vink (Inspecteur ABV Haukes) wordt dit uitgevoerd op oppervlaktes tot een grootte van 40 m² vanwege de meetnauwkeurigheid die behaald moet worden bij deze oppervlaktes. Deze informatie is weergegeven in een interview voor dit interview wordt er verwezen naar Bijlage C.2: 'Inspectie van de vergistingsbollen'.

Een overzicht van de protocollen, de naam van de protocollen en een samenvatting van deze protocollen zijn nog eens weergegeven in tabel 1.

Tabel 1: Verschillende protocollen voor de inspectie van de vergistingsbollen (SIKB, 2018)

Protocol	Naam	Samenvatting
AS 6700	Inspectie bodembeschermende voorzieningen	Het protocol stelt richtlijnen vast voor de uitvoering van inspecties, de kwalificaties van inspecteurs en de rapportage van bevindingen, met als doel de kwaliteit en betrouwbaarheid van bodembeschermende maatregelen te waarborgen.
Protocol 6701	Visuele inspectie vloeistofdichtheid	Het protocol stelt richtlijnen vast voor inspectiemethoden, kwalificaties van inspecteurs en rapportagevereisten om de kwaliteit en betrouwbaarheid van deze inspecties te waarborgen.
Protocol 6702	Geo-elektrische meting	Dit protocol stelt richtlijnen vast voor de uitvoering van dergelijke metingen, de kwalificaties van inspecteurs en de rapportage van bevindingen om de kwaliteit en betrouwbaarheid van bodembeschermende maatregelen te waarborgen.
Protocol 6703	Hydrologische meting vloeistofdichtheid	Dit protocol stelt richtlijnen vast voor de uitvoering van dergelijke metingen, de kwalificaties van inspecteurs en de rapportage van bevindingen om de kwaliteit en betrouwbaarheid van bodembeschermende maatregelen te waarborgen.

Om deze inspecties uit te kunnen voeren in de vergistingsbollen, moeten de desbetreffende arbeiders eerst de vergistingsbollen in; hierbij wordt er gebruik gemaakt van een steiger, zodat de wanden geïnspecteerd kunnen worden. Tevens moet er wel rekening worden gehouden met verschillende veiligheidsaspecten tijdens het inspecteren van de vergistingsbol. Hiervoor wordt er vooral gekeken naar de veiligheidsvoorschriften die worden toegepast in een besloten ruimte. Denk hierbij aan enkele gevaren zoals; bedwelming of vergiftiging, verstikking, stofexplosie of brand en nog enkele meer.

Een besloten ruimte mag uitsluitend worden betreden indien:

- het percentage zuurstof in de lucht hoger is dan 18 volumeprocenten en lager dan 21 volumeprocenten;
- de concentratie brandbare of explosieve gassen lager is dan 10 procent van de onderste explosiegrens (LEL);
- de concentratie van een stof de publieke grenswaarde, voorheen MAC, van die stof niet overschrijdt.

Tot slot zijn er nog persoonlijke beschermingsmiddelen denk hierbij bijvoorbeeld aan veiligheidsschoenen of – laarzen, speciale beschermende kleding, handschoenen, een veiligheidshelm bij grotere hoogtes, oogbescherming, gasmeter indien nodig en een portofoon. Dit zijn maar een paar van de persoonlijke beschermingsmiddelen die van toepassing kunnen zijn bij het inspecteren van de vergistingsbollen.

2.4 Onderhoud aan de vergistingsbollen

Het onderhoud aan de vergistingsbollen wordt vooral bepaald door de inspectie die is toegepast, hierbij worden uiteraard verschillende strategieën toegepast om de verschillende problemen op te lossen die tijdens de inspectie worden vastgelegd. Om te kijken naar de verschillende onderhoud oplossingen die er zijn voor de vergistingsbollen, wordt er verwezen naar Bijlage E: 'Herstelmaatregelen vloeistofdichte voorzieningen' (ODI Inspecties Bodembescherming, 2017). Hierin worden tabellen weergegeven die aangeven welke acties moeten worden uitgevoerd gebaseerd op verschillende omstandigheden.

Bij het onderhouden van de vergistingsbollen wordt er gebruik gemaakt van de inspectielijst die is opgesteld door de inspecteur. Hier kunnen verschillende mankementen zijn ontdekt die onderhouden of gerepareerd moeten worden. Bij het repareren en onderhouden van de vergistingsbollen, moet er gedacht worden aan dezelfde veiligheidsmaatregelen als bij het inspecteren. Hiervoor wordt dezelfde steiger gebruikt als bij de inspectie van de vergistingsbollen. Hieronder zullen een paar mankementen worden beschreven:

1. Scheuren in het beton
2. Breuken in het beton
3. Aantasting
4. Indringing verontreiniging
5. Bewegende elementen
6. Doorvoeren
7. Bevestigingspunten
8. Voegafdichtingen
9. Lassen, (stort-)naden en aansluitingen

Deze 9 onderhoudspunten staan voor het grootste gedeelte van de onderhoudsmogelijkheden. Hierbij worden de meeste van deze punten onderhouden indien nodig is. Hierbij zal de manier waarop deze punten worden onderhouden beschreven zijn in Bijlage E: 'Herstelmaatregelen vloeistofdichte voorzieningen'.

Hier moet nog wel bij vermeld worden dat deze tabel geldt als leidraad, de professionele mening kan nog steeds een andere mogelijkheid geven voor het onderhouden van het eventuele defect. Hierbij blijft het nog steeds de verantwoording van de houder van de voorziening/inrichting welke keuze er uiteindelijk wordt gemaakt.

Tijdens het onderhoud zal er altijd rekening gehouden moeten worden met de ATEX-veiligheidsrichtlijnen, zodat er geen explosiegevaar aanwezig is (Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid, 2014). Hierbij staat ook centraal dat er ten alle tijden, als er gecontroleerd wordt, er zich geen biogas in de omgeving bevindt. Bij het onderhoud aan de vergistingsbollen zullen vooral de scheuren gedicht worden die zijn geconstateerd bij de inspectie en eventueel zullen er nog andere mankementen worden verholpen als deze uit de inspectie zijn gekomen. Ook is het niet nodig voor alle onderhoudswerkzaamheden om de slibvergistingstank leeg te zetten, dit kost namelijk veel tijd (STOWA, 2011).

2.5 Verschillende types onderhoudsfilosofieën

Er zijn drie verschillende filosofieën over het plegen van onderhoud namelijk; preventief, voorspellend en correctief onderhoud. Hieronder worden de drie filosofieën uitgelegd en verteld waarom deze belangrijk zijn voor dit onderzoek.

2.5.1 Preventief onderhoud

Preventief onderhoud houdt in dat men de apparatuur bijvoorbeeld eens in de week gaat repareren of reinigen, voordat deze de kans heeft om kapot te gaan. Hierdoor hoopt men dat het apparaat langer meegaat en er zo voor zorgt dat een langere uitvaltijd van het apparaat voorblijft (Gross, 2002; Szwedo, 2012).

De voordelen van preventief onderhoud ten opzichte van andere typen onderhoud is dat het ervoor zorgt dat (Szwedo, 2012);

1. het leven van de apparatuur wordt verhoogd
2. Het vermindert storingen en defecten
3. Reduceren van dure uitvaltijd
4. Vermindert vervangingskosten

2.5.2 Voorspellend onderhoud

Voorspellend onderhoud plegen is een mogelijkheid voor de lange termijn, voorspellend onderhoud is vooral gebaseerd op eerdere data die verzameld is. Het betekent ook het verbeteren van productiviteit, product kwaliteit en de overall effectiviteit van de industrie die plaatsvindt op dat gebied (Moble, 2002). Volgens Mobley (2002) bestaat voorspellend onderhoud uit vijf technieken: “Trillingsbewaking, procesparameterbewaking, thermografie, tribologie en visuele inspectie. Elke techniek heeft een unieke dataset die de onderhoudsmanager helpt bij het bepalen van de werkelijke behoefte aan onderhoud.”

Hierbij moet er ook gedacht worden aan de voordelen van voorspellend onderhoud, denk hier aan een langere levensduur van de apparatuur, lagere onderhoudskosten, lagere uitvaltijd van de apparatuur, budget controle en een verbeterde routine van de onderhoudsactiviteiten (Hviid Hansen et al., 2024; Tiddens et al., 2022).

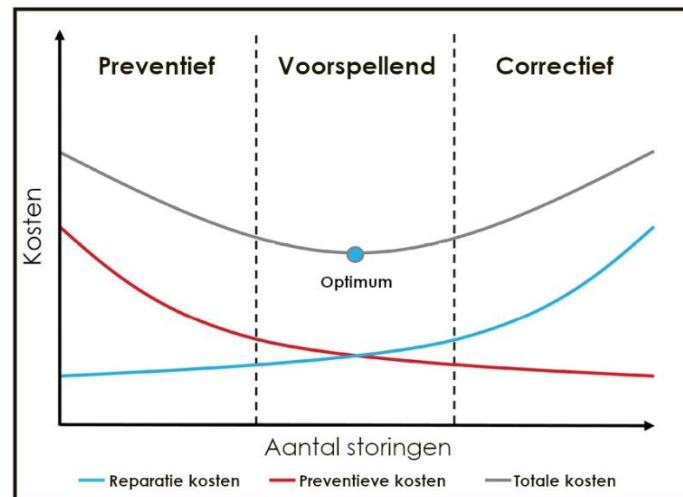
Dankzij het voorspellende onderhoud kan het betekenen dat de vergistingsbollen, op dit moment eens in de tien jaar, in een later stadium kunnen worden geleegd, geïnspecteerd en onderhouden. Wat weer als resultaat heeft dat de uitvaltijd wellicht minder wordt over een langere periode.

2.5.3 Correctief onderhoud

Volgens Costa & Balduino (2018) & West et al. (2024) betekent correctief onderhoud dat je pas onderhoud gaat plegen aan de apparatuur wanneer het kapot gaat. Volgens West et al. (2024) wordt dit vooral gebruikt in de constructie wereld, waarbij men het vooral toepast op storingen die niet te voorzien waren, noodgevallen en niet essentieel apparatuur waarbij de kosten van het proactief onderhouden groter zijn dan de voordelen die dit met zich meebrengt.

De voordelen dat deze techniek met zich meebrengt is dat je pas je apparatuur gaat vervangen of repareren indien dit pas echt nodig is, hierdoor stel je in eerste instantie de uitvaltijd uit, maar de uitvaltijd zal langer zijn wanneer het wel tijd is om je apparatuur te repareren aangezien er meer onderdelen vervangen moeten worden.

Zoals zichtbaar is in figuur 6, kunnen de drie filosofieën worden weergegeven in een storings-kosten diagram. Hierbij kunnen er twee typen kosten gemaakt worden, namelijk reparatie kosten, omdat er een onderdeel kapot is gegaan en preventieve kosten in de hoop dat het apparaat niet kapot gaat. Op dit moment wordt er voor de vergistingsbollen preventief onderhoud gepleegd, maar uiteindelijk wil het waterschap naar voorspellend onderhoud. Hierdoor blijft de uitvaltijd minimaal en blijven de kosten lager dan bij de andere twee filosofieën. Deze transitie kan gebeuren aan de hand van de inspecties die gedaan worden. Door middel van deze inspecties kan er geconstateerd worden of men langer kon wachten met de legings-, inspectie- en onderhoudsprocessen dan op dit moment is gebeurd.



Figuur 6: Preventief, voorspellend en correctief onderhoud wegend tegen de aantal storingen en kosten (Beenen Industrial Automation, 2018)

2.6 Veiligheidsrichtlijnen (ATEX-richtlijnen)

2.6.1 ATEX 153 richtlijn

De ATEX 153 veiligheidsrichtlijn die zijn opgesteld door het Europees parlement en de raad van de Europese unie bestaan uit werkgeversrichtlijnen bij explosieve gebieden. Hierbij ligt de verantwoordelijkheid vooral bij het minimaliseren van de explosierisico. In de volgende paragrafen zal er een samenvatting worden gegeven van wat de ATEX 153 richtlijn inhoudt (Europees parlement en de raad van de Europese Unie, 2000).

1. Explosieveiligheidsdocument (EVD)

- Het explosieveiligheidsdocument bevat de identificatie van de gevaren
- De beoordeling van de risico's
- De omschrijving van de bijzondere te nemen maatregelen ter bescherming van de gezondheid en veiligheid van werknemers die door explosieve atmosferen gevaar kunnen lopen.

Het explosieveiligheidsdocument moet voor de aanvang van de werkzaamheden worden opgesteld en moet worden herzien wanneer belangrijke wijzigingen, uitbreidingen of verbouwingen van de arbeidsplaatsen, arbeidsmiddelen of het arbeidsproces plaatsvinden.

2. Risicobeoordeling + classificatie zones

Er zijn verschillende classificaties met daarbij een bijbehorende zone, deze classificaties geven de risicobeoordeling aan van de desbetreffende zone. Hierbij wordt ook vermeld wat de desbetreffende zone inhoudt, voor de verschillende zones en de risicobeoordeling hiervan wordt er verwezen naar tabel 2. Hierbij geven NE, AG en NGG aan wat de zone inhoudt na de reductie van desbetreffende maatregelen.

Tabel 2: Zone indeling + risicobeoordeling (Van Hulst, 2023)

Zone indeling	Omschrijving
0 / 20	Een explosiegevaarlijke gas- of stofwolk is voortdurend of gedurende lange perioden aanwezig. Meer dan 10% van de bedrijfsduur of activiteit.
1 / 21	Kans op aanwezigheid van een explosiegevaarlijke gas- of stofwolk onder normaal bedrijf is groot. Dit betekent tussen 0,1% en 10% van de bedrijfsduur of activiteit.
2 / 22	Kans op aanwezigheid van een explosiegevaarlijke gas- of stofwolk is gering en slechts gedurende korte tijd. Minder dan 0,1% van de bedrijfsduur of activiteit.
NE	In sommige gevallen kan er een zone van verwaarloosbare omvang (NE=Negligible Extent) ontstaan, die kan worden behandeld als ongevaarlijk. Een dergelijke zone impliceert dat een explosie, als deze plaatsvindt, verwaarloosbare consequenties zal hebben. Het concept van NE-zone kan worden toegepast, ongeacht andere aanpassingen voor de risicobeoordeling voor het vaststellen van de EPL.
AG	Afwijkend Gebied (AG) is het gebied waar de aanwezigheid van ontstekingsbronnen noodzakelijk en onvermijdelijk is. Denk bijv. aan branders en ovens.
NGG	Niet-gevaarlijk gebied (NGG) met betrekking tot explosieve atmosferen. In dit gebied is een explosieve atmosfeer niet te verwachten.

3. Preventie en bescherming tegen explosies

- Het vervangen van gevaarlijke stoffen voor minder gevaarlijke stoffen als dit toepasselijk is.
- Ventileren van de ruimte waar de gevaarlijke stoffen zijn gehuisvest als dit toepasselijk is.
- Beperken van ontstekingsbronnen zoals vonken en open vuren.

4. Technische en organisatorische maatregelen

Zoals is beschreven houdt de ATEX 153 richtlijn zich vooral bezig met belangrijke wetgeving voor bescherming van werknemers in explosie gevaarlijke omgevingen. Hierbij houdt de ATEX 114 richtlijn zich vooral bezig binnen de wetgeving voor de vereisten van het apparaat en beschermingssysteem binnen explosie gevaarlijke omgevingen.

Dit betekent dat voor de nieuwe methodes die mogelijk gebruikt worden bij het legen, inspecteren of repareren van de vergistingsbollen er ten allen tijden rekening gehouden moet worden met de regels die hierboven beschreven zijn. Als een van deze regels niet toepasbaar kan worden met de nieuwe methode dient de methode verandert te worden of aangepast te worden, zodat deze wel binnen de richtlijnen valt.

2.6.2 ATEX 114 richtlijn

De ATEX 114 richtlijn omschrijft informatie met betrekking tot het keuren van apparatuur en beschermingsystemen binnen gebieden die explosie gevaarlijk zijn, hieronder worden belangrijke punten omschreven binnen de ATEX 114 richtlijn (Europees parlement en de raad van de Europese Unie, 2014).

1. *Categorisering van de apparatuur*
 - Categorie 1: Apparatuur wat geschikt is voor zone 0, volgens de ATEX 153 richtlijnen.
 - Categorie 2: Apparatuur wat geschikt is voor zone 1, volgens de ATEX 153 richtlijnen.
 - Categorie 3: Apparatuur wat geschikt is voor zone 2, volgens de ATEX 153 richtlijnen.
2. *Explosieveiligheidsnormen & certificering*
 - Apparatuur voldoen aan specifieke explosieveiligheidsnormen en ATEX-gecertificeerd wezen. Zodra de apparatuur en beschermingsystemen zich niet voldoen aan deze eisen, mogen ze niet op de markt komen binnen de Europese Unie en ook niet verkocht worden binnen de Europese Unie.
 - Testen van de apparatuur op ontstekingsbronnen.
3. *Technische specificaties & beveiliging*
 - De apparatuur mag geen statische elektriciteit opwekken als dit niet het streven is van het desbetreffende apparaat.
 - Beveiliging tegen het aanmaken van vonken en drukbeveiliging.
4. *Markering*
5. *Verantwoordelijkheden van de fabrikanten*
 - Correct ontworpen apparatuur
 - Apparatuur voldoende getest, zodat het volgens de wet in gebruik mag zijn
 - Correcte markering (CE-markering)

Zolang een fabrikant een apparaat op de markt wil brengen wat niet volgens de richtlijnen is afgesteld, dan mag deze niet gebruikt worden en ook niet verkocht worden in de winkels binnen de Europese Unie.

2.7 Samenvatting

De RWZI bestaat uit een heel ingewikkeld proces met allemaal verschillende systemen die ervoor moeten zorgen dat het rioolwater weer schoon genoeg wordt om terug in de beek te gaan. Hierbij zijn de vergistingsbollen een onderdeel, zodat er van slib biogas gemaakt kan worden, waardoor er energie gemaakt kan worden en dit proces gebeurt in de vergistingsbollen. Ook wordt er een korte uitleg gegeven van het huidige legings-, inspectie-, en onderhoudsproces. Waarbij er verschillende onderhoudsfilosofieën worden uitgelegd.

Voor de rest zijn er nog veiligheidsregels waar men zich aan moet houden, deze worden de ATEX-veiligheidsregels genoemd. Hierbij wordt er onderscheid gemaakt tussen de ATEX 153 richtlijn die zich bezighoudt met het minimaliseren van explosierisico, terwijl de ATEX 114 richtlijn zich bezighoudt met het keuren van apparatuur en beschermingsystemen binnen gebieden die explosie gevaarlijk zijn. Deze twee veiligheidsvoorschriften worden ook vaak nauw met elkaar in verband gebracht.

3. Theoretisch raamwerk

Dit theoretische raamwerk richt zich op het proces van het legen, inspecteren en onderhouden van de vergistingsbollen, met als doel het minimaliseren van de uitvaltijd van de vergistingsbollen tijdens het uitvoeren van de hierboven genoemde procedures. Hiervoor zijn er vijf theorieën geanalyseerd om te kijken welke het beste past bij dit onderzoek, de theorieën zijn hieronder geformuleerd.

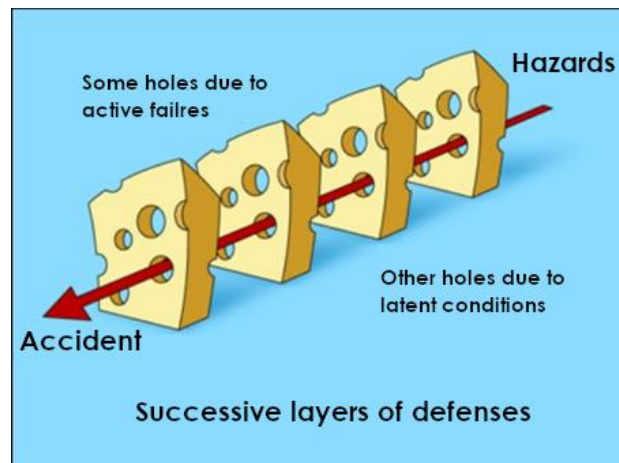
Deze vijf keuzes zijn gekozen, omdat de eerste twee zich bezighouden met het optimaliseren van een systeem. Dit is ook het doel van dit onderzoek, om de uitvaltijd te minimaliseren van de vergistingsbollen. De andere drie theorieën houden zich bezig met de barrières die zijn opgesteld, zodat in dit geval de vergistingsbollen niet exploderen of imploderen.

- 1) Six Sigma
- 2) Lean Management
- 3) Swiss Cheese Model
- 4) Bowtie Methodology
- 5) Barrier management theory

Hierbij worden twee theorieën geïntegreerd namelijk de *Lean Management Theory*, deze theorie houdt zich bezig met het optimaliseren van het desbetreffende proces (Bertagnoli, 2022; Liker, 2013; Womack & Jones, 1997) en de *Barrier Management Theory*, houdt zich vooral bezig met het effectief beheersen van de risico's die deze procedures eventueel met zich mee kunnen brengen (Pitblado et al., 2024; Standards Norway, 2010). Dit theoretische raamwerk zal de basis vormen van dit onderzoek over de vergistingsbollen. Hieronder wordt nog uitgelegd waarom de andere theorieën niet worden toegepast voor dit onderzoek.

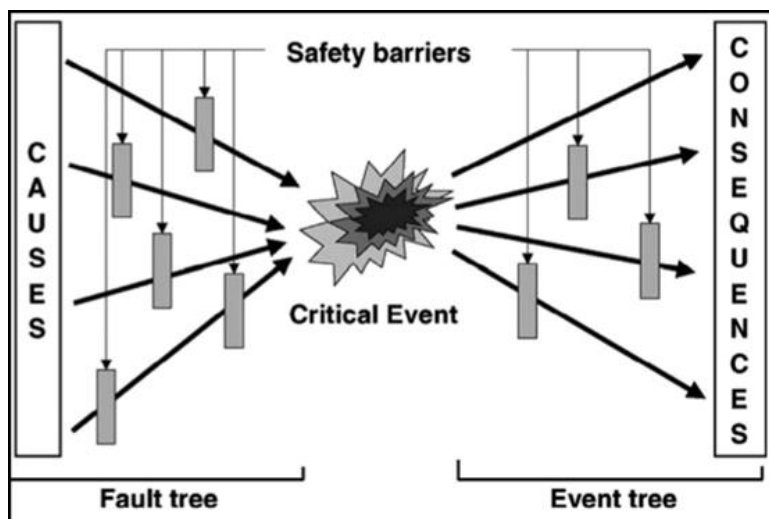
De reden voor de keuze voor deze twee theorieën is als volgt. Six Sigma richt zich op het efficiënter maken van een systeem. Het probleem hierbij is alleen dat het zich vooral richt op het kosten aspect van het efficiënter maken van dat systeem, terwijl dit in dit huidige onderzoek niet van toepassing is (Bendell, 2005; S. Reosekar & D. Pohekar, 2024). Aangezien het waterschap vooral wil dat de uitvaltijd minder wordt hier is Lean Management theorie dan wel weer een goed voorbeeld van. Lean Management theorie richt zich op het verwijderen van 'waste' in een proces. Volgens Liker (2013) zijn twee voorbeelden van waste: mensen die moeten wachten tot zij het volgende proces kunnen beginnen, omdat het proces hiervoor nog niet is afgesloten en het maken van onnodige bewegingen, zoals het lopen van extra meters of in het geval van het waterschap het opbouwen van een steiger, zodat de mensen inspecties kunnen uitvoeren.

Het Swiss Cheese model (SCM) lijkt over het algemeen redelijk veel op de Barrier management theory, maar er zijn verschillen. Het SCM richt zich vooral op de barrières die al aanwezig zijn in het huidige systeem, vervolgens worden erbij deze barrières vanuit gegaan dat er altijd een fout kan optreden bij elke barrière, deze worden gepresenteerd als de gaten in een plakje kaas (Larouzee & Le Coze, 2020), voor een voorbeeld wordt er verwezen naar figuur 7. Op een gegeven moment gaat de theorie er van uit dat deze gaten achter elkaar komen te staan, waardoor er een fout kan ontstaan, omdat de fout door alle barrières is heengegaan, vandaar figuur 7. Deze fouten worden dan weer geanalyseerd om vervolgens gerepareerd of verbeterd/vernieuwd te worden. Het probleem met het SCM ten aanzien van dit onderzoek is dat het SCM menselijke fouten ook meetelt als een barrière waardoor er een fout kan optreden (Larouzee & Le Coze, 2020). Hierdoor zegt het SCM dat zodra er een fout ontstaat het gehele systeem veranderd moet worden, terwijl dat niet nodig is bij een menselijk fout aangezien deze vaak per ongeluk gebeurt en het systeem er dus niks aan kan doen.



Figuur 7: Swiss Cheese Model volgens James Reason (Reason, 2000)

De Bowtie Methodology is een management methode dat zich bezighoudt met risico management. De Bowtie methodology staat er vooral bekend om dat het handig is in het analyseren van de verschillende risico factoren die aanwezig zijn binnen een systeem (Delvosalle et al., 2006) voor een algemeen voorbeeld van de Bowtie methodologie wordt er verwezen naar figuur 8. Het is uiteraard handig om een analyse te maken van de aanwezige risicofactoren, zodat deze later gebruikt kunnen worden om te ontdekken wat er allemaal fout kan gaan, het probleem hierbij is dan dat het geen rekening houdt met de aanwezige barrières die op dit moment die fouten moeten voorkomen (De Ruijter & Guldenmund, 2016). Bij de Bowtie Methodologie wordt er gekeken naar de barrières als individuele activa, terwijl het heel goed kan zijn dat verschillende barrières samen moeten werken, zodat ze de dreiging kunnen tegenhouden of kunnen stopzetten.



Figuur 8: Algemeen voorbeeld van een Bowtie methodologie (Delvosalle et al., 2006)

Om het onderzoek en de bijbehorende theorieën beter te kunnen begrijpen zullen er nog een paar sleutelbegrippen worden uitgelegd.

Vergistingsbollen = Een afgesloten tank waarin slib wordt vergist tot biogas.

Legen = Het veilig verwijderen van gassen, vloeistoffen en reststoffen in de vergistingsbollen.

Inspecteren = Inspecteren van de binnen- en buitenkant van de vergistingsbollen op eventuele lekken, corrosie of defecten.

Onderhouden = Het herstellen van structurele en functionele schade aan de vergistingsbollen die zijn geconstateerd tijdens de inspectie, zodat deze operationeel kan blijven.

Lean management theory = Een theorie over een managementplan wat gericht is op het verminderen van verspillingen en het optimaliseren van verschillende processen (Bertagnolli, 2022; Liker, 2013; Womack & Jones, 1997).

Barrier management theory = Een theorie gebaseerd op het implementeren en onderhouden van verschillende barrières om risico's te beheersen (Pitblado et al., 2024; Standards Norway, 2010).

Nu de sleutelbegrippen zijn uitgelegd zal er verder worden ingegaan op de twee theorieën die hierboven zijn beschreven, namelijk de Lean management theory en de Barrier management theory. Beginnend bij de Lean management theory, hierbij zal er een vergelijking worden gemaakt tussen de theorie en de vergistingsbollen.

3.1 Lean Management Theorie

De Lean management theorie is van toepassing op alle drie de processen die hierboven zijn genoemd. Hierbij moet er volgens de theorie bij het legen van de vergistingsbollen voor worden gezorgd dat de gassen en vloeistoffen in de vergistingsbollen zo optimaal moeten worden overgedragen, hierbij kan een standaardprocedure helpen.

Bij het inspecteren van de vergistingsbollen zal de lean management theorie helpen bij het optimaliseren van het inspectie proces, door middel van het elimineren van tijdsdrukkende processen die vervangen kunnen worden voor minder tijdsdrukken processen, denk hierbij bijvoorbeeld het niet hoeven bouwen van een steiger in de vergistingsbollen. Tevens zal de theorie ook helpen met het optimaliseren van het inspectie proces zelf, dit kan door middel van het gebruiken van een checklist. Hierbij kan er per inspectie gekeken worden wat er gedaan moet worden.

Bij het onderhoud aan de vergistingsbollen zal de lean management theorie ook invloed hebben. Denken hierbij aan het optimaliseren van het onderhoud plegen, denk hierbij aan uitvoeren van het onderhoud terwijl de inspectie nog bezig is. Hierdoor zal er tijdens de inspectie al onderhoud worden uitgevoerd als dit van toepassing is en als dit eventueel al mogelijk is.

3.2 Barrière Management Theorie

De barrière management theorie is van toepassing op alle drie de processen, maar dan meer als gezamenlijke regeling. De barrière management theorie is van belang in dit onderzoek, maar zal minder benadrukt worden dan de lean management theorie. Dit komt doordat het onderzoek meer gericht is op minimaliseren van de uitvaltijd van de vergistingsbollen dan op de veiligheid, maar tijdens het uitvoeren van de activiteiten dient wel te allen tijde de veiligheid in acht genomen te worden.

De barrière management theorie bestaat uit drie verschillende mogelijkheden: Preventieve barrières, Corrigerende barrières en Organisatorische barrières (Pitblado et al., 2024; Standards Norway, 2010). Preventieve Barrières maken hierbij gebruik van gasdetectiesystemen om gassen, zoals methaan te

detecteren. Deze helpen bij het ontdekken van ontstekingsgassen in de omgeving van de vergistingsbollen tijdens het uitvoeren van de inspectie en onderhoud.

Corrigerende barrières zijn barrières die kunnen helpen bij het voorzien van voorzieningen die aanwezig zijn als er iets fout gaat. Denk hierbij aan het voorzien van ademhalingsapparatuur of evacuatiescenario's als er rook of een ander gevaar aanwezig is.

Organisatorische barrières zijn barrières die helpen bij het informeren van de werknemers als er foutmeldingen of andere ernstige omstandigheden naar boven komen. Hierbij zullen veiligheidstrainingen voor werknemers die werken met de vergistingsbollen kunnen helpen of het naleven van de veiligheidsprotocollen die in werking zijn gesteld.

Door een combinatie van deze twee theorieën zullen het legen, inspecteren en onderhouden van de vergistingsbollen kunnen hopen op een geoptimaliseerd en veilig proces.

3.3 Samenvatting

Samenvattend bestaat het theoretische raamwerk uit twee theorieën die van toepassing zijn op dit onderzoek. Hierbij is de eerste theorie Lean Management theorie deze stelt dat er verschillende 'waste' bestaat binnen een bedrijf en als deze verholpen kunnen worden dan wordt het systeem geoptimaliseerd. Een andere variant was Six Sigma theorie deze concludeerde dat het optimaliseren van een systeem vooral ligt bij de kosten die het systeem maakt. Dit was niet de doelstelling van het waterschap aangezien zij de uitvaltijd willen optimaliseren en het bijbehorende profijt van de goedkopere kosten is dan mooi meegenomen. Vandaar dat Lean Management de theorie is die is gekozen.

De andere theorie is barrière management theorie deze is gebaseerd op het implementeren en onderhouden van verschillende barrières om risico's te beheersen. Hierbij komt dit goed van pas met de veiligheidsvoorschriften die in het vorige hoofdstuk zijn genoemd. Uiteraard waren er ook twee andere mogelijkheden die van toepassing konden zijn namelijk de Swiss Cheese model en de Bowtie methodology. De Swiss Cheese model is niet gekozen, omdat deze zich meer richt op het analyseren van de problemen en risico factoren in plaats van ook echt actie te ondernemen. Terwijl de Bowtie methodology geen rekening houdt met huidige systemen die al ingesteld zijn, deze ziet ieder systeem als een apart gedeelte. Hierdoor kan het zijn dat een van deze aparte systemen vervangen moet worden, maar dat kan dan niet aangezien hij vast zit aan een langere keten van systemen, waardoor alle barrières uitvallen en niks meer werkt. Vandaar dat de Barrier management theorie is gekozen.

4. Methodologie

Hierin wordt de methodologie van het onderzoek weergegeven; hierbij wordt er een toelichting gegeven over de manier waarop de deelvragen beantwoord gaan worden. Voor het verkrijgen van data zal dit onderzoek zowel een kwantitatief als kwalitatief onderzoek zijn.

De data voor de eerste deelvraag (“*Wat is op dit moment de handelwijze voor het legen, inspecteren en het onderhouden van de vergistingsbollen die wordt toegepast in Hengelo?*”) zal vergaard worden uit het houden van verschillende interviews met expert die deze processen uitvoeren. Deze interviews worden afgelegd, zodat er duidelijk wordt gemaakt, hoe deze processen op dit moment verlopen, de geïnterviewden zijn weergegeven in tabel 3. Expert 1 wilde niet met zijn/haar naam in het verslag komen, vandaar dat deze expert 1 is genoemd.

Tabel 3: Lijst van geïnterviewden

Naam	Functie	Datum	Bijlage
Expert 1	Uitvoerend projectleider	28-11-2024	C.1
Roel Vink	Inspecteur	11-12-2024	C.2

Hierbij zijn deze interviews niet afgelegd aan de hand van dezelfde vragen, omdat het niet over dezelfde onderwerpen gaat. Sommige gedeelten van de vragen komen wel overeen met andere onderwerpen die eerder zijn genoemd. De 6 onderwerpen die aanbod komen in het interview zijn weergegeven in tabel 4; hierbij wordt er wel onderscheid gemaakt tussen onderwerpen die aanbod kunnen komen bij de interviews over het legen & inspecteren van de vergistingsbollen.

Tabel 4: Interview onderwerpen

Onderwerpen	Legen	Inspecteren
<i>Algemeen functie & betrokkenheid</i>	x	x
<i>Plan van aanpak</i>	x	x
<i>Veiligheid</i>	x	x
<i>Criteria</i>	x	x
<i>Testen</i>		x
<i>Overig</i>	x	x

Door het analyseren van de antwoorden op de vragen kan er een conclusie worden getrokken op deelvraag 1. De informatie vergaard uit de interviews is ook van toepassing op deelvraag 3. Deelvraag 2 is beantwoord aan de hand van een literatuur onderzoek en de hoofdvraag wordt beantwoord aan de hand van een multi criteria analyse.

5. Bestaande methodes voor legen, inspecteren en onderhouden van de vergistingsbollen

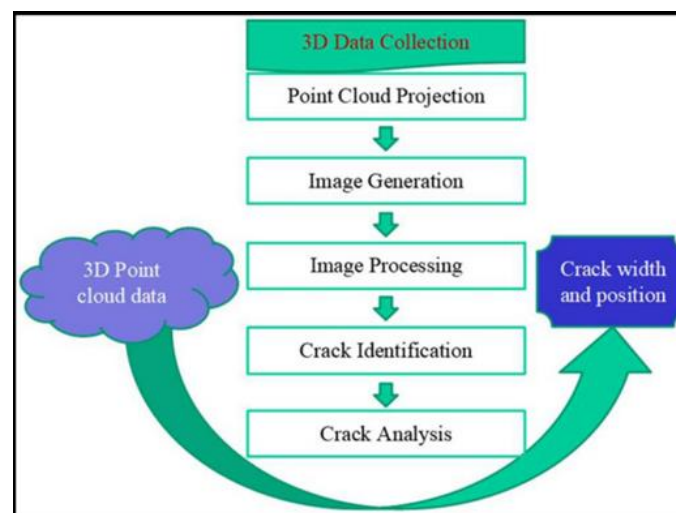
In de volgende paragrafen zullen verschillende methodes worden benoemd die van toepassing kunnen zijn op het legen, inspecteren en onderhouden van de vergistingsbollen. Deze methodes kunnen een eventuele verbetering zijn, maar er bestaat uiteraard ook een mogelijkheid dat het geen verbetering wordt ten opzichte van de huidige handelwijze.

Beginnend bij het legen van de vergistingsbollen, hierbij zijn er helaas niet veel alternatieven op te noemen, vanwege de strakke eisen die hieraan verbonden zitten. Tijdens het legen moet men de vergistingsbol stopzetten en wordt het biogas of naar de WKK gebracht, dit kan even duren, of het wordt afgefakkeld, dit gebeurt alleen met kleine hoeveelheden vanwege de milieuomstandigheden die hierbij betrokken zijn of het wordt opgeslagen/vervoerd naar andere installaties. Het probleem met dat laatste is dat de andere RWZI in Emmen hier geen plek voor heeft en niet bruikbaar is vanwege de maximale capaciteit. De enige oplossing blijft het terugsturen naar de WKK in Hengelo, hierbij is er een tijdsbestek van 2 á 3 maanden per jaar waarin dit mogelijk is per vergistingsbol. Voor de inspecties en het onderhoudsproces van de vergistingsbollen zijn nog wel verschillende alternatieven. Deze worden in de volgende paragrafen beschreven.

5.1 Lasers

TLS systeem

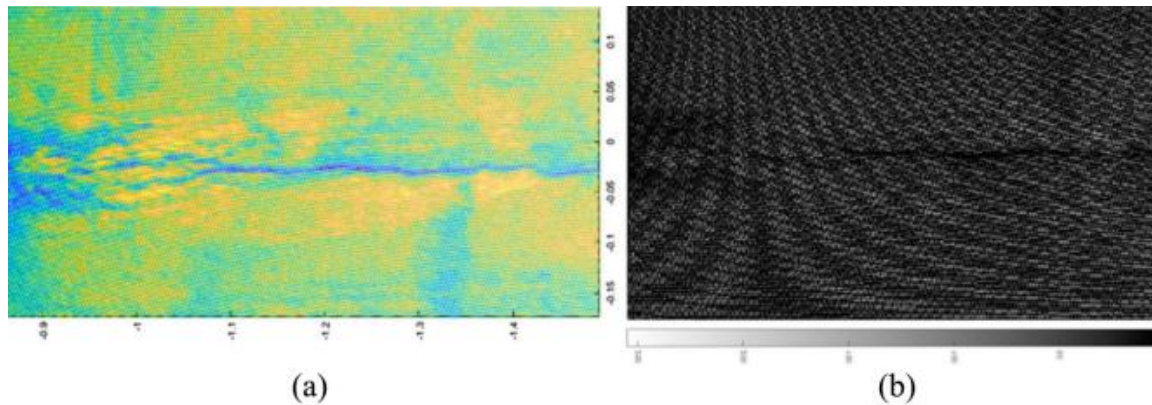
Terrestrial laser scanning (TLS) is een meettechniek waarbij er gemeten kan worden wat de buigingen, scheuren en eventuele krachten kunnen zijn op een bepaald gebied. Hierbij stuurt de laser een signaal naar de kant waar hij op gericht is, waarna deze laser terug kaatst waardoor de laser scanner vervolgens de afstand kan meten en een kaart kan maken. Een kader voor de extractie en het analyseren van de scheuren is gepresenteerd in figuur 9, dit kader bestaat uit vijf stappen (Xu & Yang, 2019).



Figuur 9: Kader voor de extractie en analyse van de scheuren (Xu & Yang, 2019)

Er zal dankzij een 3D puntwolk, een kaart die wordt gegenereerd door het ontvangen van de weggestuurde laser bestaande uit verschillen punten, de precieze breedte en de positie van deze scheuren kunnen worden bepaald. Na deze analyse zal er een 3D model worden gemaakt aan de hand

van deze techniek, hier komt ook nog bij dat er haarscherpe foto's worden gemaakt van deze puntwolk data, waarop de scheuren zichtbaar zijn, deze zijn gepresenteerd in figuur 10 (Xu & Yang, 2019).



Figuur 10: Scheur omschrijving: (a) een project van de puntwolk en (b) een grijze foto van de puntwolk (Xu & Yang, 2019)

X12 laser scanner

De eerste methode die gebruikt kan worden voor het inspecteren van de vergistingsbollen is een 3D laser scanner (Adhikari et al., 2023), namelijk de X12 laser scanner, een eventueel beeld van de laser scanner is weergegeven in figuur 11. De laser scanner is 15 x 25,8 x 31,8 cm (B x D x H), hierbij is het statief niet meegerekend deze is aanzienlijk groter dan de X12 laser scanner. Deze 3D laser scanner kan door middel van lasers detecteren hoever de afstand is tot het gemeten oppervlak. Hierbij draait de laser 360° rond over de horizontale as, waardoor ieder oppervlak wat de laser tegenkomt gemeten wordt en in kaart gebracht wordt dit kan tot op 2 millimeter nauwkeurig. Terwijl hij 282° over de verticale as draait, hierbij krijgt hij niet een volledige afbeelding van de omgeving waarin hij geplaatst is (Trimble, 2019). De oplossing hiervoor is dat je twee beelden in elkaar kan voegen, waardoor je wel de dode hoek van de laser scanner kan zien op het 3D model. Hierbij moet je wel vanuit twee verschillende plekken een scan maken.



Figuur 11: X12 laser scanner (Geometius, z.d.)

5.2 Drones

Normale drone

Een andere mogelijkheid voor het uitvoeren van de inspectie is een drone. Deze drone wordt al gebruikt in Duitsland bij dezelfde eivormige vergistingsbollen als degene in Hengelo. Een voorbeeld hiervan zijn de vergistingsbollen die in Bottrop of Düsseldorf-Nord staan.

De drone ook wel de Flyability ELIOS 3 genoemd, een beter beeld is weergegeven figuur 12, is een drone met een verticaal gezichtsveld van 180°, mogelijkheid tot schuine belichting zodat scheuren makkelijker herkend kunnen worden en een ingenieus licht systeem, zodat er zelfs zichtbaarheid is als het heel stoffig is (Flyability, 2022a). Een Duitse fabrikant (Kopterflug) maakt gebruik van deze drones om bijvoorbeeld industriële en energiecentrales te controleren, hierbij wordt de drone rondgevlogen door een drone expert en zal deze drone beeldkwaliteit leveren in 4K, waarbij er ook een puntwolk gemaakt kan worden door de drone, waardoor er later een 3D tekening gemaakt kan worden (Kopterflug, z.d.-b). Er kunnen ook ter plekke foto's worden gemaakt, zodat de opdrachtgever weet waar de arbeiders die het onderhoud later doen naar moeten kijken (Flyability, 2022a). Deze drone is vooral gespecialiseerd in het zien van scheuren in betonnen oppervlaktes. De drone is 48 cm breed en 38 cm in de lengte.



Figuur 12: Flyability ELIOS 3 (Flyability, 2022b)

Normaal gesproken zouden drones zich moeten houden aan de ATEX veiligheidsregels die van toepassing zijn op de vergistingsbollen, alleen door het reinigen van de vergistingsbollen in het vorige proces, zijn de drones bruikbaar in de vergistingsbollen (Flyability, 2022a). Dit komt doordat alle explosieve gassen en stoffen zijn gereinigd en verwijderd uit de vergistingsbollen, zodat deze toegankelijk is voor explosie gevaarlijke apparatuur, zoals een drone.

Sommige voordelen van een inspectie door middel van een drone zijn: het gaat sneller dan traditionele manieren, het is veiliger en er is meer flexibiliteit in het uitoefenen van de inspectie (Kopterflug, z.d.-a; MRS, 2023).

Ultrasonische drone

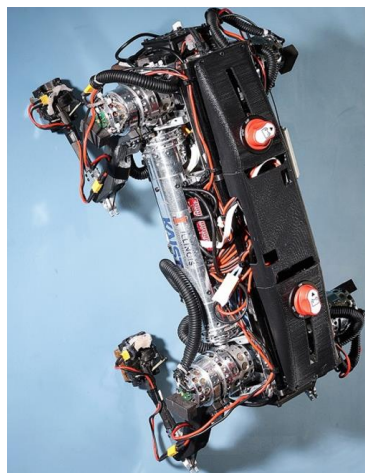
De drone kan ook een ultrasonische test doen hiervoor wordt er gerefereerd naar figuur 13, zodat deze metingen kan doen aan bijvoorbeeld staal en lasnaden. Deze techniek wordt al veelvuldig gebruikt in de wereld van de civiele techniek. Hierbij wordt er vooral gekeken naar de stalen balken nodig voor bruggen en gebouwen en de lasnaden op deze bruggen en gebouwen (Hoła & Sadowski, 2022). Denk hierbij aan het verifiëren van de metingen die eerder zijn gedaan door de normale drone. Hier kan dan vervolgens een meting worden gedaan op de aangewezen plaats, waardoor er precies duidelijk wordt, hoe diep de scheur zit. De drone kan ook op zichzelf ingezet worden om de inspecties uit te voeren. De drone heeft dezelfde afmetingen als de normale drone.



Figuur 13: Drone uitgerust met ultrasone lading (Flyability, 2022c)

5.3 Onderhoud robot

Een robot die onderhoud pleegt aan de vergistingsbollen, het zou een mogelijkheid kunnen zijn in de toekomst. Op dit moment is er een robot, hiervoor wordt er verwezen naar figuur 14, ontwikkelt met een loop snelheid van 70 centimeter per seconde, terwijl hij ondersteboven hangt aan het plafond heeft de robot een loop snelheid van 50 centimeter per seconde. Aan de andere kant is het ook mogelijk voor de robot om de muur op de klimmen die helemaal onder verf, stof en roest zit, dit gaat op dit moment nog met een snelheid van 35 centimeter per seconde (Hong et al., 2022).



Figuur 14: MARVEL, bewegende robot (PR Office, 2022)

De robot kan dankzij zijn elektromagnetische voeten de muren oplopen hierbij kan hij een gewicht met zich meedragen van 2 kilogram als hij tegen een muur op klimt en als hij aan het plafond hangt kan de robot 3 kilogram met zich meedragen. Hierbij zal de robot in de toekomst vooral worden gebruikt voor inspecties en reparaties aan grote stalen constructies verder kan er gedacht worden aan schepen, bruggen en metalen gebouwen (PR Office, 2022). De onderhoudsrobot Marvel is 330 mm breed, 119 mm in de breedte en 131 mm in de hoogte (Hong et al., 2022).

Om de robot een pad te laten vinden naar de eventuele scheuren en gaten die zitten in de vergistingsbollen heeft de robot eerst een kaart nodig die ervoor zorgt dat de robot weet naar welke punten deze moet, dit kan aan de hand van een puntwolk (Azhari, 2022). Deze puntwolk kan ervoor

zorgen dat de robot de punten waar de scheuren zijn gedetecteerd, kan vinden waardoor deze er zelf naar toe kan lopen en kan repareren.

Deze robot, indien mogelijk, kan in de toekomst, als basis gebruikt worden voor een eventuele verdere oplossing. Hier zou de robot nog extra apparatuur mee moeten dragen voor het repareren van de scheuren. Op dit moment is het huidige reparatie apparatuur nog te groot om te dragen voor de robot die hierboven is beschreven (Deng et al., 2018). In de toekomst bestaat er een mogelijkheid dat de reparatie apparatuur op het juiste formaat is en kan meegenomen worden door de robot.

5.4 Samenvatting

De alternatieven voor de huidige manier van werken zijn in dit hoofdstuk besproken. Hier kwam uit dat er lasers bestaan die een groot terrein kunnen scannen aan de hand van LIDAR technologie. Dit kan ervoor zorgen dat de binnenkant van de vergistingsbollen gescand kunnen worden en in kaart gebracht kan worden. Deze LIDAR techniek en de specifieke laser kan scheuren/breuken detecteren tot in de millimeters. Vervolgens moeten de gescande vergistingsbollen nog wel door iemand worden geanalyseerd op breuken.

Het volgende alternatief is het gebruik van een drone, deze kan de vergistingsbollen ingaan, zodat deze langs de wanden in de vergistingsbollen kan kijken op scheuren/breuken. Deze drone kan de hoogte ingaan met een bepaalde snelheid om vervolgens via het scherm wat de bestuurder in de handen heeft, kijken naar de binnenwand en constateren of er schade is wat onderhouden moet worden. Tevens kan de drone ook foto's maken, zodat deze opgeslagen kunnen worden op de iPad en later nog een keer bekeken kunnen worden.

Een eventueel alternatief voor de normale drone is een drone die werkt met ultrasone golven. Deze drone gaat net zoals de normale drone langs alle wanden, maar in plaats van dat hij de buitenkant van de wand ziet, scant hij als het ware de binnenkant van de wand. Hiervoor maakt hij gebruik ultrasone geluidsgolven om de scheuren en breuken te detecteren in het metaal.

Het laatste alternatief is een onderhoudsrobot die langs de muren kan lopen en aan de hand van het volgen van een geprogrammeerd pad kan bepalen waar deze langs moet lopen. De robot zou er in de toekomst voor kunnen zorgen dat hij via het voorgeprogrammeerde pad de scheuren en breuken gelijk kan repareren.

6. Criteria en de bijbehorende wegingsfactoren

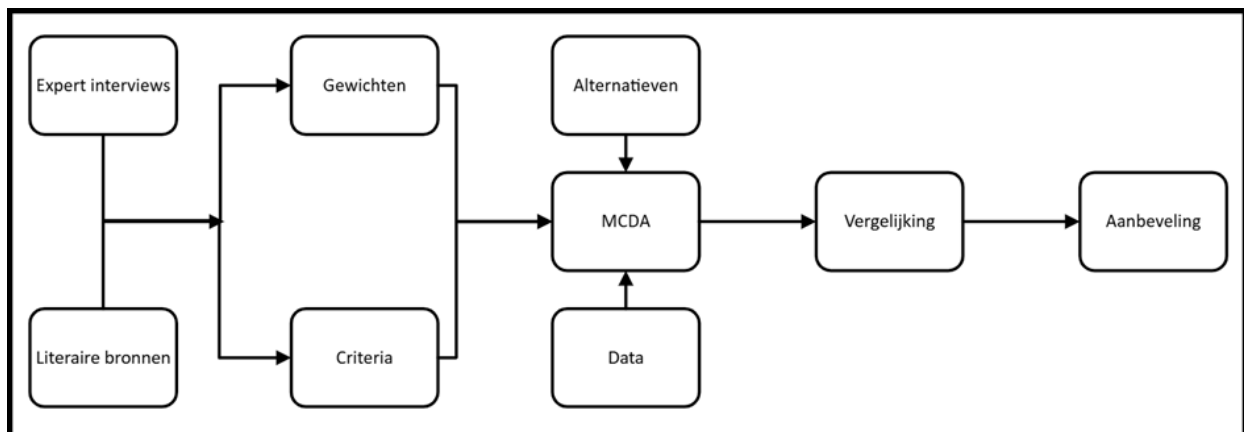
6.1 Multicriteria decision analysis (MCDA)

Dit onderzoek wordt er gebruikt gemaakt van een Multicriteria Decision Analysis, volgend dit document MCDA genoemd. Om te kijken hoe de methodologie van het onderzoek uitkomt bij een MCDA wordt er verwezen naar figuur 15. De vraag kan dan gesteld worden waarom wordt er gebruik gemaakt van een MCDA en waarom een Cost-Benefit analyse niet van toepassing is op dit onderzoek. Er zal ook nog uitgelegd worden, waarom een MCDA veel beter tot zijn recht komt in dit onderzoek.

Ten eerste, een Cost-Benefit analyse concentreert zich op het feit dat de kosten niet opwegen tegen de voordelen van de desbetreffende methode of het product. Dit betekent dat er alleen gekeken wordt naar de kosten van een product of methode en deze wordt vervolgens vergeleken met de voordelen die deze met zich meebrengt (Stobierski, 2019). Terwijl een MCDA zich kan richten op verschillende criteria, waarvan kosten ook een onderdeel kunnen zijn. Een MCDA wordt opgesteld aan de hand van verschillende alternatieven en criteria met verschillende wegingsfactoren hierbij is het voordeel dat er gekeken kan worden naar verschillende aspecten die het probleem kunnen oplossen en/of verbeteren (Diakoulaki & Karangelis, 2007).

Het gemak van een MCDA is dat een MCDA besluitvormers kan helpen met het onderzoeken van verschillende scenario's van de voorgestelde oplossingen. Ook geeft het een zekerheid dat de voorgestelde oplossing wordt geaccepteerd door de groep of organisatie (Thakkar, 2021). Aangezien er rekening kan worden gehouden met de eisen en wensen van deze groep en deze wensen en eisen kunnen dan als criteria worden toegevoegd.

Een ander voordeel is dat het een positieve impact heeft op het systeem, want dankzij een MCDA wordt het systeem niet geoptimaliseerd ten koste van een ander gedeelte van ditzelfde systeem. Dit betekent dat een MCDA een makkelijke manier is om onduidelijke criteria te definiëren (Uzun Ozsahin et al., 2021).



Figuur 15: Raamwerk van om van een MCDA naar een aanbeveling te gaan

Om tot een definitief antwoord te komen zal vergelijking 1 gebruikt worden. De reden hiervoor is, dat er een mogelijkheid bestaat dat een van de criteria niet toepasselijk is voor een van de alternatieven. Om te voorkomen dat er hierdoor een mindere uitslag uit komt, wordt het beste alternatief bepaald door middel van vergelijking 1, hierdoor komt er een gemiddelde uit.

$$\frac{\text{Wegingsfactor} * \text{Scores}}{\sum \text{Alle gebruikte wegingsfactoren}}$$

Vergelijking 1

In deze formule is *wegingsfactor* de hoeveelheid waarmee de scores worden vermenigvuldigd, dit is het gewicht wat in hoofdstuk 6.3 'De bijbehorende wegingsfactoren voor de criteria' wordt gegeven aan de desbetreffende criteria. Hierbij zijn de scores de waardes die worden gegeven aan de desbetreffende alternatieven voor diezelfde criteria waar dat gewicht aangekoppeld is. Tot slot zijn *alle gebruikte wegingsfactoren* de som van alle wegingsfactoren die van toepassing waren op de desbetreffende criteria.

6.2 Criteria voor de alternatieven

Er zijn verschillende criteria geconstateerd, deze kwamen voort uit de expert interviews die zijn gehouden tussen de onderzoeker en de desbetreffende geïnterviewde en de literaire bronnen die zijn geraadpleegd voor dit onderzoek. Hierbij zijn de volgende criteria geconstateerd, deze worden hieronder uitgelegd, waarvoor deze van waarde zijn en wat ze inhouden. De volgende criteria worden gekozen voor de analyse van de verschillende methodes:

Veiligheid De eerste criteria is veiligheid, denk hierbij aan de veiligheid van de mensen die aan het werk zijn aan het desbetreffende proces van het legen, inspecteren of onderhouden van de vergistingsbollen. Met veiligheid wordt bedoeld dat er ten alle tijden veilig gewerkt moet worden, denk hierbij aan de ATEX-richtlijnen en eventuele andere regels, zoals het aangespen van de desbetreffende arbeider indien deze op hoogte werkt.

Tijdsduur De tijdsduur houdt de hoeveelheid tijd in dat het kost om het proces uit te voeren. Deze criteria is gekozen, omdat een mindere tijdsduur van het legen, inspecteren en onderhouden van de vergistingsbollen inhoudt dat de uitvaltijd van de vergistingsbollen minimaler is geworden.

Milieu vriendelijk Milieu vriendelijkheid is een criteria geworden, omdat de vergistingsbollen operationeel zijn geworden in Hengelo is vanwege het minder belasten van het milieu wat hierbij komt kijken. Dankzij de vergistingsbollen hoeft er minder slib te worden afgevoerd. Tevens moet er tijdens het repareren van een vloeistofdichte vloer ook rekening gehouden worden met het milieu (CUR, 2005). Vandaar dat milieuvriendelijkheid een van de criteria is geworden.

Toegang door het luik Om de vergistingsbollen in te komen, moet men met de eventuele apparatuur door een luik. Dit luik is niet al te groot, het luik heeft een straal van ongeveer 35 centimeter, hierdoor kan dit een beperking leveren voor het uitoefenen van het legen, inspecteren en onderhouden van de vergistingsbollen.

Makkelijk te integreren Deze factor zal zich richten op de operationele functies van het desbetreffende alternatief. Er wordt gekeken naar hoe makkelijk iets te integreren is in de huidige bestaande omgeving binnen het waterschap Vechtstromen in Hengelo.

Volwassenheid van het alternatief Hierbij wordt er vooral gekeken naar de haalbaarheid. Hiervoor wordt er gekeken naar de realiteitszin van het alternatief. Bijvoorbeeld is het slim om een geheel plan te maken rondom een alternatief, wat nog niet goed genoeg is ontwikkeld.

6.3 De bijbehorende wegingsfactoren voor de criteria

De wegingsfactoren die deze criteria krijgen zullen zich bevinden tussen de 1 en 2,5. De reden hiervoor is dat het dan overzichtelijk blijft voor de onderzoeker en de wegingsfactoren zullen per keer met 0,5 omhoog gaan, voor de verschillende scores per criteria wordt er verwezen naar tabel 5.

De verschillende criteria bevatten uiteraard ook verschillende wegingsfactoren, deze wegingsfactoren en hun desbetreffende criteria zijn weergegeven in tabel 5. Hieronder zullen de verschillende wegingsfactoren worden uitgelegd. Tevens is er voor de scores aangenomen dat deze van een lineaire schaal gebruik maken. Deze is gebaseerd op het aantal mogelijke bandbreedtes van de scores. Een voorbeeld voor veiligheid is dat er vier scores zijn, waarvan de slechtste een 0 is en de beste een score van 100 krijgt. De twee ertussen worden eerlijk verdeeld, zodat het met even grote stappen omhoog gaat.

Tabel 5: De criteria en hun bijbehorende wegingsfactoren waarop de alternatieven worden beoordeeld

Criteria + Wegingsfactoren		Score
Veiligheid (2,5)	Niet binnen ATEX-richtlijnen + geen beschermingsmiddelen	0
	Binnen ATEX-richtlijnen + beschermingsmiddelen	33
	Binnen ATEX-richtlijnen + extra beschermingsmiddelen	66
	Binnen ATEX-richtlijnen + hoeft de vergistingsbol niet zelf in	100
Tijdsduur (2,5)	Langdurig	0
	Iets langzamer	25
	Gemiddeld	50
	Iets sneller	75
	Snel	100
Milieuvriendelijk (1)	LCA > 400 kg CO ₂	0
	400 kg CO ₂ > LCA > 300 kg CO ₂	25
	300 kg CO ₂ > LCA > 200 kg CO ₂	50
	200 kg CO ₂ > LCA > 100 kg CO ₂	75
	100 kg CO ₂ > LCA > 0 kg CO ₂	100
Toegang door het luik (1,5)	r > 35 cm	0
	35 cm > r > 30 cm	12,5
	30 cm > r > 25 cm	25
	25 cm > r > 20 cm	37,5
	r < 20 cm 2 of meer onderdelen	50
	35 cm > r > 30 cm	62,5
	30 cm > r > 25 cm	75
	25 cm > r > 20 cm	87,5
	r < 20 cm 1 onderdeel	100
Eenvoudig te implementeren (2)	Uitgesloten voor implementatie (--)	0
	Moeilijk te implementeren (-)	25
	Meer uitwerking nodig (+/-)	50
	Eenvoudig te implementeren (+)	75
	Direct inzetbaar (++)	100
Volwassenheid van het alternatief (2)	Niet haalbaar (--)	0
	Kost heel veel tijd (-)	25
	Meer uitwerking nodig (+/-)	50
	Geheel realiseerbaar (+)	75
	Direct inzetbaar (++)	100

Veiligheid heeft een gewicht van 2,5 toegewezen gekregen. Dit komt mede door de experts die zeiden dat alles in veiligheid uitgevoerd moet worden, denk hierbij aan het aankoppelen van de mensen tijdens het plegen van onderhoud aan de vergistingsbollen of het legen van de vergistingsbollen, waarbij er altijd voor moet worden gezorgd dat er rekening wordt gehouden met de ATEX-richtlijnen, deze zijn beschreven in hoofdstuk 2.6 'Veiligheidsrichtlijnen (ATEX-richtlijnen)'. Tevens wordt er tijdens het legen gebruik gemaakt van deze richtlijnen, maar ook een Taak Risico Analyse (TRA) is nodig en verschillende werkvergunningen. Tijdens het betreden van de vergistingsbollen zal er gebruik worden gemaakt van ademlucht met open communicatie om de rest van de reiniging in de tank te voltooien. Vanwege deze beredenering heeft veiligheid het hoogste gewicht gekregen van 2,5.

Tijdsduur heeft ook een gewicht van 2,5 toegewezen gekregen. Dit heeft te maken met de wensen van het waterschap die zij hadden gesteld voor dit onderzoek. Hierbij is de hoofdvraag ook dat de uitvaltijd van de vergistingsbollen geminimaliseerd moet worden indien mogelijk. Dit is de hoogste prioriteit. Dan is natuurlijk de vraag, waarom de criteria tijdsduur niet de hoogste criteria heeft gekregen, maar dat deze wordt gedeeld met veiligheid. Dit is omdat zowel het waterschap Vechtstromen als de experts met nadruk hebben gezegd, dat er niks wordt uitgevoerd indien dit niet veilig kan gebeuren. Vandaar dat de criteria tijdsduur en veiligheid allebei van even groot belang zijn.

Milieu vriendelijk heeft een gewicht van 1 gekregen. Hierbij is het belangrijk om mee te nemen dat milieu vriendelijkheid op prijs wordt gesteld door het waterschap. Het probleem hierbij is dat milieu vriendelijkheid niet altijd gepaard gaat met de meeste opties. Het waterschap heeft laten merken dat het milieu zeker belangrijk is, maar dat het niet ten koste van de uitvaltijd van de vergistingsbollen moet gaan.

Milieu vriendelijkheid wordt gebaseerd op de Life Cycle Assessment (LCA) van het desbetreffende alternatief. Volgens Michael et al., 2017 houdt een LCA het volgende in: "LCA laat zien hoe een specifieke functionaliteit op de meest milieuvriendelijke manier kan worden bereikt uit een vooraf gedefinieerde lijst met alternatieven, of in welke delen van de levenscyclus het bijzonder belangrijk is om een product te verbeteren om de milieu-impact te verminderen, met andere woorden, de eco-efficiëntie te verhogen."

Toegang tot het luik heeft een gewicht van 1,5 gekregen. De reden hiervoor is dat de alternatieven wel door het luik moeten kunnen, zodat de arbeiders er gebruik van kunnen maken. Waarom deze criteria een gewicht van 1,5 heeft gekregen is, omdat het wel van belang is of de apparatuur door het luik kan komen, alleen is het niet, dat als de apparatuur niet door het luik komt het niet het einde van de gehele operatie is. Er is namelijk nog een ander luik aan de bovenkant, alleen deze is veel minder ideaal, aangezien je vandaar niet naar beneden kan klimmen of iets naar beneden kan gooien zonder dat het breekt. Daarom heeft deze criteria niet dezelfde wegingsfactor gekregen als de bovenstaande criteria alleen is het ook niet zo essentieel dat het een wegingsfactor van 2 of 2,5 krijgt.

Eenvoudig te implementeren heeft een wegingsfactor van 2 toegewezen gekregen. Voordat er een uitleg komt waarom eenvoudige implementatie een wegingsfactor van 2 heeft gekregen, zal er eerst een uitleg komen over de voordelen van een innovatie die eenvoudig te implementeren is. Hieraan kan de relevantie van de criteria ook worden afgeleid en kan er een conclusie worden getrokken voor de wegingsfactor van 2.

Ten eerste zorgt een verbeterde implementatie van een innovatief systeem er voor dat de effectiviteit en productiviteit van het desbetreffende systeem omhoog gaat (López & Oliver, 2023). Hiermee wordt bedoeld dat als een systeem wordt toegepast in een bedrijf, dat het systeem veel beter en sneller tot

zijn recht kan komen indien deze eenvoudig te implementeren is. Hierbij hoeft er weinig tijd besteed te worden aan het begrijpen en het leren gebruiken van het nieuwe systeem met als gevolg dat de productiviteit en effectiviteit stijgt.

Hierop volgend zorgt een eenvoudige implementatie ook voor een verbeterd aanpassingsvermogen van de arbeiders op het nieuwe systeem. Volgens Grant (1996a, 1996b) zorgt een eenvoudige implementatie van innovatie ervoor om het mogelijk te maken voor bedrijven om zich aan te passen aan externe omgevingen en endogene verandering haalbaar maakt.

Tot slot heeft een eenvoudige implementatie als gevolg dat de succes ratio van het desbetreffende systeem stijgt; hierbij zegt Brockhoff (2012) dit over Berggren et al., (2011), dit gedachtegoed wordt versterkt door López & Oliver, (2023). Als de arbeiders weten hoe de nieuwe technologie werkt en wat men eruit kan halen dan kan volgens López & Oliver (2003) en Berggren et al. (2011) dit ervoor zorgen dat de succes ratio stijgt.

Vanwege deze argumenten heeft de criteria 'een eenvoudige implementatie' een wegingsfactor van 2 toegewezen gekregen. Er zijn genoeg redenen waarom het van belang is dat deze criteria wordt meegenomen wordt.

De laatste criteria is of het alternatief volwassen genoeg is om geïmplementeerd te kunnen worden. Hiermee zal er vooral gekeken worden of iets haalbaar is voor het waterschap. Dit kan betekenen dat een alternatief op dit moment een lage score krijgt bij deze criteria, omdat het gewoon niet haalbaar is voor het waterschap, het alternatief is nog niet goed genoeg ontwikkeld, dat het gewoon niet bestaat in Nederland, niet geïmporteerd kan worden of dat het niet legaal is. Hierbij heeft deze criteria een wegingsfactor van 2 toegewezen gekregen, omdat het niet verantwoord kan zijn om iets toe te passen bij het waterschap, terwijl het helemaal niet bestaat of niet goed genoeg ontwikkeld. Hiervoor zal er dan op de langere termijn meer onderzoek naar dit eventuele alternatief moeten gebeuren.

7. Resultaten

In de volgende paragrafen zal er worden beschreven welke informatie van toepassing is op de alternatieven, hierbij worden de criteria genoemd en daarbij de data horend bij het alternatief. Bijvoorbeeld voor tijdsduur zal erbij de alternatieven worden omschreven hoe de onderzoeker aan de tijdsduur van het alternatief is gekomen, dit kan worden omschreven in bijvoorbeeld uren, dagen of weken. Vervolgens zal er in 7.2 worden beschreven wat de scores van het desbetreffende alternatief zijn, dit wordt bepaald aan de hand van de informatie die in 7.1 Uitslagen van de methodes is gegeven en tot slot zal er een vergelijking worden gemaakt tussen de verschillende scores van de alternatieven om te kijken welke het beste uit de test komt.

7.1 Uitslagen van de methodes

Veiligheid wordt gerekend aan de hand van verschillende veiligheidsrichtlijnen, hieronder vallen bijvoorbeeld de ATEX-richtlijnen, deze zijn verwoord in hoofdstuk 2.6 'Veiligheidsrichtlijnen (ATEX-richtlijnen)', en er wordt ook rekening gehouden met het veroorzaken van gevaarlijke situaties. Denk hierbij bijvoorbeeld aan het niet naar binnen hoeven gaan van de arbeiders in de vergistingsbollen of het niet te hoeven vast maken van de arbeiders in de vergistingsbollen door middel van een harnas.

Tijdsduur wordt verrekend door de tijden te vergelijken tussen de verschillende alternatieven en de huidige manier van legen, inspecteren en onderhouden. Een voorbeeld hiervan kan zijn dat er extra tijd bij komt, omdat bijvoorbeeld bij de laser scanner de gescande kaart ook nog geanalyseerd moet worden door mensen. De tijden hebben niet alleen te maken met de tijdsduur in of rondom de vergistingsbollen.

Milieu vriendelijkheid van een product wordt berekend op basis van de LCA van de diverse alternatieven. Hierbij zal er voor de verschillende alternatieven een LCA komen, deze worden dan met elkaar vergeleken en uiteindelijk kan er geconstateerd worden welk alternatief het beste uit de test komt. Hierbij worden drie verschillende factoren getest. De factoren waarop wordt getest zijn levensduur, energieverbruik en impact op het milieu. Hieruit wordt een conclusie getrokken en vervolgens wordt er een score aangekoppeld.

Toegang door het luik wordt verrekend op basis van de straal van het desbetreffende alternatief. De straal is bepaald aangezien het luik waar men naar binnen moet een cirkel is. Hierbij wordt er gerekend met de straal en niet met de gehele breedte of lengte van het desbetreffende alternatief, anders is er een mogelijkheid dat het alternatief alsnog niet past. Indien het alternatief niet past kan het in aparte onderdelen de vergistingsbollen ingaan, hiervoor worden er wel minpunten gerekend.

Om te kijken of iets eenvoudig te implementeren valt in het huidige systeem van het waterschap Vechtstromen, wordt er gekeken naar de volgende punten. Ten eerste wordt er gekeken naar de technische compatibiliteit met het waterschap (Davis, 1989). Ten tweede wordt er gekeken naar de gebruikersvriendelijkheid van het alternatief (Davis, 1989; Nielsen, 1993). Tot slot wordt er gekeken naar de ondersteuning en trainingen die aanwezig zijn voor dit alternatief (Farias & Resende, 2020; Kotter, 2005). De verschillende factoren die hierboven genoemd zijn worden beoordeeld aan de hand van de volgende scores; --, -, +/-, +, ++.

Om te kijken of iets volwassen genoeg is om in te voeren voor het waterschap Vechtstromen moet er gekeken worden naar de huidige manier van werken en kijken of er minimale aanpassingen moeten worden gedaan om het nieuwe alternatief veilig in te voeren zonder al te veel moeite. Hierbij wordt er gekeken naar de feitelijke haalbaarheid van het systeem, is het idee logisch en consistent in de realiteit, zijn de externe omstandigheden (markt of technologie) voordelig genoeg dat het alternatief kan

worden geïmplementeerd (Belsky, 2011). De verschillende factoren die hierboven genoemd zijn worden beoordeeld aan de hand van de volgende scores; --, -, +/-, +, ++.

7.2 Vergelijking

In dit hoofdstuk zal de Multi criteria decision analysis worden geformuleerd deze is getoond in tabel 6. Hierin is zichtbaar dat er wegingsfactoren zijn geformuleerd voor de verschillende criteria, om meer te weten te komen over de reden achter deze wegingsfactoren wordt er verwezen naar hoofdstuk 6.3 'De bijbehorende wegingsfactoren voor de criteria' hierin wordt ook uitgelegd waarom de verschillende criteria zijn benoemd als criteria.

Veiligheid

Beginnend met de veiligheid die de steiger biedt. Een steiger voldoet aan de ATEX-richtlijnen, aangezien er geen mogelijkheid bestaat dat een elektrische reactie optreedt. Dit is te danken aan het inertiseren van de vergistingsbol tijdens het legen ervan. Voor verdere uitleg wordt verwezen naar hoofdstuk 2.2 'Legen van de vergistingsbollen'. Hoewel de steiger voldoet aan de ATEX-richtlijnen, moet men alsnog de vergistingsbollen betreden. Aan de andere kant wordt tijdens de inspectie gebruikgemaakt van een harnas. Dit betekent dat de steiger zowel aan de ATEX-richtlijnen voldoet als beschermingsmiddelen biedt, wat resulteert in een score van 33.

De X12 laser scanner heeft, net als de drones, het voordeel dat alles automatisch gebeurt. Hierdoor hoeft de operator alleen op afstand toe te kijken en te wachten tot het scannen is voltooid. Een nadeel ten opzichte van drones is dat de laser scanner fysiek in de vergistingsbollen geplaatst en geactiveerd moet worden. Hierdoor bestaat er een faalkans voor de X12 laser scanner, omdat de scanner vereist dat een werknemer de vergistingsbollen betreedt, kan deze geen score van 100 krijgen. Een voordeel ten opzichte van de steiger is dat de werknemer niet gedurende het gehele proces in de nabijheid van de vergistingsbollen hoeft te zijn. Dit biedt extra bescherming voor de werknemer en resulteert in een score van 66

Voor de veiligheid worden de normale drone en de ultrasone drone gezamenlijk beoordeeld. Beide drones mogen de vergistingsbollen betreden en voldoen daarmee aan de ATEX-richtlijnen. Dit is bevestigd door het huidige gebruik van drones voor inspecties in Duitsland, waar deze al actief worden ingezet voor het inspecteren van vergistingsbollen. Hierdoor mogen de drones veilig worden ingezet. Een ander voordeel is dat de bestuurder van de drone de vergistingsbollen niet hoeft te betreden voor de inspectie. Dit betekent dat de bestuurder zich op een veilige afstand bevindt, wat het risico minimaliseert. Mocht er iets misgaan, dan loopt de bestuurder geen gevaar. Dit extra beschermingsniveau zorgt ervoor dat zowel de normale drone als de ultrasone drone een score van 100 krijgen

De onderhoudsrobot is een project dat is uitgevoerd door studenten en professoren van de Universiteit van Daejeon in Zuid-Korea. De verschillende onderdelen van de robot zijn benoemd door Hong et al. (2022). De elektromagnetische voeten van de robot zorgen ervoor dat deze niet veilig verklaard kan worden volgens de ATEX-richtlijnen. Dit komt doordat elektromagnetische golven een vonk kunnen veroorzaken, wat kan leiden tot brand (Lin et al., 2021). Dit is niet toegestaan volgens de ATEX-richtlijnen. Hoewel er uitzonderingen op deze regels bestaan, moet de robot daarvoor ATEX-gecertificeerd worden. Op dit moment is niet bewezen dat de onderhoudsrobot ATEX-gecertificeerd is of kan worden. Daarom krijgt de onderhoudsrobot voor veiligheid een score van 0

Tijdsduur

De tijdsduur voor de huidige manier van werken kan worden afgeleid uit eerdere ervaringen van ABV Haukes. Deze waarde wordt weergegeven in uren en minuten. Het opbouwen van een steiger kan een tijdrovend proces zijn. Daarom worden alternatieven vergeleken met de tijdsduur van het opbouwen van een steiger. Volgens Roel Vink kan het opbouwen van een steiger vele uren tot zelfs dagen duren, afhankelijk van de mankracht die hiervoor wordt ingezet.

De tijdsduur voor de verschillende alternatieven kan niet worden bepaald op basis van eerdere ervaringen. Daarom wordt een andere methode gebruikt. Hierbij wordt de volume van een vergistingsbol vermenigvuldigd met de werksnelheid van het desbetreffende alternatief. Hierbij wordt aangenomen dat het alternatief de gehele binnenkant van de vergistingsbol inspecteert. De tijdsduur voor de X12 laser scanner wordt echter op een andere manier berekend, zoals hieronder wordt uitgelegd.

De tijdsduur voor de X12 laser scanner wordt op een andere manier berekend dan hierboven beschreven. De X12 laser scanner heeft een bepaalde werkingssnelheid, waarmee deze een bepaald oppervlak kan scannen met een zelf te bepalen kwaliteit. De scanmodus wordt bepaald op basis van de hoogte van het gebouw. Het gebouw is kleiner dan 40 meter en groter dan 20 meter, waardoor de meest ideale scanmodus High x2 is. Dit kan worden gecombineerd met een goede kwaliteitsinstelling, wat resulteert in een scantijd van 12 minuten en 28 seconden per scan (Trimble Inc., 2022). Aangezien de X12 laser scanner een dode hoek heeft, moet de scan twee keer worden uitgevoerd. Dit leidt tot een totale scantijd van 24 minuten en 56 seconden. Vervolgens moeten deze puntwolken nog worden geanalyseerd met een programma genaamd CloudCompare. Volgens CloudCompare (z.d.) duurt de analyse voor dit formaat met de High x2-scanmodus ongeveer 1 tot 3 uur. Hiermee komt de totale inspectietijd van de X12 laser scanner op minimaal 1 uur en 25 minuten en maximaal 3 uur en 25 minuten, mits alles optimaal verloopt.

De tijdsduur voor de inspectie met een normale drone wordt berekend zoals beschreven aan het begin van deze paragraaf. Een vergistingsbol heeft een volume van 4000 m^3 (De Jong et al., 2018). De normale drone heeft een snelheid van 2 m/s in elke vliegrichting. Dit betekent dat de drone 3,46 m/s kan vliegen en 20 minuten nodig heeft om de volledige vergistingsbol te inspecteren. Vervolgens moet de gescande kaart geanalyseerd worden. Dit gebeurt met hetzelfde systeem als de laser scanner, waardoor de analyse tussen 1 en 3 uur kan duren. Eventuele foto's die tijdens het rondvliegen zijn gemaakt, kunnen helpen om de analyse te verifiëren.

De tijdsduur voor de inspectie met een ultrasone drone wordt op dezelfde manier berekend als bij de normale drone. De ultrasone drone heeft dezelfde vliegsnelheid, maar zendt ultrasone golven uit om te meten hoe diep een scheur of breuk is. De drone heeft minimaal 20 minuten nodig om een volledige inspectie uit te voeren. Een enkele ultrasone scan duurt gemiddeld enkele milliseconden, wat verwaarloosbaar is in de totale tijdsduur (Zhu et al., 2025). Indien de drone de gehele vergistingsbol moet analyseren, bedraagt de tijdsduur onder ideale omstandigheden 20 minuten.

Tot slot wordt de onderhoudsrobot geanalyseerd op snelheid. De robot beweegt met een snelheid van 0,35 m/s op een geverfd oppervlak. Dit betekent dat de robot voor een afstand van 4000 m een tijd van 3,17 uur nodig heeft. Hierbij heeft de robot enkel de gehele vergistingsbol doorkruist. In werkelijkheid zal deze tijd korter zijn, aangezien de robot een specifieke route aflegt naar de eerder geanalyseerde scheuren en breuken. Daarom wordt 3,17 uur beschouwd als de maximale tijd die de onderhoudsrobot nodig heeft om alle scheuren en breuken te detecteren en te repareren.

Milieuvriendelijkheid

Zoals hierboven is beschreven wordt milieuvriendelijkheid bepaald aan de hand van een LCA waarde. Deze waarde is gebaseerd op verschillende factoren waar ook verschillende waardes uitkwamen. De waardes zijn geconstateerd in kg CO₂, hierop worden ze dan ook een score toegekend in de multi criteria analysis. Voor de volledige analyse van de verschillende LCA's wordt er verwezen naar bijlage F 'LCA berekeningen'.

Beginnend bij de huidige manier van werken dit werd gedaan door middel van het plaatsen van een stalen steiger. De steiger heeft een emissiewaarde gekregen van 300,11 kg CO₂ wat vervolgens neerkomt op een score van 25.

Hierna is de X12 laser scanner aan de beurt, deze had als impact op het milieu een emissiewaarde van 199,51 kg CO₂ gekregen, dit is allemaal gebaseerd op de hoogste waarde die uit de analyse kon komen. Dit betekent dat deze een score van 50 krijgt in de analyse.

Vervolgens kwam de analyse van de normale drone deze had een emissiewaarde van 96,08 kg CO₂, waardoor de normale drone een score van 100 krijgt. Hierna kwam de ultrasone drone die een emissiewaarde had gekregen van 138,98 kg CO₂. De ultrasone drone heeft een hogere emissiewaarde dan de normale drone dit komt door de toevoeging van de ultrasone payload die erbij inbegrepen zit. Desondanks geeft dit de ultrasone drone toch een score van 75.

Tot slot komt de analyse voor de robot. De robot heeft een emissiewaarde van 105,15 kg CO₂ gekregen. Hier moet wel bij vermeld worden dat dit vooral gebaseerd is op schattingen, dit komt doordat de afmetingen en materialen voor de robot niet volledig beschikbaar waren, waardoor er een schatting plaats moesten vinden. Toch geeft een emissiewaarde van 105,15 kg CO₂ de robot een score van 75.

Toegang door het luik

Beginnend met de steiger die moet worden opgebouwd. Deze moet in stukken door het luik anders past het niet in de vergistingsbollen, hierdoor krijgt het een lagere score dan als het in een keer door het luik past. Hierbij past ieder stuk wel door het luik en heeft het een kleinere straal dan 20 cm per buis, waardoor het een score krijgt van 50.

De X12 laser scanner bestaat uit twee onderdelen, waardoor deze sowieso al in de bovenste regio van de multi criteria analyse bevindt. De X12 laser scanner is 15 x 25,8 x 32,8 (B x D x H) hierdoor zou deze normaliter in de onderste regio van de analyse vallen, maar de X12 laser scanner moet apart worden genomen vanwege het statief wat ook mee moet de vergistingsbollen in. Hierdoor krijgt deze net zoals de steiger een score van 50.

De normale drone en de ultrasone drone hebben dezelfde afmetingen namelijk 48 cm bij 38 cm. De straal van de drone 24 cm bij 19 cm is, waardoor deze nog wel in de onderste regio van de multi criteria analyse blijft, maar het wel een score van 87,5 krijgt.

Volgend hierop is de robot MARVEL. De robot is 33 cm breed, 11,9 cm in de breedte en 13,1 cm in de hoogte, hierdoor krijgt de MARVEL robot een score van 100 voor deze criteria. De afmetingen zijn allemaal kleiner dan 20 cm. Aangezien hierboven nog de diameter is vermeld en dus alles nog door twee gedeeld moet worden, waardoor je de straal krijgt en hierdoor vallen alle afmetingen onder de 20 cm en dus krijgt het een score van 100.

Eenvoudig te implementeren

Zoals eerder beschreven in hoofdstuk 7.1 'Uitslagen van de methodes', wordt dit criterium beoordeeld aan de hand van drie verschillende factoren. Deze worden geëvalueerd met een score van --, -, +/-, + of ++. De factoren zijn: de technische compatibiliteit tussen het alternatief en het waterschap, de gebruikersvriendelijkheid van het alternatief en de mate van ondersteuning en training die wordt geboden om het alternatief onder de knie te krijgen.

Startend met de huidige manier van werken, de steiger. De implementatie hiervan verloopt op dit moment eenvoudig. Aangezien de steiger al in gebruik is voor zowel inspectie als onderhoud, betekent dit dat deze gemakkelijk opnieuw geïmplementeerd kan worden. De reden hiervoor is dat de arbeiders precies weten wat ze moeten doen en dat het waterschap weet wat het kan verwachten en wat de uitkomst zal zijn. Hierdoor krijgt de steiger een score van ++, wat neerkomt op een score van 100 in de multi criteria analyse.

Het volgende alternatief is de X12 laser scanner, die gebruikmaakt van LIDAR-technologie. De X12 laser scanner is zeer gebruiksvriendelijk en beschikt over een gebruikersvriendelijke user interface (Trimble Inc., z.d.). De scanner voert veel processen automatisch uit, waardoor de gebruiker zich hier geen zorgen over hoeft te maken. De gebruiker hoeft alleen op de startknop te drukken, mits er geen extra wijzigingen gewenst zijn. Een nadeel van de X12 laser scanner is dat de gebruiker aanzienlijke ervaring moet hebben om de meer geavanceerde functies te kunnen benutten. Vanwege dit nadeel krijgt de X12 laser scanner niet de volledige score, maar een +.

Daarentegen biedt Trimble, de ontwikkelaar van de X12 laser scanner, uitgebreide ondersteuning en training. Er zijn instructievideo's beschikbaar (Lezennec et al., 2022) en een handleiding, waardoor de gebruikers de scanner sneller kunnen begrijpen en toepassen (Trimble Inc., 2022). Dankzij dit uitgebreide trainingsaanbod krijgt de X12 laser scanner voor deze factor een ++.

Tot slot wordt gekeken naar de compatibiliteit tussen de X12 laser scanner en het waterschap. Op dit moment werkt het waterschap al met 3D-modellen en tekeningen. Volgens Johan Reefman, informatiemanager bij Waterschap Vechtstromen, wordt hier al enige tijd mee gewerkt (Esri Nederland, 2022) Het probleem is echter dat het waterschap voornamelijk gebruikmaakt van BIM 3D-modellen, terwijl de X12 laser scanner puntwolken genereert. Aangezien het waterschap nog weinig ervaring heeft met dit specifieke type 3D-model, is er training nodig om deze modellen correct te analyseren. Dit proces kost aanzienlijke tijd, waardoor de compatibiliteit niet optimaal is. Daarom krijgt deze factor een +/-.

Op basis van het gemiddelde van de drie factoren krijgt de X12 laser scanner een +, wat in de multi criteria analyse neerkomt op een score van 75.

Het volgende alternatief is de normale drone. Deze kan worden bestuurd door een operator met een vliegvergunning, wat garandeert dat de besturing in goede handen is. Er zijn echter enkele nadelen verbonden aan het gebruik van drones. Een belangrijk nadeel is de korte batterijduur van slechts 8,2 minuten per batterij (Flyability, 2022b). Hierdoor moet de drone vaak pauzeren om de batterij te vervangen. Een ander potentieel probleem is de beeldkwaliteit van de camera, die kan worden beïnvloed door lichtinval of stof. Ondanks deze beperkingen is de drone relatief eenvoudig in gebruik, wat resulteert in een gebruikersvriendelijkheidsscore van +/-.

Voor de normale drone wordt ondersteuning en training verzorgd door de distributeur (Vortex, z.d.). Werknemers worden door professionals begeleid, waardoor zij beter overweg kunnen met de drones. Hierdoor krijgt de factor 'Ondersteuning en training' een ++.

Tot slot wordt gekeken naar de technische compatibiliteit van de normale drone met het waterschap. De manier van inspecteren verandert nauwelijks, behalve dat een drone wordt gebruikt in plaats van handmatige inspectie. De bestaande inspectielijst, zie bijlage D 'Inspectielijst', blijft bruikbaar voor de beoordeling van scheuren en breuken in de vergistingsbollen. Bovendien heeft het waterschap al enige ervaring met drones, zij het voornamelijk voor terreininspecties in Hengelo. Omdat de bestaande methodiek grotendeels in stand blijft en drones al in gebruik zijn, krijgt de technische compatibiliteit een score van ++.

Het gemiddelde van de drie factoren resulteert in een +, wat een score van 75 betekent in de multi criteria analyse.

De ultrasone drone is minder gebruiksvriendelijk dan de normale drone. Dit komt doordat deze afhankelijk is van ultrasone geluidsgolven, waarvan de meetresultaten geanalyseerd moeten worden. Het probleem is dat deze grafieken niet voor iedereen gemakkelijk te interpreteren zijn en specifieke training vereisen. Daarom krijgt de ultrasone drone voor gebruikersvriendelijkheid een -.

De ondersteuning en training voor de ultrasone drone wordt eveneens verzorgd door Vortex, net als bij de normale drone. Hierdoor is ondersteuning eenvoudig toegankelijk, wat leidt tot een score van ++ voor deze factor.

Wat betreft de technische compatibiliteit met het waterschap geldt hetzelfde als voor de normale drone: de bestaande methodiek blijft grotendeels intact. Het enige verschil is dat de ultrasone drone extra gegevens genereert die verwerkt moeten worden. Dit introduceert een extra stap in het huidige proces, wat de compatibiliteit enigszins verlaagt. Daarom krijgt de ultrasone drone voor deze factor een +.

Het gemiddelde van de drie factoren resulteert in een +, wat neerkomt op een score van 75 in de multi criteria analyse.

De technische compatibiliteit van de robot met het waterschap is momenteel zeer laag. Robots zoals deze worden nauwelijks toegepast binnen de organisatie, waardoor er geen bestaande infrastructuur of ervaring is om de robot direct te implementeren. Bovendien kunnen de unieke werkomstandigheden van het waterschap, zoals vochtige of corrosieve omgevingen, extra aanpassingen aan de robot vereisen. Dit verhoogt niet alleen de implementatietijd, maar ook de kosten. Daarom krijgt de compatibiliteit van de robot een --.

Op het gebied van gebruikersvriendelijkheid scoort de robot redelijk. Een groot voordeel is dat deze autonoom werkt na activatie, wat het gebruik eenvoudig maakt. Dit bespaart tijd en vermindert de kans op menselijke fouten. Echter, de robot moet met een touw worden beveiligd, wat een significante beperking is. Bovendien kunnen omgevingsfactoren, zoals obstakels of oneffen oppervlakken, de werking verstoren. Hierdoor krijgt de robot een +/- op dit criterium.

Een groot knelpunt is het gebrek aan een handleiding of duidelijke gebruiksinstructies. Hierdoor kunnen alleen de ontwikkelaars de robot correct bedienen. Dit beperkt de beschikbaarheid van deskundige operators en maakt het waterschap afhankelijk van externe ondersteuning. Bovendien ontbreekt informatie over onderhoudsprocedures, wat de betrouwbaarheid op lange termijn beïnvloedt. Daarom krijgt de robot voor ondersteuning en training een --.

Op basis van de gemiddelde score van de drie factoren krijgt de robot een -, wat neerkomt op een score van 25 in de multi criteria analyse.

Volwassenheid van het alternatief

Zoals eerder beschreven in hoofdstuk 7.1 'Uitslagen van de methodes', wordt dit criterium beschreven aan de hand van drie verschillende factoren die beoordeeld kunnen worden met een --, -, +/-, + of ++. De factoren waarop beoordeeld wordt, zijn: de feitelijke haalbaarheid van het alternatief, of het alternatief logisch en consistent is in de realiteit, en tot slot de externe omstandigheden van het alternatief.

Startend met de huidige manier van werken, de steiger: kijkend naar de feitelijke haalbaarheid van de steiger kan dit beoordeeld worden met een ++. De reden voor deze beoordeling is dat de steigers op dit moment al gebruikt worden voor het inspecteren en onderhouden van de vergistingsbollen. Dit zorgt ervoor dat dit alternatief volledig haalbaar is binnen het waterschap. Het alternatief is ook logisch en consistent in de realiteit, aangezien het op dit moment een werkend alternatief is. Tot slot zijn de externe omstandigheden ook goed, aangezien de steiger een welbekende technologie is en een steiger ook te koop of te huur is in de huidige markt.

Het volgende alternatief is de X12 laser scanner. Feitelijk gezien is het haalbaar voor de X12 laser scanner om de vergistingsbollen te scannen op scheuren en breuken. Dit wordt op dit moment ook al gebruikt in andere sectoren; een voorbeeld hiervan is de civiele sector. Hier worden laser scanners al gebruikt om scheuren en breuken te detecteren in bruggen en gebouwen (Adhikari et al., 2023; Xu & Yang, 2019). Voor de feitelijke haalbaarheid van de X12 laser scanner krijgt het een score van ++.

Vervolgens wordt er gekeken of de X12 laser scanner logisch en consistent is in de realiteit. Logisch is het zeker om de X12 laser scanner te gebruiken voor het detecteren van scheuren en breuken in de vergistingsbollen. Zoals net al is beschreven, wordt een laser scanner al in andere vakgebieden gebruikt voor het detecteren van scheuren en breuken. De consistentie van de X12 laser scanner kan echter betwijfeld worden. De specificaties van de X12 laser scanner, zoals beschreven in 5.1 'Lasers', zijn goed genoeg om kleine scheuren en breuken te detecteren, maar de laser scanner verliest wel focus naarmate de afstand tot het doelwit groter wordt. Hierbij zouden er fouten kunnen optreden naarmate de afstand van het doelwit tot de laser scanner groter wordt. Ondanks dit mankement is de laser scanner op kleinere afstanden wel weer heel consistent. Vandaar dat deze factor een + score krijgt.

Tot slot wordt er gekeken naar de externe omstandigheden van de X12 laser scanner. De technologie voor het gebruik van een laser scanner bestaat al sinds de late jaren 1990 (Mendez, 2017; S2P, 2024) en deze technologie is up-to-date met de X12 laser scanner, dit is het nieuwste model van Trimble. Tevens is de X12 laser scanner ook op de markt te verkrijgen (Geometius, z.d.), waardoor de externe omstandigheden een score van ++ krijgen. Dit zorgt ervoor dat de X12 laser scanner voor deze factoren een gemiddelde score van ++ heeft en dus een score van 100 krijgt.

De normale drone wordt ook beoordeeld aan de hand van de drie eerder genoemde factoren. Beginnend met de eerste factor: de feitelijke haalbaarheid. Drones worden in Duitsland al gebruikt voor het inspecteren van de eivormige vergistingsbollen (Kopterflug, z.d.-a, z.d.-b). Hierdoor krijgt de feitelijke haalbaarheid van de normale drone een ++.

De tweede factor, de logische en consistente toepassing in de realiteit, zorgt ervoor dat de normale drone een score van ++ krijgt. Dit komt omdat het een logische vervanging is voor een steiger als men op hoogte moet werken, en drones worden net zoals bij de X12 laser scanner al gebruikt om scheuren en breuken te detecteren op hoogte. Tevens is een drone net zo consistent als een steiger, aangezien de scheuren en breuken nog steeds worden geanalyseerd door middel van het blote oog. Het enige probleem is de kwaliteit van de camera van de drone. De drone heeft een camera die zowel het beeld

vastlegt in 4K-kwaliteit als een virtuele kaart met behulp van LIDAR. Hierdoor krijgt de normale drone voor deze factor ook een ++.

Zoals eerder al beschreven, wordt de technologie al toegepast in Duitsland. Het bedrijf dat voor deze inspecties zorgt, heet Flyability en is oorspronkelijk gelokaliseerd in Zwitserland. Op dit moment zit er een distributeur van Flyability in Heinenoord die de drones mag verkopen en verhuren (Flyability, z.d.). Dus de markt voor de drones is binnen handbereik en de technologie voor het gebruik van deze drones is ook binnen handbereik, aangezien je de drone zowel kunt kopen als huren. Vandaar dat de normale drone voor deze factor een score van ++ krijgt. Dit betekent dat de gemiddelde score van deze drie factoren uitkomt op ++, wat betekent dat de normale drone een score van 100 krijgt.

De ultrasone drone heeft bij de eerste en de derde factor dezelfde uitkomst als de normale drone. Dit heeft ermee te maken dat de ultrasone drone ook in Duitsland wordt gebruikt voor exact dezelfde methodes als de normale drone en de ultrasone drone is ook te koop of te huur bij dezelfde distributeur als de normale drone. Vandaar dat de ultrasone drone voor de feitelijke haalbaarheid en de externe omstandigheden net zoals de normale drone een ++ krijgt als score.

De enige factor die verschilt met de normale drone is dat de ultrasone drone gebruik maakt van ultrasone geluidsgolven. Hierdoor kan hij door de wanden heen kijken om te achterhalen of er scheuren en/of breuken ontstaan. Het nadeel hiervan is dat het gewoon niet logisch is om dit te gebruiken voor grote vergistingsbollen. Er wordt gekeken naar kleine oppervlakken in plaats van grotere gebieden, waardoor het veel logischer is om de ultrasone drone te gebruiken voor kleinere oppervlaktes in de vergistingsbollen. Vandaar dat de ultrasone drone hiervoor een – score krijgt. Dit betekent dat de gemiddelde score voor de ultrasone drone uitkomt op +, wat een score van 75 oplevert.

De feitelijke haalbaarheid van de onderhoudsrobot, vergeleken met bijvoorbeeld die van de normale drone, is niet heel realistisch. De robot kan in een bepaald tempo lopen op zowel een muur als het plafond, maar om dit plan te realiseren, moet de robot met behulp van padzoekende functies ook nog een bepaalde route afleggen. Dit is al mogelijk voor bepaalde robots (Li et al., 2023), alleen is dit niet expliciet vermeld door Hong et al. (2022) of deze robot dit ook kan. Tevens moet de robot om onderhoud te plegen ook in staat zijn om zelf de scheuren en breuken dicht te maken, en dit is zeker nog geen mogelijkheid met de maximale 3 kg die de robot kan tillen op dit moment (PR Office, 2022). Aangezien de robot op dit moment feitelijk nog niet haalbaar is, krijgt de onderhoudsrobot voor deze factor een --.

Op papier is het een geweldig innovatief idee om een robot de scheuren en breuken in de vergistingsbollen te laten vullen, maar in de realiteit ziet dit plaatje er toch anders uit. Dit komt omdat de robot consistent is in het lopen van punt A naar punt B. Logisch is het ook om een robot dit werk te laten doen, alleen is het nog niet heel logisch en optimaal om de robot op dit moment dit werk te laten doen vanwege de geringe hoeveelheid informatie die op dit moment bekend is over deze technologie. Op dit moment zijn er al wel robots die het mogelijk maken om verschillende werkzaamheden te verrichten, bijvoorbeeld de Boston Dynamics Atlas (Boston Dynamics, z.d.). Alleen is deze robot speciaal gefabriceerd voor bewegingen op de grond en dus niet voor het lopen en beklimmen van wanden. Vandaar dat de robot voor deze factor een +/- krijgt.

Tot slot is het vanwege de externe omstandigheden nog niet mogelijk om deze robot aan het werk te krijgen bij het waterschap. Dit heeft ermee te maken dat de robot nog niet op de markt is uitgebracht en dus niet gekocht of gebruikt kan worden voor private doeleinden. Ten tweede is de technologie, zoals hierboven beschreven, nog niet goed genoeg ontwikkeld, zodat de robot op zichzelf met behulp van een puntwolk een weg kan banen tussen de verschillende scheuren en breuken en deze vervolgens

ook nog kan repareren. Vandaar dat de robot een -- krijgt. De robot heeft dankzij deze drie factoren een gemiddelde score van – en krijgt dus een score van 25.

7.3 Multi criteria decision analysis

In hoofdstuk 7.2 'Vergelijking' hebben alle alternatieven een score gekregen voor de verschillende criteria. Hier is ook een redenering bij genoemd voor de verschillende scores en daaruit komt een multi criteria analyse die is weer gegeven in tabel 6. Voor de uitslag van de multi criteria analyse is van belang dat er gekeken wordt naar de gemiddelde scores van alle alternatieven, de gemiddelde scores zijn berekend aan de hand van vergelijking 1. Hierdoor wordt er geen onderscheidt gemaakt tussen de alternatieven de eventuele alternatieven die niet voor iedere criteria een score hebben gekregen.

$$\frac{\text{Wegingsfactor} * \text{Scores}}{\sum \text{Alle gebruikte wegingsfactoren}}$$

Vergelijking 1

Tabel 6: Uitslag van de MCDA voor de verschillende alternatieven

Criteria	Wegingsfactor	Inspectie				Onderhoud	
		Huidig	X12 laser scanner	Normale drone	Ultrasone drone	Huidig	Robot
Veiligheid	2,5	33	66	100	100	33	0
Tijdsduur	2,5	0	50	75	100	0	25
Milieu vriendelijk	1	25	50	100	75	25	75
Toegang door luik	1,5	50	50	87,5	87,5	50	100
Implementatie	2	100	75	75	75	100	25
Volwassenheid	2	100	100	100	75	100	25
Wegingsfactor * Scores		582,5	765	1018,75	1006,25	582,5	387,5
Gemiddelde		50,65217391	66,52173913	88,58695652	87,5	50,65217	33,69565

8. Discussie

In dit hoofdstuk worden de beperkingen van het onderzoek besproken en uitgelicht. De informatie die is verkregen voor het legen, inspecteren en onderhouden van de vergistingsbollen is vergaard aan de hand van interviews. In dit onderzoek zijn twee mensen geïnterviewd die werken bij ABV Haukes en VanderValk+DeGroot.

Hoewel deze interviews waardevolle informatie hebben opgeleverd, brengen ze ook enkele beperkingen met zich mee. Het beperkte aantal van twee interviews kan de objectiviteit van de resultaten beïnvloeden. Zo kan de stemming of persoonlijke situatie van de geïnterviewde op de dag van het interview de antwoorden beïnvloeden, wat kan leiden tot afwijkingen van hun gebruikelijke inzichten. Daarnaast kunnen sterke persoonlijke voorkeuren of vooroordelen van de geïnterviewden ervoor zorgen dat sommige antwoorden meer subjectief dan objectief zijn. Deze factoren beperken de generaliseerbaarheid van de bevindingen en benadrukken de noodzaak voor een bredere steekproef om een meer representatief en gebalanceerd beeld te verkrijgen.

Een ander discussiepunt kan zijn dat er veel aannames zijn gedaan voor het bepalen van de verschillende LCA's van de alternatieven. Deze aannames zijn voortgekomen uit goed opgebouwde argumenten, maar de getallen zullen niet exact zijn. Dit kan te maken hebben met het feit dat er nog geen onderzoek is gedaan naar de LCA van het desbetreffende alternatief, waardoor de onderzoeker dit zelf moest doen aan de hand van verschillende componenten van het alternatief. Hier kwam de volgende beperking naar voren: de verschillende componenten van de alternatieven zijn niet altijd beschikbaar. Er was niet altijd informatie over de specifieke materiaalcompositie van het alternatief, waardoor hiervoor soms een ruwe schatting is gemaakt, tenzij anders is aangegeven.

Een ander discussiepunt betreft de scores die zijn toegewezen aan de verschillende criteria. Er is vanuit gegaan dat de scores een lineaire schaal volgen, gebaseerd op de bandbreedte van de scores, terwijl dit in de werkelijkheid heel anders kan zijn. De scores kunnen ook een exponentiële relatie met elkaar hebben. Dit kan uiteindelijk de score van de multi-criteria-analyse beïnvloeden.

9. Conclusie/aanbeveling waterschap

Tot slot wordt de conclusie bekendgemaakt. Dit gebeurt door het beantwoorden van de verschillende deelvragen, waarna de hoofdvraag van het onderzoek wordt beantwoord. Dit vormt tevens de aanbeveling die wordt meegegeven aan het waterschap Vechtstromen.

1) Wat is op dit moment de handelwijze voor het legen, inspecteren en onderhouden van de vergistingsbollen die wordt toegepast in Hengelo?

Op dit moment worden de vergistingsbollen geëegd door middel van het affakkelen van biogas en het doorsturen van het biogas naar de warmtekrachtkoppeling. Vervolgens worden de vergistingsbollen geïnertiseerd met stikstof en water. Daarna worden de wanden schoongeboend en kan de inspectie beginnen. Dit gebeurt door het opbouwen van een steiger in de vergistingsbollen, waarna een inspectielijst wordt afgewerkt. Zodra deze lijst is afgewerkt, worden de scheuren en breuken in de vergistingsbollen gerepareerd, evenals andere bijbehorende gebreken.

2) Welke huidige methodes worden in de huidige markt al toegepast om de vergistingsbollen of andere silo's te legen, inspecteren en onderhouden, en wat zijn de positieve en negatieve aspecten hiervan?

Binnen de huidige markt worden verschillende methodes toegepast om vergistingsbollen of andere silo's te legen, inspecteren en onderhouden. Zo worden er in Duitsland al drones ingezet voor de inspectie van vergistingsbollen. Dit zijn zowel drones met een LIDAR-camera als drones die gebruikmaken van ultrasone golven. In de civieltechnische sector wordt gebruikgemaakt van laserscanners om bruggen en grote gebouwen te inspecteren op scheuren en breuken. Een ander idee is het inzetten van een robot die scheuren en breuken kan opvullen. Deze robot maakt gebruik van een padzoekingsfunctie en een puntwolk, waardoor hij op basis van verzamelde informatie de weg kan vinden naar de desbetreffende scheur of breuk.

3) Wat zijn de criteria en wegingsfactoren voor het vaststellen van de meest optimale oplossing, zodat de uitvaltijd van de vergistingsbollen tijdens het legen, inspecteren en onderhouden in Hengelo geminimaliseerd kan worden?

Voor de selectie van de meest optimale oplossing zijn de volgende criteria en wegingsfactoren vastgesteld:

- **Veiligheid:** Hierbij wordt rekening gehouden met zowel de veiligheid van de gebruiker als de veiligheid van de omgeving. Dit criterium heeft een wegingsfactor van 2,5.
- **Tijdsduur:** Dit criterium beoordeelt hoelang het alternatief nodig heeft om de handeling uit te voeren. Net als veiligheid heeft tijdsduur een wegingsfactor van 2,5.
- **Implementatie en volwassenheid van het alternatief:** Deze factoren zijn van belang om te bepalen of het alternatief eenvoudig te implementeren is bij het waterschap en of het überhaupt haalbaar is. Een analyse aan de hand van drie factoren per criterium heeft plaatsgevonden om deze haalbaarheid te beoordelen. Omdat implementatie en volwassenheid cruciaal zijn voor de bruikbaarheid van het alternatief, hebben deze criteria een wegingsfactor van 2 gekregen.

- Toegankelijkheid via het luik: Het zou optimaal zijn als het alternatief volledig door het luik past, maar dit is geen absolute vereiste. Toch kan dit enige invloed hebben op het uiteindelijke resultaat, waardoor dit criterium een wegingsfactor van 1,5 krijgt.
- De milieuvriendelijkheid van het alternatief: Zoals eerder besproken, is het een bijkomend voordeel als het alternatief milieuvriendelijker is dan de huidige werkwijze, maar het heeft geen hoge prioriteit. Daarom heeft dit criterium een wegingsfactor van 1 gekregen.

4) Hoe kan de uitvaltijd van de vergistingsbollen tijdens het legen, inspecteren en onderhouden in Hengelo geminimaliseerd worden?

Hieronder is tabel 7 weergegeven, waarin de verschillende alternatieven en hun behaalde scores op basis van de criteria en wegingsfactoren te zien zijn. Uit de tabel kan geconcludeerd worden dat het gebruik van een steiger, vergeleken met de drie andere alternatieven, de minst efficiënte optie is.

Daarom wordt aanbevolen om bij de inspectie van de vergistingsbollen gebruik te maken van een drone met een camera. Hierdoor kan de drone de vergistingsbol binnenvliegen, waardoor er geen steiger meer hoeft te worden opgebouwd.

De alternatieven voor onderhoud zijn eveneens weergegeven in tabel 7. Voor het uitvoeren van onderhoud wordt geadviseerd om de huidige werkwijze te handhaven totdat een beter alternatief beschikbaar is. Op dit moment is de onderhoudsrobot nog niet voldoende ontwikkeld om goed te functioneren en de taken van de huidige arbeiders over te nemen

Tabel 7: Uitslag van de MCDA voor de verschillende alternatieven

Criteria	Wegingsfactor	Inspectie				Onderhoud	
		Huidig	X12 laser scanner	Normale drone	Ultrasone drone	Huidig	Robot
Veiligheid	2,5	33	66	100	100	33	0
Tijdsduur	2,5	0	50	75	100	0	25
Milieu vriendelijk	1	25	50	100	75	25	75
Toegang door luik	1,5	50	50	87,5	87,5	50	100
Implementatie	2	100	75	75	75	100	25
Volwassenheid	2	100	100	100	75	100	25
Wegingsfactor * Scores		582,5	765	1018,75	1006,25	582,5	387,5
Gemiddelde		50,65217391	66,52173913	88,58695652	87,5	50,65217	33,69565

10. Aanbeveling voor een vervolgonderzoek

Puur kijkend naar de verschillen tussen de alternatieven, valt er te discussiëren over de haalbaarheid van de geautomatiseerde robot. Deze robot functioneert op dit moment, maar er doen zich problemen voor bij de uitvoering van specifieke tests. Met behulp van padzoekalgoritmes zou de robot ervoor kunnen zorgen dat de geconstateerde breuken en scheuren onder verschillende omstandigheden worden gerepareerd. Dit kan veel tijd besparen en is bovendien veiliger dan het gebruik van een steiger.

Desondanks is er nog weinig onderzoek gedaan naar de daadwerkelijke haalbaarheid van deze robot, aangezien het gebruik ervan in deze context een vrij nieuwe en snel evoluerende ontwikkeling is. Er zou eventueel vervolgonderzoek kunnen plaatsvinden om te bepalen of het mogelijk is om een robot te ontwikkelen die, op basis van een puntwolk, een bepaald pad kan volgen en vervolgens zelfstandig scheuren en/of breuken kan dichten.

Daarnaast zou er een vervolgonderzoek kunnen worden uitgevoerd naar de LCA-scores van de verschillende alternatieven, zodat deze niet langer gebaseerd zijn op aannames. Hiervoor zou het aan te raden zijn om de verschillende onderdelen van de alternatieven fysiek te verkrijgen en op basis daarvan een nauwkeurige LCA-score te berekenen.

Tot slot zou vervolgonderzoek kunnen worden opgezet om de definitieve verbanden tussen de gegeven scores voor de criteria te bepalen. Op dit moment is ervan uitgegaan dat de scores een lineair verband met elkaar hebben, gebaseerd op de bandbreedte van de scores. In werkelijkheid kan dit echter anders zijn; de scores zouden bijvoorbeeld ook een exponentieel verband met elkaar kunnen hebben. Toekomstig onderzoek hiernaar zou mogelijk leiden tot andere inzichten, wat als gevolg kan hebben dat een ander alternatief uiteindelijk geschikter blijkt te zijn voor het legen, inspecteren en onderhouden van de vergistingsbollen.

11. Referenties

- Adhikari, M. D., Kim, T.-H., Yum, S.-G., & Kim, J.-Y. (2023). Damage Detection and Monitoring of a Concrete Structure Using 3D Laser Scanning. *Engineering Proceedings*, 36. <https://doi.org/10.3390/engproc2023036001>
- Air Products. (z.d.). *Verpakken, inertiseren en blanketen*. Geraadpleegd 22 januari 2025, van <https://www.airproducts.nl/applications/packaging-inerting-blanketing-chemicals#:~:text=Inertiseren%2C%20ook%20wel%20blanketing%20genoemd,of%20niet%2Dreactieve%20toestand%20blijft>.
- Andersson, Ö., & Börjesson, P. (2021). The greenhouse gas emissions of an electrified vehicle combined with renewable fuels: Life cycle assessment and policy implications. *Applied Energy*, 289, 116621. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116621>
- ARPA. (2013). *METALS Program Overview*. Advanced Research Projects Agency-Energy (ARPA-E). https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/documents/files/METALS_ProgramSummary.pdf
- Astrodyne. (z.d.). *Power Distribution Unit (PDU) Components Infographic*. Geraadpleegd 16 januari 2025, van <https://www.astrodynedi.com/blog/power-distribution-components>
- Azhari, F. (2022). *Automated Crack Detection and Characterisation from 3D Point Clouds of Unstructured Surfaces* [Queensland University of Technology]. https://eprints.qut.edu.au/234510/1/Faris_Azhari_Thesis.pdf
- Beenen Industrial Automation. (2018). *Beenen BV: Voorspellend onderhoud 4.0*. <https://www.valleibusiness.nl/magazine/artikel/1053/18381/beenen-bv:-voorspellend-onderhoud-40#>
- Belsky, S. (2011). *Making ideas happen: Overcoming the obstacles between vision and reality*. Portfolio Penguin.
- Bendell, T. (2005). Structuring business process improvement methodologies. *Total Quality Management & Business Excellence*, 16(8-9), 969-978. <https://doi.org/10.1080/14783360500163110>
- Berggren, C., Bergek, A., Bengtsson, L., Söderlund, J., & Hobday, M. (2011). *Knowledge Integration and Innovation*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199693924.001.0001>
- Bertagnolli, F. (2022). *Lean Management: Introduction and In-Depth Study of Japanese Management Philosophy* (1ste dr.). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-36087-0>
- BIPAS. (2024, augustus 14). *Embodied Carbon*. ARUP. <https://www.istructe.org/IStructE/media/Public/Resources/ARUP-Embodied-carbon-aluminium.pdf>
- Boston Dynamics (Regisseur). (z.d.). *Atlas® and beyond: The world's most dynamic robots* [Video recording]. Geraadpleegd 22 januari 2025, van <https://bostondynamics.com/atlas/>
- Brockhoff, K. (2012). Knowledge Integration and Innovation: Critical Challenges Facing International Technology-based Firms. *R&D Management*, 42(2), 193-193. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9310.2012.00676.x>

- Burgan, B. A., & Sansom, M. R. (2006). Sustainable steel construction. *Journal of Constructional Steel Research*, 62(11), 1178-1183.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.06.029>
- City of Winnipeg. (z.d.). *Emissions factor in kg CO₂-equivalent per unit*.
https://www.winnipeg.ca/finance/findata/matmgt/documents/2012/682-2012/682-2012_appendix_h-wstp_south_end_plant_process_selection_report/appendix%207.pdf
- Costa, A. L. B., & Balduino, Â. R. (2018). The Importance of Preventive and Corrective Maintenance in Works. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 5(5), 72-76. <https://doi.org/10.22161/ijaers.5.5.10>
- CUR. (2005). *CUR-PBVAanbeveling 65*. <https://abvhaukes.nl/wp-content/uploads/2020/05/CUR-PBV-Aanbeveling-65.pdf>
- Davis, F. D. (1989). Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. *MIS Quarterly*, 13(3), 319.
<https://doi.org/10.2307/249008>
- De Jong, P., Van Dijk, R., Steijgerwalt, W. F., Veldhoen, A. B., Hendrickx, B. J. G., Van der Belt, R. H., Sanders, D. B., Heuven, J. G., Roose, C., & Van der Werf, M. F. B. (2018). *Energiefabriek rwzi Hengelo* (p. 153) [Definitief Ontwerp]. Witteveen+Bos.
- De Ruijter, A., & Guldenmund, F. (2016). The bowtie method: A review. *Safety Science*, 88, 211-218. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.03.001>
- Dell. (z.d.). *Dell Embedded Box PC 3000 and 5000 Series* [Datasheet]. Geraadpleegd 16 januari 2025, van <https://i.dell.com/sites/doccontent/shared-content/data-sheets/en/Documents/specsheet-dell-embedded-box-PC-3000-5000.pdf>
- Delvosalle, C., Fievez, C., Pipart, A., & Debray, B. (2006). ARAMIS project: A comprehensive methodology for the identification of reference accident scenarios in process industries. *Journal of Hazardous Materials*, 130(3), 200-219.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.07.005>
- Deng, D., Polden, J. W., Dong, J., & Tao, P. Y. (2018). Sensor Guided Robot Path Generation for Surface Repair Tasks on a Large-Scale Buoyancy Module. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 23(2), 636-645.
<https://doi.org/10.1109/TMECH.2018.2797177>
- Diakoulaki, D., & Karangelis, F. (2007). Multi-criteria decision analysis and cost-benefit analysis of alternative scenarios for the power generation sector in Greece. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(4), 716-727.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.06.007>
- DIGI. (z.d.). *DIGI XBEE S2C 802. 15.4 RF MODULES* [DataSheet]. Geraadpleegd 16 januari 2025, van https://www.digi.com/resources/library/data-sheets/ds_xbee-s2c-802-15-4
- Ehrenberger, S. (2020, oktober 30). *Update of Life Cycle Assessment of Magnesium Components in Vehicle Construction*.
<https://cdn.ymaws.com/www.intlmag.org/resource/resmgr/sustainability/LCA-update-summary-2020-Oct-.pdf>
- Ehrenberger, S., & Tauber, M. (2021, maart 31). *IMA Launches New Magnesium LCA Study: Setting Sight on Lowering CO₂ Emissions*. Light Metal Age.
<https://www.lightmetalage.com/news/industry-news/magnesium/ima-launches-new-magnesium-lca-study-setting-sight-on-lowering-co2-emissions/>

- Elite Recyclers. (z.d.). *Metals We Recycle* [Informatie]. Metals We Recycle. Geraadpleegd 15 januari 2025, van <https://eliterecyclers.com/materials/metals-we-recycle/>
- Emilsson, E., & Dahllöf, L. (2019, november). *Lithium-Ion Vehicle Battery Production*. IVL Swedish Environmental Research Institute. <https://www.ivl.se/download/18.694ca0617a1de98f473464/1628416191286/FULLTEXT01.pdf>
- Esri Nederland. (2022). Waterschappen bereiden zich voor op de toekomst met 3D-modellering. *ESRIMAGAZINE*, 1, 14.
- Europees parlement en de raad van de Europese Unie. (2000). *ATEX 153: Veiligheidseisen van werkgevers of eigenaren van ATEX-installaties*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/PDF/?uri=CELEX:31999L0092&from=EN>
- Europees parlement en de raad van de Europese Unie. (2014). *ATEX 114: Apparatuur- en producteisen*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0034>
- Farias, J. S., & Resende, M. M. (2020). Impacto do treinamento na implantação de novo sistema eletrônico e aceitação de novas tecnologias em uma instituição federal de ensino superior. *Revista de Administração da UFSM*, 13(4), 773-791. <https://doi.org/10.5902/1983465932624>
- Flyability. (z.d.). *Find your local distributor*. Geraadpleegd 21 februari 2025, van <https://www.flyability.com/distributors?country=5>
- Flyability. (2022a, mei 19). *ELIOS 3 Digitizing the inaccessible*. <https://www.flyability.com/elios-3-documentation-collection?hsCtaTracking=00fcb6fe-3e97-4cb3-9665-e2e6cbd71cf1%7Cb7dd6217-c91e-4e00-a44a-e8d224af9afb>
- Flyability. (2022b, mei 19). *ELIOS 3 Technical specifications*.
- Flyability. (2022c, mei 19). *Elios 3 UT Payload*. <https://www.flyability.com/elios-3-ut-payload>
- Fujii, K., & Kondo, W. (1983). Communications of the American Ceramic Society Estimation of Thermochemical Data for Calcium Silicate Hydrate (C-S-H). *Journal of the American Ceramic Society*, 66(12). <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1983.tb11011.x>
- Geometius. (z.d.). *Trimble X12 3D Laserscanner*. Geraadpleegd 10 december 2024, van <https://www.geometius.nl/product/trimble-x12-3d-scanner/>
- Grant, R. M. (1996). Toward a knowledge-based theory of the firm. *Strategic Management Journal*, 17(S2), 109-122. <https://doi.org/10.1002/smj.4250171110>
- Grant, R. M. (08/1996a). Prospering in Dynamically-Competitive Environments: Organizational Capability as Knowledge Integration. *Organization Science*, 7(4), 375-387. <https://doi.org/10.1287/orsc.7.4.375>
- Gross, J. M. (2002). *Fundamentals of preventive maintenance*. American Management Association. <https://ut.on.worldcat.org/search/detail/426028166?lang=en&queryString=Fundamental%20of%20preventive%20maintenance>
- Hoang, A., Tseng, W., Viswanathan, S., & Evans, H. (2015). *Life Cycle Assessment of a Laptop Computer and its Contribution to Greenhouse Gas Emissions*. https://www.mike-barnes.co.uk/monkeys/footnotes/23%20-%20rsPDF_126.pdf

- Hoła, J., & Sadowski, Ł. (Red.). (2022). *Non-destructive Testing in Civil Engineering*. MDPI. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-5132-6>
- Hong, S., Um, Y., Park, J., & Park, H.-W. (2022). Agile and versatile climbing on ferromagnetic surfaces with a quadrupedal robot. *Science Robotics*, 7(73). <https://doi.org/10.1126/scirobotics.add1017>
- Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115-2126. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>
- Intel. (2015, december). *Microcontroller*. <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/details/processors/core-ultra.html>
- Jinglong Wang, M. (2022, januari). *The Environmental Footprint of Semi-Fabricated Aluminum Products in North America*. The Aluminum Association. https://www.aluminum.org/sites/default/files/2022-01/2022_Executive-Summary_Semi-Fab_LCA.pdf
- Kopterflug. (z.d.-a). *Drohneninspektion in der Industrie – Effizienz und Sicherheit mit der Flyability Elios 3*. Geraadpleegd 3 december 2024, van <https://www.kopterflug.de/drohneninspektion-industrie/>
- Kopterflug. (z.d.-b). *Drohneninspektionen in der Chemischen Industrie mit der Flyability Elios 3 – Präzise, schnell, sicher*. Geraadpleegd 20 november 2024, van <https://www.kopterflug.de/drohneninspektion-chemische-industrie/>
- Kotter, J. P. (2005). *Leading Change*.
- Laleicke, P. F., Cimino-Hurt, A., Gardner, D., & Sinha, A. (2015). Comparative carbon footprint analysis bamboo and steel scaffolding. *Journal of Green Building*, 10(1), 114-126. <https://doi.org/10.3992/jgb.10.1.114>
- Larouzee, J., & Le Coze, J.-C. (2020). Good and bad reasons: The Swiss cheese model and its critics. In *Safety Science* (Vol. 126). Elsevier.
- Lezennec, A., Hayes, J., Jackson, G., & Okscin, A. (Regisseurs). (2022, augustus). *Introduction to the New Trimble X12 3D Laser Scanning System* [Video recording]. Trimble Geospatial. <https://geospatial.trimble.com/en/resources/webinar/introduction-to-the-new-trimble-x12-3d-laser-scanning-system>
- Li, P. Z., Xie, C., & Guo, X. (2023). *Multi-robots dynamic path planning based on improved A* algorithm*. In Review. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3421061/v1>
- Liker, J. K. (with Meier, D.). (2013). *Toyota way fieldbook: A practical guide for implementing Toyota's 4Ps* (First edition). McGraw-Hill Education.
- Lin, M. S., Liu, L. C., Barnett, L. R., Tsai, Y. F., & Chu, K. R. (2021). On electromagnetic wave ignited sparks in aqueous dimers. *Physics of Plasmas*, 28(10), 102102. <https://doi.org/10.1063/5.0062014>
- López, D., & Oliver, M. (2023). Integrating Innovation into Business Strategy: Perspectives from Innovation Managers. *Sustainability*, 15(8), 6503. <https://doi.org/10.3390/su15086503>
- MatWeb. (1996a). *Elektro-Isola G-Etronax EP FR4 Epoxy* [DataSheet]. <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3c5f252f235844fb9ffec6d1856ba0e3>
- MatWeb. (1996b). *Overview of materials for Acrlonitrile Butadiene Styrene (ABS)* [DataSheet].

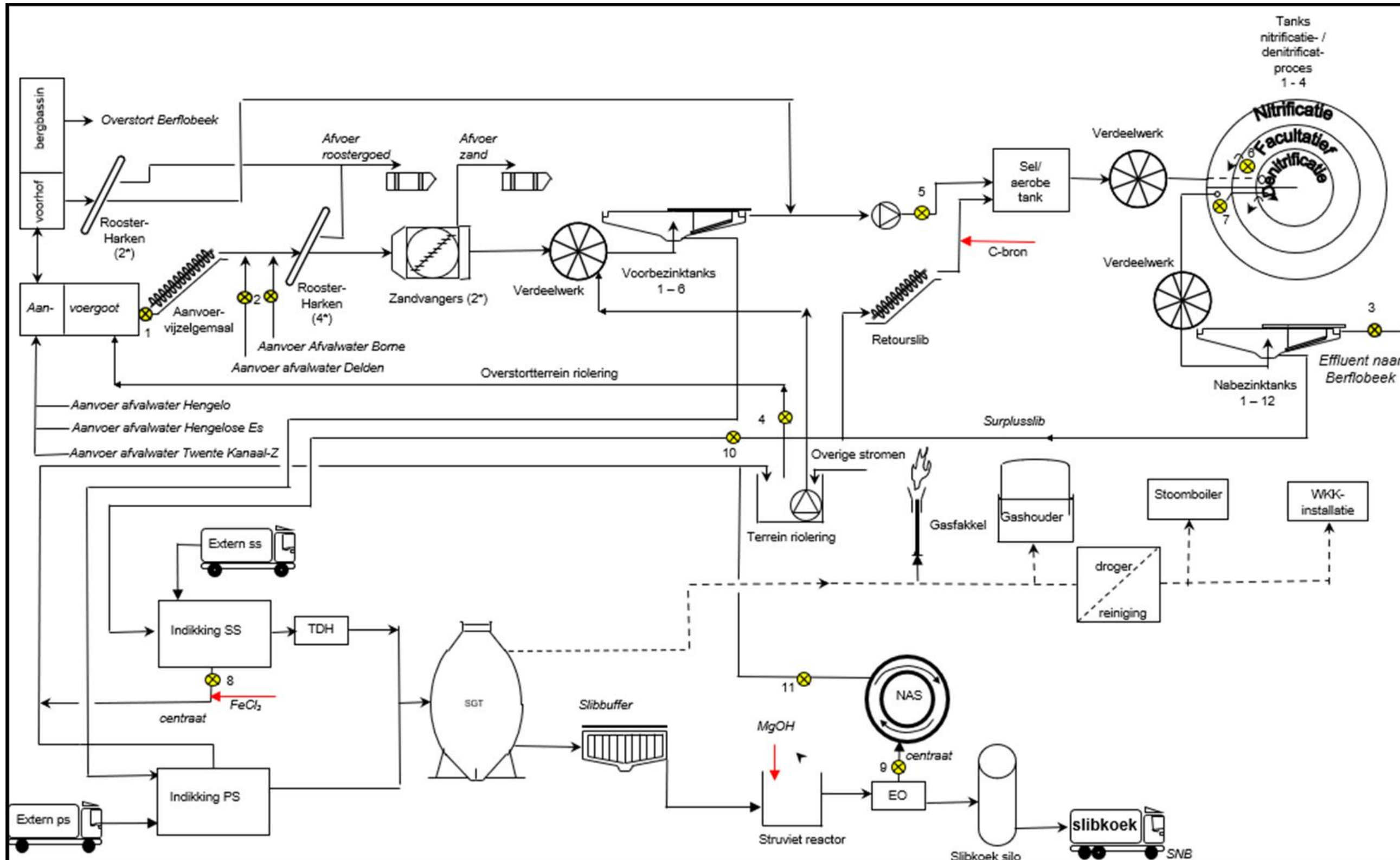
- <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=13420a38ee9445b291e63c6ac1a26ecb>
- Mendez, J. (2017, november 28). *History Of Laser Scanning*. SurvTech Solutions. <https://www.survttechsolutions.com/post/history-of-laser-scanning>
- Mendis, C. L., & Singh, A. (2013). Magnesium Recycling: To the Grave and Beyond. *JOM*, 65(10), 1283-1284. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0701-5>
- Michael, H., Rosenbaum, R., & Olsen, S. I. (2017). *Life Cycle Assessment* (1ste dr.). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>
- Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid. (2014). *Ontstaan van een explosie*. <https://www.arboportaal.nl/onderwerpen/explosieveiligheid-atex>
- MRS. (2023, mei 1). *Reduce Silo Inspection Costs with Drones*. <https://www.mrsl.co.uk/news/reduce-silo-inspection-costs-drones>
- Nennich, T., & Chase, L. (2019, augustus 16). *Dry Matter Determination*. Dairexnet. <https://dairy-cattle.extension.org/dry-matter-determination/#:~:text=Dry%20matter%20refers%20to%20material,DM%20portion%20of%20the%20feed.>
- Ngcephe, A. M. (2019). *Recovery of platinum group elements from waste material* [Master Thesis, University of the Free State]. <https://scholar.ufs.ac.za/server/api/core/bitstreams/d8482ffd-f0cb-4b7e-9692-efe1b575b6f8/content>
- Nielsen, J. (1993). *Usability engineering*. Academic press.
- ODI Inspecties Bodembescherming. (2017). *Herstelmaatregelen vloeistofdichte voorzieningen*. ODI. <https://odivdv.nl/wp-content/uploads/2022/08/Herstelmaatregelen-vloeistofdichte-voorzieningen-V2017-02.pdf>
- Pitblado, R., Fisher, M., Nelson, B., Fløtaker, H., Molazemi, K., & Stokke, A. (2024). *Dynamic Barrier Management—Managing Safety Barrier Degradation*. <https://www.icheme.org/media/11811/hazards-26-poster-06-dynamic-barrier-management-a-novel-approach-to-a-critical-safety-problem.pdf>
- PR Office. (2022, december 30). *A Quick but Clingy Creepy-Crawler that will MARVEL You*. https://news.kaist.ac.kr/newsen/html/news/?mode=V&mng_no=26130
- Reason, J. (2000). Human error: Models and management. *BMJ*, 320(7237), 768-770. <https://doi.org/10.1136/bmj.320.7237.768>
- Rijkswaterstaat. (2015). *Duurzame energie-infrastructuur*. <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/duurzame-energie/meer-duurzame-energie-in-de-toekomst/duurzame-energie-infrastructuur>
- S. Reosekar, R., & D. Pohekar, S. (2024). Six Sigma methodology: A structured review. *International Journal of Lean Six Sigma*, 5(4), 392-422. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-12-2013-0059>
- Samsung. (2013). *Introduction of INR18650-25R* [DataSheet]. <https://www.powerstream.com/p/INR18650-25R-datasheet.pdf>
- Shackelford, J. F., & Alexander, W. (2000). *Materials Science and Engineering Handbook* (3de dr.). CRC Press.
- SIKB. (2018). *AS SIKB 6700 Inspectie bodembeschermende voorzieningen*. <https://www.sikb.nl/bodembescherming/richtlijnen/as-sikb-6700>
- SIKB. (2024a). *Protocol 6701 Visuele inspectie vloeistofdichtheid (inclusief wijzigingsblad 1-01)*.

- https://www.sikb.nl/doc/interactievepdf/Protocol%206701%203_0_1-01_DvL.pdf
- SIKB. (2024b). *Protocol 6702 Geo-elektrische meting vloeistofdichtheid (inclusief wijzigingsblad 1-01)*.
https://www.sikb.nl/doc/interactievepdf/Protocol%206702%203_0_1-01_DvL.pdf
- SIKB. (2024c). *Protocol 6703 Hydrologische meting vloeistofdichtheid (inclusief wijzigingsblad 1-01)*.
https://www.sikb.nl/doc/interactievepdf/Protocol%206703%203_0_1-01_DvL.pdf
- Solovev, A., & Petrova, A. (2024, september 5). *DC Motor Controller: What It Is, Design Principles & Circuit Examples*. Integra Sources.
<https://www.integrasources.com/blog/dc-motor-controller-design-principles/>
- Standards Norway. (2010). *NORSOK Standard Z-013—Risk and emergency preparedness assessment* (Beleidsdocument No. 3).
https://downloads.regulations.gov/BSEE-2018-0002-46042/attachment_20.pdf
- Stobierski, T. (2019, mei 9). *How to do a cost-benefit analysis & why it's important*.
<https://online.hbs.edu/blog/post/cost-benefit-analysis>
- STOWA. (2011). *Handboek slibgistingen* [Handleiding].
<https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/PUBLICATIES/Publicaties%202011/STOWA%202011-16.pdf>
- Szwedo, J. (2012, oktober). *Preventive, Predictive and Corrective Maintenance* [Les].
https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/55460337/Session_B1_Preventive__Predictive__and_Corrective_Maintenance-libre.pdf?1515248422=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DPreventive_Predictive_and_Preventive_Pre.pdf&Expires=1737562506&Signature=CJq3bkG3X9DPGvpz~JHMZ-3fCEnVa7~XrqiDya5ktZx-CN8lVYgP7SLrsabC9JK2eE1XhMXnudhGlam4NLYw~cDcChiXJN4V3GUxwkOsroM-rPZfdurONnkRKvJDALJBceExVGwrUKkjvV3r-f~ofunklz8KiD4Rn2Vq2Ds~hOi4renQwkCpuUpHPghyssf5r~eB~JsfZ2rbv2QfrZIMlmRwDhTT-2P2Kholyuroanx-oklcGRQCiBp7-cvu~Uilz38UsdbqlvU-QVjKa6Od-ifXcpeMy~ir5d1XteAWmy5H4n7VG5VX62EeFIYOVRr2fWuRMxic-nTKguq0dxv-kQ__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- Thakkar, J. J. (2021). *Multi-Criteria Decision Making* (Vol. 336). Springer Singapore.
<https://doi.org/10.1007/978-981-33-4745-8>
- Trimble. (2019). *Trimble X12 3D Laser Scanner*.
https://trl.trimble.com/dscgi/ds.py/Get/File-1029077/022516-644A-nl-NL_Trimble%20X12_DS_0722_LR%20-%20Sec.pdf
- Trimble Inc. (z.d.). *Laser Scanning Trimble X12*. Geraadpleegd 23 januari 2025, van <https://geospatial.trimble.com/en/products/hardware/trimble-x12>
- Trimble Inc. (2022). *Trimble X12 3D Laser Scanner User Guide* (Handleiding No. 5; p. 98).
<https://shop.frontierprecision.com/wp-content/uploads/2024/06/X12-User-Guide.pdf>
- United Nations Climate Change. (2016, april 11). *The Paris Agreement*.
<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement#:~:text=It%20entered%20into%20force%20on,above%20pre%2Dindustrial%20levels.%E2%80%9D>

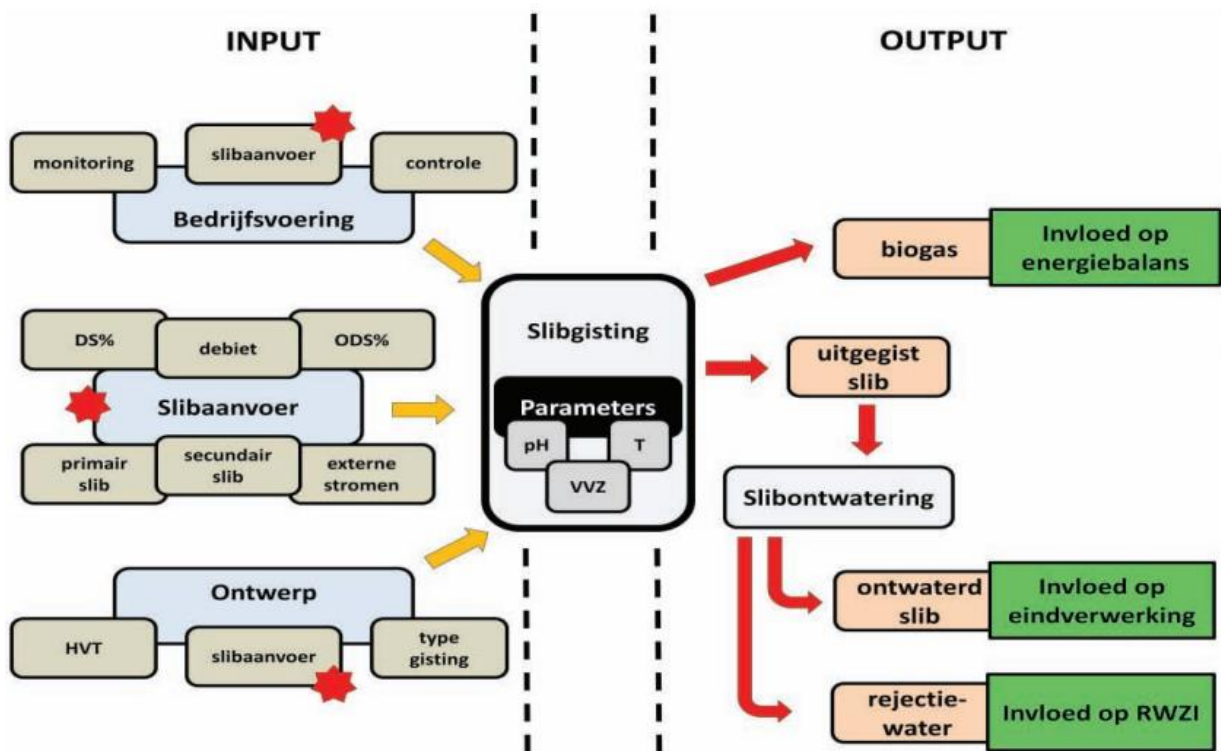
- Uzun Ozsahin, D., Gökçekuş, H., Uzun, B., & LaMoreaux, J. (Red.). (2021). *Application of Multi-Criteria Decision Analysis in Environmental and Civil Engineering* (1ste dr.). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-64765-0>
- Van Aken, J. E., & Berends, H. (2018). *Problem Solving in Organizations: A Methodological Handbook for Business and Management Students* (3de dr.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108236164>
- Van Cappellen, L., Wielders, L., & Scholten, T. (2021, november). *Emissiefactor elektriciteit uit fossiel bronnen*. CE Delft. https://www.rvo.nl/files/file/2022-05/CE_Delft_210338_Emissiefactor_Elektriciteit_Fossiele_Bronnen_DEF.pdf
- Van Hulst, J. (2023, april 19). *ATEX Zone Bepaling*. ICM Projects. <https://icmprojects.nl/atex-zone/bepaling/>
- Vortex. (z.d.). *Verkoop* [Informatie]. <https://www.vortex-hardware.com/verkoop>
- Wang, L., Liang, D., Yu, R., Wang, M., Tian, Y., Ma, T., Yang, B., Xu, B., & Jiang, W. (2024). Progress and prospects in magnesium alloy scrap recycling. *Journal of Magnesium and Alloys*, 12(12), 4828-4867. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2024.11.031>
- Waterschap Vechtstromen. (z.d.). *Over ons*. Geraadpleegd 27 september 2024, van <https://www.vechtstromen.nl/over-ons/>
- Waterschap Vechtstromen. (2018, december 2). *Energiefabriek Hengelo*. <https://www.vechtstromen.nl/projecten/projecten-afgerond/energiefabriek-hengelo/>
- West, J., Siddhpura, M., Evangelista, A., & Haddad, A. (2024). Improving Equipment Maintenance—Switching from Corrective to Preventative Maintenance Strategies. *Buildings*, 14(11), 3581. <https://doi.org/10.3390/buildings14113581>
- Womack, J. P., & Jones, D. T. (1997). Lean Thinking—Banish Waste and Create Wealth in your Corporation. *Journal of the Operational Research Society*, 48(11), 1148-1148. <https://doi.org/10.1038/sj.jors.2600967>
- Xu, X., & Yang, H. (2019). Intelligent crack extraction and analysis for tunnel structures with terrestrial laser scanning measurement. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(9), 1687814019872650. <https://doi.org/10.1177/1687814019872650>
- Yellishetty, M., Mudd, G. M., Ranjith, P. G., & Tharumarajah, A. (2011). Environmental life-cycle comparisons of steel production and recycling: Sustainability issues, problems and prospects. *Environmental Science & Policy*, 14(6), 650-663. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.04.008>
- Zhang, S., Gan, J., Lv, J., Shen, C., Xu, C., & Li, F. (2024). Environmental impacts of carbon fiber production and decarbonization performance in wind turbine blades. *Journal of Environmental Management*, 351, 119893. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119893>
- Zhu, J., Li, W., Mu, K., Zhang, X., & Zhao, X. (2025). An automatic arrival time picking algorithm of ultrasonic waves for concrete crack depth detection. *Engineering Structures*, 328, 119729. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.119729>

Bijlagen

Bijlage A: RWZI processchema in Hengelo



Bijlage B: Invloed factoren rondom de slibgisting



Bijlage C: De vragen voor de expertinterviews

C.1 - Expertinterview 'Legen van de vergistingsbollen' vragen

In deze paragraaf wordt het expertinterview weergegeven van Henk Diever. Deze was betrokken bij het legen van de vergistingsbollen namens ABV Haukens.

1 Algemeen | functie & betrokkenheid

1. Wie bent u?

Expert 1 (Wilde niet mijn zijn naam in het onderzoek)

2. Wat is uw functie binnen het Waterschap Vechtstromen of elders?

Uitvoerend projectleider

3. Wat zijn uw werkzaamheden binnen deze functie?

Een uitvoerend projectleider is verantwoordelijk voor de verschillende uitvoerende klussen die moeten gebeuren tijdens een klus. Denk hierbij vooral aan het op tijd aanleveren van de klus, financiën van het project en de kwaliteit van het geleverde werk.

2 Plan van aanpak

1. Hoe verloopt het leegloopingsproces van de vergistingsbol?

a. Wat is de huidige handelwijze voor het legen van de vergistingsbollen?

Het grote verschil in het reinigen van een vergister, zit in het inertiseren. Daar zit ook meteen ook een groot deel van de duur van het uit bedrijf stellen. Veelal wordt de tank geopend en wordt middels natuurlijke ventilatie de tank inert gemaakt en dat duurt soms best lang. Wij doen dit met stikstof en/of met water, door hiermee de temperatuur snel omlaag te brengen is de duur van inertisering korter. Dan moet de tank nog leeg voor zover als mogelijk, meestal doet de opdrachtgever dat al voor een groot deel zelf. Maar ook wij kunnen het rest slib verwerken op locatie middels een centrifuge en slibscheiding installatie. Wil men geen centrifuge, en kan men het slib/water op de zuivering verwerken, is alleen een scheiding installatie voldoende. Van de scheiding komen drie afvalstromen, zand, roostergoed en water/slib, dit laatste kan dan naar wens over een centrifuge om het slib in te drogen. De verschillende afvalstromen worden in containers opgevangen. Als het slib in de tank zover gedaald is dat betreden mogelijk is, dan gebruiken wij ademlucht met open communicatie om de reiniging in de tank te voltooien. Uiteraard doen wij dit met gecertificeerde mensen die er voor zijn opgeleid om besloten ruimtes te betreden.

b. Welke materialen worden er gebruikt voor het legen van de vergistingsbollen, denk hier bijvoorbeeld aan machines of apparatuur?

Over het algemeen heeft men gewoon de standaard apparatuur en machines nodig om een vergistingsbol te legen. Voorbeelden hiervan zijn zuurstofmeters, zodat wij weten wanneer het niet meer verantwoord is om de vergistingstank te betreden of ademluchtapparatuur, zoals hierboven ook al genoemd is, indien dit nodig is.

Anders voorbeelden zijn de apparaten waardoor wij ervoor kunnen zorgen dat de druk niet ontsnapt in de vergisters of gasregelkleppen, zodat het inerte gas veilig de vergisters in geleid kunnen worden.

2. Hoelang duurt het legen van de vergistingsbollen?

Wist hij op dit moment geen antwoord op.

a. *Waarom duurt het zo lang of kort voor het legen van de vergistingsbollen, welke stappen nemen de tijd in beslag?*

Het duurt een tijdje om de vergisters inert te maken aangezien het toebrengen van stikstof in de gistingstank niet volledig effectief is, waardoor er meerdere cyclussen nodig zijn voor het spoelen en het ventileren van de tank.

3 Veiligheid

1. *Welke ATEX-richtlijnen zijn van belang bij het legen van de vergistingsbollen?*

Vooraf ATEX 115 & ATEX 153 zijn belangrijk aangezien alles zo veilig mogelijk in werking gezet moet worden.

a. *Wat omschrijven deze ATEX-richtlijnen die hierboven zijn genoemd?*

ATEX 115 is bedoeld voor het keuren van de apparatuur die wordt gebruikt in explosieve gebieden.

ATEX 153 is bedoeld om de explosiegevaarlijke omgevingen te beschermen tegen eventuele gevaren waardoor er explosies kunnen ontstaan.

b. *Waarom zijn deze ATEX-richtlijnen van belang voor het legen van de vergistingsbollen, wat kunnen anders de gevolgen zijn?*

Deze richtlijnen zijn geen formaliteit, maar een integraal onderdeel van onze aanpak. Ze zorgen ervoor dat wij veilig kunnen werken en dat onze opdrachtgevers erop kunnen vertrouwen dat hun installaties professioneel en zonder risico's worden gereinigd.

2. *Zijn er meer/andere veiligheidsregels dan ATEX die van toepassing zijn op het legen van de vergistingsbollen?*

a. *Zo ja, welke zijn dat en wat houden ze in?*

Veiligheid, gezondheid & milieu plan (VGM-plan), Taak Risico Analyse (TRA) & werkvergunning zijn standaard bij deze werkzaamheden.

b. *Waarom zijn deze veiligheidsregels van belang voor het legen van de vergistingsbollen, wat kunnen de gevolgen anders zijn?*

Wanneer we een project beginnen, worden alle risico's die gepaard gaan met het werk in detail geïnventariseerd, dit is het VGM-plan. Het doel is altijd om een veilige werkomgeving te creëren voor onze medewerkers en de omgeving. Een VGM-plan is daarbij het fundament waarop we alles baseren, omdat het duidelijk maakt hoe we deze risico's effectief kunnen beheersen en waar mogelijk voorkomen. Er zijn risico's aanwezig zoals giftige gassen of explosiegevaar vooral wanneer wij een besloten ruimte betreden. Het VGM-plan maakt het mogelijk om deze risico's goed te begrijpen en voor iedereen duidelijk te maken welke maatregelen er genomen moeten worden om alles zo veilig mogelijk te laten werken.

Een TRA zorgt ervoor dat wij goed begrijpen wat de gevaren zijn van de werkzaamheden die wij gaan uitvoeren bij de desbetreffend werkgever. Dit voorkomt dat er onvoorziene situaties ontstaan en maakt het mogelijk om risico's te verminderen voordat ze zich voordoen. Bijvoorbeeld, wanneer wij een vergister reinigen, is het belangrijk om te weten of er gevaarlijke gassen aanwezig kunnen zijn of dat er explosiegevaar aanwezig kan zijn. De TRA helpt ons om te bepalen welke veiligheidsmaatregelen nodig zijn, zoals het gebruik van ademlucht, het inertiseren van de tank of het inschakelen van gespecialiseerde apparatuur. Het is een soort checklist die garandeert dat alle aspecten van de taak goed zijn doordacht en er geen belangrijke veiligheidsmaatregelen over het hoofd worden gezien.

4 Criteria

1. Wat zijn de belangrijkste criteria die in het achterhoofd gehouden moeten worden tijdens het legen van de vergistingsbollen? (Denk hierbij bijvoorbeeld aan veiligheid etc.)

Zoals jezelf al noemt is veiligheid voor ons een belangrijke criteria. Een ander belangrijke criteria is dat alles zo snel mogelijk gebeurt, maar dat het ook veilig en milieuvriendelijk gebeurt.

a. Waarom zijn juist deze criteria zo belangrijk tijdens het legen van de vergistingsbollen?

Veiligheid is belangrijk, omdat het anders niet mogelijk voor ons is om ons werk te doen. Tevens kunnen wij dan onze werknemers ook niet garanderen dat het werk zonder risico's is. De snelheid van de leging is belangrijk voor ons, zodat we aan de klant kunnen garanderen dat de leging zo snel mogelijk gebeurt. Aan de andere kant zitten wij natuurlijk ook gewoon vast aan een bepaalde snelheid van het inertiseren van de vergister, maar de overige taken proberen wij zo snel en optimaal mogelijk uit te voeren.

5 Overig

1. Wat zijn de voor- en nadelen van de huidige handelwijze van legen van de vergistingsbollen?

De voordelen van het inert maken van een vergister door middel van stikstof is dat het makkelijk toepasbaar is op de meeste gevallen. Dit komt omdat stikstof niet reageert met veel verschillende stoffen, waardoor het makkelijk kan worden toegepast in verschillende scenario's. Tevens kan stikstof het zuurstofniveau in de vergister ook snel verlagen in vergelijking met andere inerte stoffen.

Behalve stikstof wordt er ook gebruik gemaakt van water. Het inertiseren aan de hand van water is makkelijk, aangezien water makkelijk verkrijgbaar is en dus niet veel geld kost om het te gebruiken.

2. Heb jij zelf nog toevoeging wat ik moet weten over het legen van de vergistingsbollen?

Op dit moment niet, maar als je meer vragen hierover hebt dan hoor ik dat graag.

C.2 - Expertinterview 'Inspectie van de vergistingsbollen' vragen

In deze paragraaf wordt het expertinterview weergegeven van Roel Vink. Deze was betrokken bij de inspectie van de vergistingsbollen.

1 Algemeen | functie & betrokkenheid

1. **Wie bent u?**

Roel Vink

2. **Wat is uw functie binnen het Waterschap Vechtstromen of elders?**

Op dit moment ben ik werkzaam bij Haukes, dit is een bedrijf die gespecialiseerd zijn in inspecties en metingen met betrekking tot het bodemgebruik en hier ben ik zelf dan inspecteur.

3. **Wat zijn uw werkzaamheden binnen deze functie?**

Het inspecteren van bodembeschermende voorzieningen, geo-elektrische metingen en hydrologische metingen.

2 Plan van aanpak

1. **Wat is de handelwijze dat wordt uitgevoerd bij een inspectie van een vergistingsbol?**

a. **Hoe wordt de inspectie van een vergistingsbol stap voor stap uitgevoerd?**

Wij voeren inspecties uit op vloeistofdichtheid, hierbij wordt gebruikt gemaakt van AS 6700 en de hierbij behorende protocollen. Protocol 6701 is voor visuele inspecties, Protocol 6702 voor geo-elektrisch meten, Protocol 6703 voor hydrologisch meten.

Deze protocollen zijn te downloaden bij de site van SIKB, onder richtlijnen en protocollen 6700. Welk protocol wordt gekozen voor een bepaalde situatie, is afhankelijk van verschillende factoren: Grootte (bijvoorbeeld een inspectie volgens protocol 6703 wordt door ons uitgevoerd tot een grootte van 40 m², dit heeft te maken met de meetnauwkeurigheid die behaald moet worden bij grotere oppervlaktes) Of een voorziening toch voor onderhoud al moet worden leeggemaakt. Mogelijk kan een voorziening niet of met veel extra geregel (denk aan bronbemaling) leeg worden gemaakt vanwege opdrijven.

Vervolgens wordt er met behulp van een steiger de binnenkant van de installatie bekeken aan de hand van een inspectielijst.

2. **Hoelang duurt het gemiddeld voordat een inspectie van de vergistingsbol is afgerond?**

De tijdsbesteding is afhankelijk welk protocol er gebruikt wordt, welke materiaaltoepassing, grootte van de voorziening en welke veiligheidsvoorzieningen moeten er worden getroffen voor de inspectie.

3 Testen

1. **Waar kijkt men tijdens het inspecteren van een vergistingsbol naar?**

Er wordt vooral gekeken naar scheuren, breuken en andere omstandigheden die eruit springen. Hiervoor kan je in de inspectielijst kijken.

a. **Waarom wordt er vooral gekeken naar het hierboven genoemde gekeken?**

De scheuren en breuken worden vooral nagekeken om ervoor te zorgen dat de veiligheid van zowel de omgeving als de installatie zelf worden gewaarborgd. Het kan namelijk niet zo zijn dat de installatie vanwege defecten een onveilige situatie creëert.

Er wordt hier ook eens in de zoveel tijd naar gekeken om de verdere schade te verminderen. Tevens zorgt verdere schade er ook voor dat de kosten voor het repareren van de installatie meer is.

Tot slot wordt er naar deze omstandigheden gekeken, omdat dit wettelijk verplicht is om eens in de zoveel jaar een installatie te laten controleren op deze omstandigheden.

4 Veiligheid

1. Zitten er nog veiligheidsvoorwaarden aan de inspecties, voordat deze kan beginnen.

a. Zo ja, welke veiligheidsvoorwaarden zijn dit?

Enkele gevaren die kunnen optreden bij het inspecteren van besloten ruimtes, waaronder de vergistingsbollen vallen, zijn bedwelming of vergiftiging, verstikking, stofexplosies en brand of een explosie.

Daarnaast zijn er ook nog andere gevaren die te maken hebben met de aard en de vorm van de ruimte of het karakter van uit te voeren werkzaamheden, denk hierbij aan:

Bewegende delen, beperkte bewegingsruimte, beperkte hoeveelheid licht, elektrocutie, biologische agentia, hitte, infectie, statische elektriciteit in combinatie met explosiegevaar en vallen, uitglijden en vallende voorwerpen. Sommige van deze zijn niet van toepassing op jouw onderzoek en andere kunnen wel van toepassing zijn, dat moet je zelf maar even kijken.

Ik zal jou nog wel de toolbox opsturen waar in staat wat precies de voorwaarden zijn voor het veilig inspecteren van tanks/silo's en wat de gevaren hiervan kunnen zijn. Maar de dingen die ik net zei zijn wel een beetje de standaard gevaren waar men voor moet oppassen.

5 Criteria

1. Wat zijn de belangrijkste criteria die in het achterhoofd moeten worden gehouden tijdens het inspecteren van de vergistingsbollen? (Denk hierbij bijvoorbeeld aan veiligheid etc.)

Ten eerste vinden wij veiligheid van zowel de omgeving als onze werknemers belangrijk. Het mag niet zo zijn dat er mensen een onveilige situatie gaan betreden, dan nemen wij liever wat langer de tijd.

Ook zijn wij van mening dat het milieu een belangrijke criteria kan zijn in jouw onderzoek. Dat is ook een van de redenen waarom wij deze inspecties juist uitvoeren.

6 Overig

1. Heb jij zelf nog toevoeging wat ik moet weten over de inspectie van de vergistingsbollen?

Ik zal jou nog een paar documenten opsturen die jou denk ik wel kunnen helpen bij jou onderzoek. Zoals ik al eerder zei krijg jij die toolbox van mij waarin de gevaren staan waarvoor je moet oppassen in een besloten ruimte en nog een paar andere documenten die misschien van pas kunnen komen.

Bijlage D: Inspectielijst

Controlelijst bedrijfsinterne controle

Rioolwaterzuivering Hengelo, Wegtersweg 17 te Hengelo ov

Voorziening:		Slibgistingstank 3	Einde keuringstermijn: 7 april 2023		
Controle uitgevoerd door:			Datum controle:		
Registratienummer SIKB:		HA17.7556BP.63634-1.23	Resultaat	Herstelmaatregelen	
Nr.	Controlepunt		Ja/nee	Actie	Gereed
1. OPPERVLAK					
1.1	Is in het oppervlak vloeistof ingedrongen? Is de omvang van de vlekken sinds de vorige controle wezenlijk toegenomen?				
1.2	Zijn in het oppervlak vervormingen aanwezig?				
1.3	Is het oppervlak gescheurd?				
1.4	Zijn in het oppervlak mechanische beschadigingen aanwezig?				
1.5	Is het oppervlak aangetast door chemische invloeden?				
1.6	Bevinden zich losse delen in het oppervlak?				
2. AFDICHTINGEN					
2.1	Ontbreken afdichtingen in de vloer/verharding/wand?				
2.2	Ontbreken afdichtingen op verticale aansluitingen?				
2.3	Zijn de afdichtingen aangetast door chemische invloeden?				
2.4	Hebben de afdichtingen losgelaten?				
2.5	Zijn de afdichtingen mechanisch beschadigd?				
2.6	Is ter plaatse van afdichtingen craquelé of scheurvorming aanwezig?				
3. AFWATERING (indien van toepassing)					
3.1	Vertonen de afwateringspunten gebreken?				
3.2	Kunnen vloeistoffen van de voorziening aflopen?				
4. BEDRIJFSRIOLERING (indien van toepassing)					
4.1	Zijn verzakkingen zichtbaar?				
4.2	Zijn de afvoeren verstopt/blijft water in de kolken en/of goten staan?				
4.3	Stroomt water uit de afvoeren over de voorziening?				
4.4	Is de afscheidingsinstallatie schoon, niet beschadigd en werkt de vlotter?				
5. ALGEMENE INDRUK					
5.1	Geeft het totaalbeeld aanleiding tot nader onderzoek?				
5.2	Zijn de gedragsvoorschriften zichtbaar aanwezig?				
5.3	Is het gebruik of de belasting van de voorziening gewijzigd?				
6. BIJZONDERHEDEN					

Bijlage E: Herstelmaatregelen vloeistofdichte voorzieningen

Aspect uit protocol of CUR/PBV	Bevinding	Voorbeeld gerapporteerd professionele mening	Uitvoeringsmethode	Verwijzing naar stand van de techniek
Scheuren en/of breuken				
Scheuren en breuken: Bewegend	<p>Scheuren en/of breuken in voorziening waargenomen:</p> <ul style="list-style-type: none"> Die over de gehele hoogte (dikte) doorlopen <p>of</p> <ul style="list-style-type: none"> waarvan niet is vastgesteld of deze over de gehele hoogte (dikte) doorlopen. <p>De scheuren en/of breuken zijn bewegend.</p>	<p>Scheuren en/of breuken dienen vloeistofdicht te worden hersteld.</p> <p>Indien door nader onderzoek of een andere inspectietechniek (geo-elektrische meting, luchttest) wordt aangetoond, dat de voorziening ter plaatse van scheuren en/of breuken vloeistofdicht is, wordt de tekortkoming als onvolkomenheid gekwalificeerd en kan herstel achterwege blijven.</p> <p>Nader onderzoek kan bestaan uit het boren en beoordelen van cilinders.</p>	<p>Bewegende scheuren en/of breuken zodanig herstellen dat deze de beweging kunnen opvangen. Hiervoor komen kitvoegen en brugvoegen in aanmerking.</p> <p>Omschrijving:</p> <ul style="list-style-type: none"> Aanbrengen van een voegband over de scheur of breuk; <p>of</p> <ul style="list-style-type: none"> Creëren van een voeg met voldoende breedte en diepte ter plaatse van de scheur of breuk; Vullen van ontstane voeg met geschikte (elastische) voegvullingsmassa. <p>Alle materialen verwerken volgens voorschriften van producten/leverancier</p>	<p>CUR/PBV-Aanbeveling 65: art. 7.3.2, art 4.6.4 figuur 3 en 4, met uitzondering van detail 2, art 6.6 en art 8.2</p>
Scheuren en breuken: Niet bewegend	<p>Scheuren en/of breuken in voorziening waargenomen:</p> <ul style="list-style-type: none"> Die over de gehele hoogte (dikte) doorlopen <p>of</p> <ul style="list-style-type: none"> waarvan niet is vastgesteld of deze over de gehele hoogte (dikte) doorlopen. <p>De scheuren en/of breuken zijn niet bewegend.</p>	<p>Scheuren en/of breuken dienen vloeistofdicht te worden hersteld.</p> <p>Indien door nader onderzoek of een andere inspectietechniek (geo-elektrische meting, luchttest) wordt aangetoond, dat de voorziening ter plaatse van scheuren en/of breuken vloeistofdicht is, wordt de tekortkoming als onvolkomenheid gekwalificeerd en kan herstel achterwege blijven.</p> <p>Nader onderzoek kan bestaan uit het boren en beoordelen van cilinders.</p>	<p>Niet bewegende scheuren en/of breuken herstellen.</p> <p>Omschrijving:</p> <ul style="list-style-type: none"> Aanbrengen van een voegband over de breuk of scheur; <p>of</p> <ul style="list-style-type: none"> Creëren van een v-vormige naad tot een breedte van ten minste 4 mm en deze afdichten met cementgebonden of kunstharsgebonden reparatiemortel. Vullen van v-vormige naad met geschikte voegvullingsmassa. <p>Alle materialen verwerken volgens voorschriften van producten/leverancier.</p>	<p>CUR/PBV-Aanbeveling 65: art.7.3.1, art 4.6.4 figuur 3, detail 2. CUR-Aanbeveling 118.</p>

Scheuren en/of breuken (2)				
Gebroken elementen	<p>Gebroken prefab elementen waargenomen.</p> <p>Opmerking: bedrijfsvloerplaten en grootformaat tegels zijn grote elementen. Overige zijn kleine elementen.</p>	De prefab elementenverharding dient vloeistof dicht te worden hersteld.	<p>Verharding vloeistof dicht herstellen.</p> <p>Omschrijving:</p> <ul style="list-style-type: none"> Grote elementen herstellen als beschreven bij scheuren en naden – Bewegend. <p>Of:</p> <ul style="list-style-type: none"> Grote elementen vervangen. <p>Of</p> <ul style="list-style-type: none"> Kleine elementen vervangen; <p>En voegafdichtingen herstellen door:</p> <ul style="list-style-type: none"> Creëren van voegen tussen de elementen; Vullen van de voegen met geschikte voegvullingsmassa. <p>Alle materialen verwerken volgens voorschriften van producten/leverancier.</p>	<p>CUR/PBV-Aanbeveling 65: art. 7.1., 7.2, 7.4 en 7.6</p> <p>CUR/PBV-Rapport 196, paragraaf 8.8.</p> <p>CUR/PBV-Aanbeveling 65: art. 6.6 en 4.6.4 figuur 3 detail 3 t/m 6 en figuur 5.</p>
Afgesprongen randen en/of beschadigingen	<p>Beschadigingen brengen vloeistof dichtheid in gevaar.</p> <p>De tekortkoming(en) is (zijn) als gebrek gekwalificeerd.</p>	De afgesprongen randen en/of beschadigingen dienen te worden hersteld.	<p>De beschadigingen herstellen.</p> <p>Omschrijving:</p> <ul style="list-style-type: none"> Afgesprongen randen, losse delen en/of andere beschadigingen saneren tot op onbeschadigde ondergrond; Herstellen van de voorziening met <ul style="list-style-type: none"> Cementgebonden reparatiemortel of Kunstharsgebonden reparatiemortel Voegvullingsmassa Bij te overbruggen (bewegende) scheuren gebruik maken van blijvend elastische materialen. <p>Alle materialen verwerken volgens voorschriften van producten/leverancier.</p>	<p>CUR/PBV-Aanbeveling 65: art. 7.1, 7.2, 7.4, 7.5, en 7.7.</p> <p>CUR-PBV-Aanbeveling 64. CUR-Aanbeveling 118.</p>

Aantasting				
Aantasting	<p>De voorziening is zodanig aangetast dat de vloeistofdichtheid in gevaar is.</p> <p>De tekortkoming is als gebrek gekwalificeerd.</p>	De voorziening dient ter plaatse van de aantasting vloeistofdicht te worden gemaakt.	<p>Opheffen aantasting herstellen oppervlak.</p> <p>Omschrijving:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verwijderen aangetaste delen van de voorziening. <p>Of:</p> <ul style="list-style-type: none"> • De aantasting zodanig chemisch binden met bijvoorbeeld een impregneer, dat deze zich niet verder kan verspreiden. <p>En:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ter plaatse van verwijderde delen of gebonden aantasting de oppervlakken zo nodig in de oorspronkelijke vorm terugbrengen. • De voorziening voorzien van een kunstharsgebonden bescherm laag ter voorkoming van nieuwe aantasting. • Alle materialen verwerken volgens voorschriften van producten/leverancier. 	<p>CUR/PBV-Aanbeveling 65: art. 7.1, 7.2, 7.5 en 7.8.</p> <p>CUR-PBV-Aanbeveling 64. CUR-Aanbeveling 118.</p>

Indringing verontreinigingen				
Indringing: Twijfel	In de voorziening zijn vlekken waargenomen. Er bestaat twijfel aan de indringdiepte, waardoor het niet duidelijk is of het een gebrek is of dat het een volkomenheid betreft.	Ter plaatse van de indringing moet worden vastgesteld of de vloeistoffen de niet belaste zijde hebben bereikt. Zolang dit niet is vastgesteld, kan de tekortkoming als een gebrek worden gekwalificeerd en dient de voorziening vloeistofdicht te worden hersteld. Zo wordt voorkomen dat de indringing toeneemt. Om duidelijk te maken hoe diep de vloeistoffen in de constructie zijn gedrongen, kan nader onderzoek worden gedaan zoals is omschreven in 4.2 van Protocol 6701.	Herstellen van de voorziening. Omschrijving voor betonvloeren en -verhardingen: <ul style="list-style-type: none"> • Zo nodig het oppervlak reinigen en voorzien van een kunsthars gebonden beschermlaag om verdere verspreiding van de ingedrongen vloeistof te voorkomen. <p>Alle materialen verwerken volgens voorschriften van producten/leverancier.</p>	CUR-PBV-Aanbeveling 64.
Indringing: Tot en met niet belaste zijde	In de voorziening zijn vlekken waargenomen. Het is aannemelijk dat de vloeistoffen de niet belaste zijde hebben bereikt. De tekortkoming is als gebrek gekwalificeerd.	Uittreden en verdere verspreiding van de vloeistof moet worden voorkomen, door de oppervlakken ter plaatse van de vlekken vloeistofdicht te herstellen.	Reinigen van de voorziening. Zo nodig verwijderen of saneren van de delen met ingedrongen vloeistof en de voorziening herstellen en voorzien van beschermlaag. Omschrijving: <ul style="list-style-type: none"> • Verwijderen van delen met ingedrongen vloeistof. <p>Of</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zodanig reinigen van de oppervlakken dat voldoende potentiële hechtsterkte is bereikt voor optimale aanhechting van reparatiematerialen en conserveringsmiddelen. • Herstellen van de voorziening in de oorspronkelijke vorm met behulp van een kunsthars gebonden beschermlaag. <p>Alle materialen verwerken volgens voorschriften van producent/leverancier.</p>	CUR/PBV-Aanbeveling 65 art. 7.1, 7.2, 7.5 en 7.8. CUR/PBV-Aanbeveling 64.

Bewegende elementen				
Bewegende elementen	<p>Er zijn bewegende elementen waargenomen. Het is niet duidelijk of de vloeistofdichtheid in gevaar is;</p> <p>Of</p> <p>Het is duidelijk dat de vloeistofdichtheid in gevaar is.</p> <p>De tekortkoming is als gebrek gekwalificeerd</p>	<p>Bewegende elementen dienen te worden gestabiliseerd, opnieuw te worden aangebracht of te worden vervangen.</p>	<p>Bewegende elementen zo herstellen dat geen sprake van beweging meer is.</p> <p>Omschrijving:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Injecteren holle ruimten onder de elementen; <p>Of</p> <ul style="list-style-type: none"> • Opnemen bewegende elementen; <p>En</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zo nodig vervangen van de opgenomen elementen; • Vormvast en stabiel elementen inbrengen; • Herstellen aansluitingen van elementen op de directe omgeving met behulp van: <ul style="list-style-type: none"> • Creëren van voegen; • Vullen van voegen met voegvullingsmassa. <p>Alle materialen verwerken volgens voorschriften van producten/leverancier.</p>	<p>CUR/PBV-Aanbeveling 65: art. 71., 7.2, 7.6, 4.6.4 figuur 4, art. 6.6 en art. 8.2.</p>

Doorvoeren				
Naad of scheur tussen doorvoer en voorziening	Rondom doorvoer is een opening, naad of scheur waargenomen	Doorvoeren dienen vloeistofdicht te worden gemaakt.	<p>Afdichtingen aanbrengen.</p> <p>Omschrijving:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zo nodig beschadigde voegvulling verwijderen. • Af te dichten ruimte reinigen. • Aanbrengen voegvullingsmassa <p>Alle materialen verwerken volgens voorschriften van producent/leverancier.</p>	CUR/PBV-Aanbeveling 65 art. 7.7 en 6.6 en 4.6.4 figuur 1, G1 en 2 of figuur 7.
Afdichtingen doorvoeren aangetast	Rondom doorvoer is de afdichting aangetast, niet intact/niet vloeistofdicht.	Doorvoeren dienen vloeistofdicht te worden hersteld.	<p>Afdichtingen herstellen</p> <p>Omschrijving:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aangetaste afdichtingen verwijderen. • Af te dichten ruimte reinigen. • Aanbrengen voegvullingsmassa. <p>Of:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Andere afdichting aanbrengen, die gelijk is aan de aangetroffen afdichting. <p>Alle materialen verwerken volgens voorschriften van producent/leverancier.</p>	CUR-PBV-Aanbeveling 65 art. 7.7 en 6.6 en 4.6.4 figuur 1, G1 en 2 of figuur 7.
Naad of scheur tussen kabel of leiding en mantelbuis	Doorvoeren staan aan bovenzijde open of er bevindt zich een naad of scheur in de afdichting tussen kabel/leiding en voorziening/mantelbuis.	Doorvoeren dienen vloeistofdicht te worden hersteld.	<p>Afdichting tussen leiding of kabel en mantelbuis afdichten.</p> <p>Omschrijving:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zo nodig beschadigde afdichtingen verwijderen. • Af te dichten ruimte reinigen. • Aanbrengen voegvullingsmassa. <p>Of:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Andere afdichting aanbrengen, die gelijk is aan de aangetroffen afdichting. <p>Alle materialen verwerken volgens voorschriften van producten/leverancier</p>	CUR-PBV-Aanbeveling 65 art. 7.7 en 6.6 en 4.6.4 figuur 1, G1 en 2 of figuur 7.

Bevestigingspunten				
Boorgaten voor bevestigingspunten zijn dieper dan toegestaan	Boorgaten voor de bevestigingen zijn dieper dan ½ van de vloerdikte	Bevestigingen dienen vloeistofdicht te worden afgedicht.	<p>Bevestigingen afdichten.</p> <p>Omschrijving:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bevestigingen en directe omgeving reinigen. • Rondom de bevestigingen voegvullingsmassa in driehoekige vorm aanbrengen. <p>Alle materialen verwerken volgens voorschriften van producent/leverancier.</p>	CUR/PBV-Aanbeveling 65 art. 7.7 en 4.6.4 figuur 8 detail 12s.
Bevestigingspunten en/of boorgaten vertonen openingen of	Boorgaten zijn niet afgedicht	Boorgaten dienen vloeistofdicht te worden afgedicht.	<p>Boorgaten afdichten.</p> <p>Omschrijving:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reinigen boorgaten. • Boorgaten afdichten met cement- of kunsthars gebonden mortel of voegvullingsmassa <p>Alle materialen verwerken volgens voorschriften van producent/leverancier.</p>	CUR-PBV-Aanbeveling 65 art. 7.1, 7.2, 7.4 en 7.7 en 4.6.4 figuur 3 detail 2 of 3.
Bevestigingspunten niet vloeistofdicht door (slob)gaten in voetplaten gevoerd	Slobgaten zijn niet of onvoldoende afgedicht	Slobgaten dienen vloeistofdicht op de bevestigingspunten te worden aangesloten.	<p>Slobgaten afdichten.</p> <p>Omschrijving:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reinigen slobgaten; • Slobgaten afdichten met elastische kunsthars gebonden mortel of voegvullingsmassa. <p>Alle materialen verwerken volgens voorschriften van producent/leverancier.</p>	CUR-PBV-Aanbeveling 65 art. 7.1, 7.2, 7.4 en 7.7 en 4.6.4 figuur 3 detail 2 of 3.

Bevestigingspunten (2)				
Bevestigingspunten niet vloeiëtdicht door (slob)gaten in	Slobgaten zijn niet of onvoldoende afgedicht	Slobgaten dienen vloeiëtdicht op de bevestigingspunten te worden aangesloten.	<p>Slobgaten afdichten.</p> <p>Omschrijving:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reinigen slobgaten. • Slobgaten afdichten met elastische kunsthars gebonden mortel of voegvullingsmassa. <p>Alle materialen verwerken volgens voorschriften van producten/leverancier.</p>	CUR-PBV-Aanbeveling 65 art. 7.1, 7.2 en 7.7 en 4.6.4 figuur 3 detail 2 of 3.
Voetplaten niet vloeiëtdicht op ondergrond aangesloten	Voetplaten zijn niet vloeiëtdicht aangesloten op bevestigingspunten en/of de ondergrond	Voetplaten dienen vloeiëtdicht te worden aangesloten op de bevestigingspunten en de ondergrond.	<p>Voetplaten vloeiëtdicht aansluiten op de ondergrond.</p> <p>Omschrijving:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reinigen voetplaten en directe omgeving. • Voetplaten afdichten door rondom voegvullingsmassa in de vorm van een driehoek aan te brengen. <p>Of:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aanbrengen van afdichting (pakking of membraan) tussen voetplaten en ondergrond. <p>Alle materialen verwerken volgens voorschriften van producent/leverancier.</p>	CUR-PBV-Aanbeveling 65 art. 7.1, 7.2 en 7.7 en 4.6.4 figuur 7 detail 9.
Afdichtingen van bevestigingspunten niet losgelaten en/of beschadigd	Afdichtingen zijn losgelaten	De losgelaten afdichtingen dienen vloeiëtdicht te worden vervangen.	<p>Losgelaten afdichtingen vervangen.</p> <p>Omschrijving:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Losgelaten afdichtingen verwijderen. • Af te dichten bevestigingen reinigen. • Aanbrengen voegvullingsmassa. <p>Alle materialen verwerken volgens voorschriften van producent/leverancier.</p>	CUR-PBV-Aanbeveling 65 art. 7.1, 7.2 en 7.7 en 4.6.4 figuur 7 detail 9 of figuur 8 detail 12s.

Voegafdichtingen				
Voegafdichtingen over hele hoogte losgelaten	Over de gehele hoogte van de voegafdichting in hechttingsverlies waargenomen.	De losgelaten voegafdichtingen dienen te worden vervangen.	<p>Voegafdichtingen ter plaatse van hechttingsverlies vervangen.</p> <p>Omschrijving:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verwijderen losgelaten voegafdichting. • Reinigen en voorbehandelen ondergrond. • Aanbrengen voegafdichtingen en deze vloeistofdicht aansluiten op de achtergebleven voegvullingen die nog intact waren. <p>Of:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aanbrengen brugvoeg. <p>Alle materialen verwerken volgens voorschriften van producent/leverancier.</p>	CUR/PBV-Aanbeveling 64 art. 7.7 en 6.6 en 4.6.4 figuur 3, detail 3 t/m 6 of figuur 4.
Voegafdichtingen over hele hoogte gescheurd/beschadigd	De voegafdichting(en) zijn over gehele hoogte gescheurd of beschadigd.	De beschadigde/gescheurde voegafdichtingen dienen te worden vervangen.	<p>Voegafdichtingen ter plaatse van beschadigingen en/of scheuren vervangen.</p> <p>Omschrijving:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verwijderen beschadigde/gescheurde voegafdichtingen. • Reinigen en voorbehandelen ondergrond. • Aanbrengen voegafdichtingen en deze vloeistofdicht aansluiten op de achtergebleven voegvullingen die nog intact waren. <p>Of:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aanbrengen brugvoeg. <p>Alle materialen verwerken volgens voorschriften van producent/leverancier.</p>	CUR-PBV-Aanbeveling 65 art. 7.7 en 6.6 en 4.6.4 figuur 3, detail 3 t/m 6 of figuur 4.

Voegafdichtingen over hele hoogte aangetast/verweekt	Voegafdichting(en) over gehele hoogte aangetast/verweekt.	De aangetaste voegafdichtingen dienen te worden vervangen. Als door nader onderzoek of een andere inspectietechniek (geo-elektrische meting, luchttest) wordt aangetoond dat de voorziening op dit punt vloeistofdicht is kan herstel achterwege blijven.	Voegafdichtingen ter plaatse van aantasting vervangen. Omschrijving: <ul style="list-style-type: none"> • Verwijderen aangetaste voegafdichtingen. • Reinigen en voorbehandelen ondergrond. • Aanbrengen voegafdichtingen en deze vloeistofdicht aansluiten op de achtergebleven voegvullingen die nog intact waren. Of: <ul style="list-style-type: none"> • Aanbrengen brugvoeg. Alle materialen verwerken volgens voorschriften van producent/leverancier.	CUR-PBV-Aanbeveling 65 art. 7.7 en 6.6 en 4.6.4 figuur 3, detail 3 t/m 6 of figuur 4.
	Lassen, (stort-)naden en aansluitingen			
Lassen en (stort-)naden	Overgangen en naden tussen delen van de voorziening; Of: Overgangen en stortnaden tussen verschillende storten of batches; Of: Lassen en naden tussen delen van de voorziening en/of in afdichtingen zijn niet vloeistofdicht afgewerkt. Ter plaatse van de overgangen, lassen en/of (stort-) naden is hechtingsverlies van de	De afdichtingen van de lassen en (stort-) naden dienen vloeistofdicht te worden hersteld.	Lassen en (stort-) naden vloeistofdicht maken. Omschrijving: <ul style="list-style-type: none"> • Creëren van een voeg ter plaatse van de naad of las. • Reinigen en voorbehandelen ondergrond. • Aanbrengen voegafdichtingen en deze vloeistofdicht aansluiten op de achtergebleven voegvullingen die nog intact waren. Of: <ul style="list-style-type: none"> • Aanbrengen brugvoeg Alle materialen verwerken volgens voorschriften van producent/leverancier.	CUR-PBV/Aanbeveling 65 art. 7.7 en 6.6 en 4.6.4 figuur 3, detail 3 t/m 6 of figuur 4.

Aansluitingen	<p>De aansluitingen van de vloer of verharding tegen vaste (bouw)delen op of in de voorziening zijn niet vloeistofdicht. Het betreft goten, installaties, lijnafwateringen, luiken, putten, voegen in en beëindigingen van vloeren en verhardingen (hoekstraal e.d.).</p>	<p>De aansluitingen van de voorziening op de vaste (bouw)delen in de vloer of verharding dienen vloeistofdicht te worden gemaakt.</p> <p>Als door nader onderzoek of een andere inspectietechniek (geo-elektrische meting, luchttest) wordt aangetoond dat de voorziening op dit punt vloeistofdicht is kan herstel achterwege blijven.</p>	<p>Aansluitingen van de vloer of verharding op de onderdelen in de vloer of verharding vloeistofdicht maken.</p> <p>Omschrijving:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Creëren van een voeg ter plaatse van de naad of las. • Reinigen en voorbehandelen ondergrond. • Aanbrengen voegafdichtingen en deze vloeistofdicht aansluiten op de achtergebleven voegvullingen die nog intact waren. <p>Of:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aanbrengen brugvoeg <p>Alle materialen verwerken volgens voorschriften van producent/leverancier.</p>	<p>CUR-PBV/Aanbeveling 65 art. 7.7 en 6.6 en 4.6.4 figuur 3, detail 3 t/m 6 of figuur 4.</p>
----------------------	---	---	---	--

Bijlage F: LCA berekeningen

De LCA's die hier beneden worden berekend worden afgewogen aan de hand van drie verschillende factoren. De volgende factoren worden uitgewerkt; Langdurigheid van het alternatief, Energieverbruik van het alternatief en tot slot impact op het milieu. Waarbij de factor "impact op het milieu" weer wordt onderverdeeld in drie fases. Dit zijn de volgende fases: productiefase, gebruiksfase en recyclefase.

Steigers

Bij het opbouwen van de steiger wordt er vooral gebruik gemaakt van stalen steigers. Hierbij wordt de LCA voor de steigers dan ook vooral gedaan aan de hand van de stalen steigers in plaats van een ander materiaal. Volgens Laleicke et al. (2015) heeft een stalen steiger van een bepaalde grote een LCA van 300,11 kg/CO₂.

X12 laser scanner:

Beginnend bij het eerste alternatief, de laser scanner, deze heeft een garantie van 2 jaar, waarbij het ook beschermd wordt door IP54, wat weer betekent dat hij beschermd wordt tegen stof en waternevel. De batterijen waarop de laser scanner functioneert zijn de oplaadbare Li-Ion batterij 14,4 V en 16,8 Ah. Deze batterijen zijn goed voor een tijdsbestek van 2,5 uur per batterij en hebben een gewicht van 0,5 kg per batterij. De laser scanner heeft 2 jaar garantie en gaat sowieso 2 jaar meeg, waarbij 1 batterij 60 scans kan maken voordat die opnieuw opgeladen moet worden (Trimble, 2019).

De tweede factor waarop de laser scanner wordt afgerekend is energieverbruik. Hierbij kan de Watt per uur worden berekend aan de eerder gegeven gegevens. Door 14,4 V te vermenigvuldigen met 16,8 Ah kom je op 241,92 Watt per uur. Vervolgens deel je 241,92 Watt per uur door de capaciteit van 1 batterij (2,5 uur) en dat deel je dan weer door 1000, zodat je uiteindelijk op een energieverbruik van 0,10 kWh per uur uitkomt.

De laatste factor impact op het milieu zal worden onderverdeeld in drie fases. Beginnend bij de productiefase, hierbij wordt de emissie van de productie van de batterijen eerst berekend. Dit wordt gedaan aan de hand van de CO₂/kWh van de desbetreffende batterij, een lithium batterij, deze wordt gebruikt in de X12 laser scanner en heeft een uitstoot tussen de 60 – 106 CO₂/kWh (Andersson & Börjesson, 2021; Emilsson & Dahllöf, 2019). Sinds de X12 laser scanner gebruik maakt van 0,10 kWh komt dit neer op een productiefase tussen de 5,8 – 10,3 kg CO₂ voor 1 batterij.

Hier komt nog de uitstoot bij op van de productie van de X12 laser scanner. De X12 laser scanner bestaat veelal uit aluminium, staal en kunststof. Emissiefactoren zullen hier gebruikt worden om te achterhalen wat de uitstoot van de X12 laser scanner zal zijn. Hiervoor is er een product gekozen door de onderzoeker die het beste overweg komt met een laser scanner. Het product wat gekozen wordt is een gemiddelde laptop van hoge kwaliteit met een gemiddeld gewicht van 2,52 kg. Hierin zitten ongeveer dezelfde componenten als een X12 laser scanner, dit zijn voornamelijk elektronica, kunststof, aluminium en staal. Volgens Hoang et al. (2015) is de emissie van de maak van een laptop 71,15 kg CO₂ voor een laptop van 2,52 kg. Om dit te vertalen naar de X12 laser scanner zal de volgende vergelijking moeten worden opgelost, $(71,15 \text{ kg CO}_2 * 6,7 \text{ kg}) = (x * 2,52 \text{ kg})$ waarin x de emissie van de X12 laser scanner is. Hieruit komt dat de emissie van de X12 laser scanner gelijk staat aan 189,16 kg CO₂.

Voor de gebruiksfase wordt er gekeken naar de kWh wat het desbetreffende alternatief gebruikt, deze wordt dan vervolgens vermenigvuldigd met de emissiefactor van elektriciteit in Kg CO₂/kWh, deze emissiefactor staat gelijk aan 0,48 Kg CO₂/kWh (Van Cappellen et al., 2021). Dit komt uiteindelijk neer

op een waarde van 0,05 kg CO₂ als er een inspectie plaatsvindt met behulp van de X12 laser scanner. Tel de gebruiksfase bij de productiefase op voor de X12 laser scanner en dan komt de emissie waarde tussen de 195,01 kg CO₂ – 199,52 kg CO₂.

De laatste fase is het recyclen van het desbetreffende alternatief indien deze niet meer nodig is of kapot is geraakt. Zoals als eerder is beschreven bestaat de X12 laser scanner vooral uit elektronica, kunststof, aluminium en staal. Hierbij kunnen het aluminium en staal volledig worden gerecycled indien er geen toegevoegde stoffen inzitten (Berggren et al., 2011; Burgan & Sansom, 2006; Yellishetty et al., 2011). Aan de andere kant wordt het bij de elektronica en kunststof wat lastiger om het volledige product te recyclen, dit heeft te maken met de toevoeging van verschillende stoffen in deze producten (Hopewell et al., 2009; Ngcephe, 2019). Elektronica kan kwik bevatten wat moeilijk te recyclen is, terwijl kunststof vaak bestaat uit verschillende types plastic die het recyclen ook niet bevorderen. Het laatste gedeelte zijn de lithium batterijen en deze zijn ook volledig te recyclen (Elite Recyclers, z.d.). Het grootste gedeelte van de X12 laser scanner kan gewoon gerecycled worden.

Normale drone:

Het volgende alternatief is een normale drone deze wordt aan de hand van dezelfde factoren beoordeeld als de X12 laser scanner. Beginnend bij de levensduur van de drone. De batterijen van de drone hebben een levensduur van 12:30 minuten en dan moeten deze worden opgeladen indien er geen payload op de drone zit. De payload is een camera waarmee er een LIDAR scan gemaakt kan worden en dus een 3D tekening. Indien de payload wel op de drone zit kan deze 9 minuten vliegen (Flyability, 2022b). De motor heeft een levensduur van 50 uur en de propellers hebben een levensduur van 10 uur en dan moeten deze vervangen worden. De batterijen zelf hebben een levensduur van 10,25 uur zonder payload en 7,5 uur met payload indien deze in volledige vluchtsessies worden gebruikt van 12:30 minuten en 9 minuten. De batterij kan vijftig keer opnieuw worden opgeladen, voordat deze het begeeft en vervangen moet worden. Het betekent ook dat de drone 5 batterijen per uur verbruikt indien deze geen payload heeft en 7 batterijen indien deze wel een payload bij zich draagt.

De volgende stap is het berekenen van het energieverbruik van de normale drone. Volgens Flyability (2022b) verbruikt 1 batterij van de drone 99,2 Wh. De drone verbruikt 4,787 batterijen per uur wat neer komt op een energieverbruik van 0,48 kWh per uur zonder payload, terwijl de drone 6,67 batterijen gebruikt per uur als deze een payload bij zich draagt. Dit betekent dat het energieverbruik van de drone met een payload gelijk staat aan 0,66 kWh per uur.

De laatste factor is de impact op het milieu, zoals bij de X12 laser scanner al is gezegd, is deze onderverdeeld in drie fases. Als eerste komt de productiefase, hierbij zullen de batterijen en het frame, propellers en motor worden inbegrepen van de drone. Flyability (2022b) geeft aan dat de drone is gemaakt van koolstofvezels, magnesiumlegering, aluminium wat gebruikt wordt in de luchtvaart en tot slot hoge kwaliteit thermoplast. De verschillende materialen bevatten allemaal verschillende waarden die worden uitgedrukt in CO₂/kg. Om te bepalen wat de uiteindelijke CO₂/kg van de drone is, zullen de waarden van de vier verschillende materialen bij elkaar worden opgeteld en door vier gedeeld worden. Dit heeft er mee te maken dat er alleen bekend is hoeveel de gehele drone weegt met en zonder payload. Hier wordt niet vermeld hoeveel gram koolstofvezels er wordt gebruikt. De koolstofvezels hebben een waarde van 24 CO₂/kg (Zhanget al., 2024), de magnesiumlegering heeft een waarde tussen de 12,5 – 37 CO₂/kg (ARPA, 2013; Ehrenberger, 2020; Ehrenberger & Tauber, 2021). Vervolgens heeft het type aluminium wat veel in luchtvaart wordt gebruikt een waarde tussen de 8 – 12 CO₂/kg (BIPAS, 2024; Jinglong Wang, 2022) en tot slot de waarde van de hoge kwaliteit thermoplast is ook uitgedrukt in een gemiddelde. Aangezien er veel verschillende thermoplasten worden gebruikt in een drone, zal

hiervoor ook een gemiddelde van de verschillende thermoplasten worden getrokken. Hieruit blijkt dan dat de waarde van de hoge kwaliteit thermoplast neerkomt op 2,688 CO₂/kg (City of Winnipeg, z.d.).

Met behulp van bovenstaande informatie kan er een gemiddelde waarde worden gevonden tussen de 11,797 CO₂/kg – 18,922 CO₂/kg. Volgens Flyability (2022b) weegt de drone 1900 gram zonder payload en met payload weegt de drone 2350 gram. De gewichten worden vermenigvuldigd met zowel de onder- als de bovengrenzen die eerder deze alinea is uitgerekend voor de CO₂/kg voor alle materialen bij elkaar. Hier komt uit dat de materialen voor de drone een uitstoot hebben van 22,41 – 35,95 kg CO₂ hebben zonder payload en met de payload erbij gerekend heeft de drone een uitstoot van 27,72 – 44,47 kg CO₂. De waarden zijn berekend door de waarden van de materialen in CO₂/kg te vermenigvuldigen met het gewicht van de drone met en zonder payload.

Voor de productiefase zal ook nog de uitstoot van de lithium batterijen worden berekend. Deze worden net zoals de X12 laser scanner berekend door de uitstoot van een lithium batterij te rekenen tussen de 60 – 106 CO₂/kg. Hier komt uit dat de drone zonder payload een uitstoot tussen de 29,03 – 51,29 CO₂/kg heeft en de drone heeft een uitstoot van de batterijen met payload tussen de 39,68 – 70,10 CO₂/kg. Tot slot heeft de productiefase van de drone de volgende uitstoot. De drone zonder payload heeft een uitstoot tussen de 51,45 – 79,01 CO₂/kg en de drone met payload heeft een uitstoot tussen de 64,99 – 95,76 CO₂/kg.

De volgende fase is de gebruiksfase van de drone, hierbij worden er ook weer twee waarden gegeven voor de uitstoot. Eentje is de drone zonder payload en de ander is de drone met payload. Voor de gebruiksfase wordt de 0,48 CO₂/kWh gebruikt, deze wordt vervolgens vermenigvuldigd met de energie die de drone met en zonder payload nodig heeft. Dit komt uiteindelijk op het volgende uit. De drone zonder payload heeft een uitstoot van 0,23 CO₂ per inspectie per uur, terwijl de drone met payload een uitstoot heeft van 0,32 CO₂ per inspectie per uur.

Tot slot wordt er nog gekeken of alle componenten gerecycled kunnen worden. De drone bestaat uit de volgende componenten: lithium batterijen, koolstofvezels, magnesiumlegering, aluminium en hoge kwaliteit thermoplasten. Zoals eerder al is vermeld kunnen de lithium batterijen en het aluminium gewoon gerecycled worden. De koolstofvezels en thermoplasten kunnen gedeeltes van worden gerecycled, dit komt vanwege de toevoeging van eventuele andere stoffen of het toevoegen van plastics die vervolgens lastig te scheiden zijn (Hopewell et al., 2009; Zhang et al., 2024). Hierbij is het probleem bij de magnesiumlegering dat sommige metalen hier wel makkelijk te scheiden van de magnesium, maar sommige metalen zijn niet te scheiden van de legering (Mendis & Singh, 2013; Wang et al., 2024). Bij het gebrek aan informatie over de menging van het magnesium gaat het onderzoek er van uit, dat deze moeizaam te scheiden is van het magnesium. Over het algemeen kunnen de meeste componenten van de drone gewoon gerecycled worden.

Ultrasonische drone:

De uitwerking van de LCA voor de ultrasone drone lijkt heel erg op die van de normale drone. Dit komt omdat de ultrasone drone gebruik maakt van het chassis van de normale drone, hierbij komt alleen nog een kortere vliegtijd vanwege de extra ultrasone scanner die nog moet worden toegevoegd aan de drone. Volgens Flyability (2022c) is de vliegtijd van de UT drone 7 minuten in optimale omstandigheden. Er zit net zoals bij de normale drone een lithium batterij in die 50 vluchten mee kan, het heeft een motor die 50 uur mee kan en propellers die 10 uur mee kunnen. Hier kan dankzij de vliegtijd berekend worden dat de drone 9 batterijen per uur nodig hebben en dat een batterij 5,8 uur volledig opgeladen mee kan, voordat deze aan vervanging toe is.

Het energieverbruik van de UT drone is 99,2 Wh dit is hetzelfde als de normale drone. Hierbij verschilt de kWh wel vergeleken met de normale drone. Dit komt door de vliegtijd per batterij anders is dan bij de normale drone. De UT drone verbruikt 0,85 kWh per uur.

De laatste fase is dan de impact op het milieu waar het begin weer de productiefase is. Waarbij de lithium batterij een uitstoot heeft tussen de 60 – 106 CO₂/kWh (Emilsson & Dahllöf, 2019). Dit wordt weer vermenigvuldigd met het energieverbruik van de UT drone en dan is de uitstoot van 1 lithium batterij in de UT drone tussen de 51,02 – 90,13 kg CO₂. Deze is hoger vergeleken met de normale drone en dat komt omdat het energieverbruik van deze drone hoger is dan die van de normale drone.

Het volgende onderdeel van de productiefase is de drone zelf hier wordt dezelfde analyse voor het chassis gebruikt als bij de normale drone, waarbij de uitstoot voor de productie van het chassis tussen de 11,797 – 18,922 kg CO₂/kg ligt. Deze twee waardes worden vervolgens vermenigvuldigd met het gewicht van de drone wat dan weer neerkomt op een emissie waarde tussen de 29,49 kg CO₂ – 47,31 kg CO₂.

De dubbele-elementomvormer bestaande uit roestvrij staal, aluminium, keramiek en polymeren hebben een gemiddelde emissie waarde tussen de 5,34 kg CO₂/kg – 7,59 kg CO₂/kg (City of Winnipeg, z.d.; Fujii & Kondo, 1983). Deze waardes worden vervolgens vermenigvuldigd met 0,15, gewicht van de dubbele elementenomvormer, gehaald uit het gewicht van de normale drone min het gewicht van de UT drone, en hier komt dan uiteindelijk uit dat de productiefase van een dubbele elementenomvormer een emissie waarde heeft tussen de 0,80 kg CO₂ – 1,14 kg CO₂. Vervolgens wordt deze waarde bij de emissie waarde van de normale drone + de batterijen bij op geteld en komt het uiteindelijk neer op een waarde tussen de 81,3 kg CO₂ – 138,57 kg CO₂.

Hierna komt de gebruiksfase van de ultrasone, deze lijkt heel erg op de gebruiksfase van de normale drone. Er wordt weer gerekend met de emissiefactor van elektriciteit en dit was 0,48 kg CO₂/kWh. De emissiefactor voor elektriciteit wordt vervolgens vermenigvuldigd met de hoeveelheid energie die de drone per uur nodig heeft en dit was 0,85 kWh. Dit geeft een gebruiksfase van 0,41 CO₂/kWh per uur inspectie.

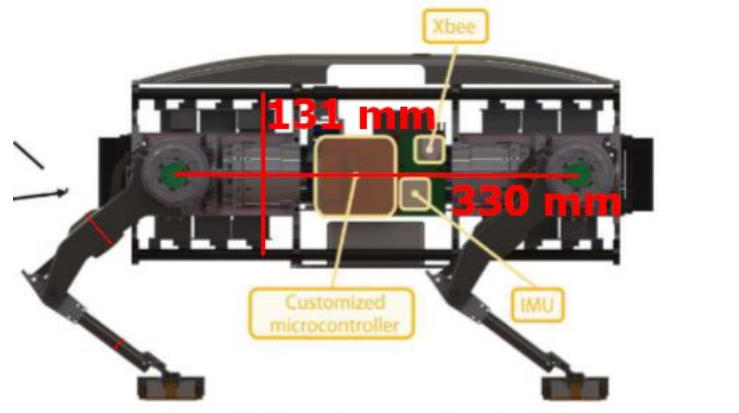
Tot slot wordt de UT drone minder gerecycled dan de normale drone, dit komt door de dubbele-elementenomvormer die plastic bevat en dit wordt gewoon minder gerecycled. Er zitten meer materialen op de UT drone dan op de normale drone, waardoor deze minder goed gerecycled kan worden.

Onderhoud robot:

Voor de onderhoud robot zijn er een aanzienlijke hoeveelheid onderbouwende schattingen gedaan. Deze schattingen zijn gedaan aan een aanzienlijk kleine hoeveelheid informatie die beschikbaar was over de robot. Deze schattingen gaan vooral over de afmetingen en onderdelen van de robot. Beginnend met de onderdelen die beschikbaar zijn gesteld door Hong et al. (2022), dit waren een microcontroller, IMU, Xbee, een ingebedde pc, een motor controller van laag niveau en een krachtverdeler. Dit waren de onbekende onderdelen waarvan niks bekend was. De onderdelen die al wel bekend waren, zijn de 4 magnetische voeten die elk 200 gram wegen en 4 keer een controlepaneel met 2 keer een batterijpakket die samen 240 gram wegen.

Vervolgens zijn de afmetingen van de onbekende onderdelen bepaald, dit is gedaan aan de hand van figuur 16. Volgens Hong et al. (2022) was de breedte van de robot 330 mm dit betekent dat dankzij deze afmetingen bepaald kon worden hoe groot 1 pixel was, waardoor de overige onderdelen berekend konden worden. Dit is gemeten in een fotoshop programma genaamd Gimp. Deze afmetingen voor

deze onderdelen zijn geformuleerd in tabel 8. In tabel 8 zijn de bijna alle onderdelen vermeld in cm^3 behalve de IMU en Xbee deze zijn vermeld in cm^2 . Deze zijn in een andere meeteenheid vermeld, omdat het niet mogelijk was om te bepalen hoeveel cm deze onderdelen in de breedte hadden. Bij de rest van de onderdelen is de maximale breedte van de robot genomen, namelijk 119 mm.



Figuur 16: Afmetingen robot

Tabel 8: Afmetingen onderdelen robot

Onderdeel	Afmeting (cm^3 of cm^2)
Microcontroller	9,04 cm^3
IMU	6,29 cm^2
Xbee	6,87 cm^2
Ingebedde pc	68,20 cm^3
Motor controller van laag niveau	44,54 cm^3
Krachtverdeler	49,41 cm^3

Zoals hierboven in de tabel is weergegeven zijn dit de afmetingen van de robot op basis van figuur 16. De microcontroller heeft een gewicht van 21,08 gram. Dit is bepaald door een gemiddelde dichtheid te nemen van siliconen, koper en plastics en dit te vermenigvuldigen met de afmetingen van de microcontroller, hierbij is de gemiddelde dichtheid van deze materialen 4,17 g/cm^3 (MatWeb, 1996; Shackelford & Alexander, 2000). Er is voor de dichtheid van siliconen, koper en plastics gekozen, omdat dit de meest voorkomende rauwe materialen zijn in een microcontroller volgens Intel (2015). Dit zorgt ervoor dat de microcontroller een gewicht heeft van 37,73 gram.

De IMU en Xbee zijn net zoals de microcontroller chips die worden verwerkt in de robot, zodat deze kan bewegen. Hierbij is dezelfde dichtheid genomen waardoor de IMU een gewicht heeft gekregen van 26,23 gram en de Xbee heeft een gewicht gekregen van 28,67 gram.

Het volgende onderdeel is de ingebedde pc die in de robot zit. Voor de ingebedde pc zijn er twee referenties genomen van twee andere zeer krachtige ingebedde pc's. Hiervoor zijn de volgende ingebedde pc's gebruikt Dell (z.d.) & DIGI (z.d.). Door het bepalen van de inhoud van deze twee ingebedde pc's en dat vervolgens te veranderen naar de inhoud van ingebedde pc die in de robot zit, kan er een gemiddeld gewicht bepaald worden voor de ingebedde pc in de robot. Deze wordt dan geschat op een gewicht van 73,84 gram.

Vervolgens is de motor controller van laag niveau waarvoor een geschatte dichtheid wordt bepaald aan de hand van de veel voorkomende onderdelen. Veel voorkomende onderdelen in een motor controller zijn net zoals bij de eerder genoemd microcontroller dit omvat siliconen en plastics, hierbij zit daarentegen wel meer metalen in dan bij de microcontroller, waardoor de gemiddelde waarde van voor een motor controller komt op $2,25 \text{ g/cm}^3$ (Solovev & Petrova, 2024). Dit leidt er dan weer toe dat de motor controller een gewicht heeft van 100,215 gram.

Tot slot is de krachtverdeler die een gemiddelde dichtheid heeft van $2,5 \text{ g/cm}^3$. De dichtheid is bepaald aan de hand van de verschillende materialen die gebruikt worden in een krachtverdeler. De krachtverdeler bestaat vooral uit aluminium, waardoor de rest van de componenten bijna te verwaarlozen zijn (Astrodyne, z.d.). Hierdoor heeft de krachtverdeler bijna dezelfde de dichtheid als aluminium. Door de dichtheid te vermenigvuldigen met de inhoud van de krachtverdeler, komt het erop neer dat de krachtverdeler in de robot een gewicht heeft van 92,65 gram.

Tot slot kan er berekend worden wat het gewicht van de torso is. De gehele robot heeft een gewicht van 8 kilogram, de magnetische voeten hebben een gewicht van 800 gram, het controlepaneel en de batterijen hebben een gewicht van 240 gram en de bovengenoemde onderdelen hebben samen een gewicht van 709 gram (Hong et al., 2022). Dit betekent dat het torso van de robot een gewicht heeft van 6250,30 gram.

Nu alle onderdelen bekend zijn met hun desbetreffende gewicht kan er worden gerekend aan de LCA. De eerste stap is de levensduur van de robot. Volgens Hong et al. (2022) heeft de robot een levensduur van 2781 stappen, voordat 1 batterij het begeeft en opnieuw moet worden opgeladen, hierbij kan de robot zelf de voeten 22.255 keer aan en uit zetten om een stap te zetten.

Het energieverbruik van de robot kan berekend worden door het voltage en de ampère van de robot over te nemen, waardoor de kWh bepaald kan worden. De robot gebruikt de Nanotech 850-mAh 4S 45–90C LiPo batterijen. Deze hebben 850 mAh nodig en een voltage van 4.2V (Samsung, 2013) en dat komt dan weer neer op een gebruik van 0,0252 kWh.

Tot slot wordt er gekeken naar de impact op het milieu. Ten eerste wordt de productiefase geanalyseerd voor de verschillende onderdelen van de robot. De torso woog 6250,30 gram en bestaat voornamelijk uit koolstofvezels en roestvrij staal wat ervoor zorgde dat het torso een emissiefactor van 15,075 kg CO_2/kg heeft. Dit leidt er toe dat de uitstoot van de torso gelijk staat aan 94,22 kg CO_2 . De overige onderdelen bestaande uit een heel veel verschillende materialen hebben een emissiefactor gekregen van 4,718 kg CO_2/kg . Dit is een gemiddelde van alle gebruikte emissiefactoren van de verschillende materialen, waardoor de overige materialen uiteindelijk een uitstoot hebben van 8,22 kg CO_2 .

De gebruiksfase wordt berekend door het energieverbruik te vermenigvuldigen met de uitstoot van elektriciteit wat tussen de 60 kg CO_2/kWh – 106 kg CO_2/kWh ligt. Dit zorgt ervoor dat de gebruiksfase een uitstoot heeft tussen de 1,51 kg CO_2 – 2,67 kg CO_2 .

Tot slot valt de robot niet heel makkelijk te recyclen, dit komt door de vele chips en plastics die in de robot zijn geplaatst. Chips en plastics die zijn gebonden aan verschillende metalen en andere plastics kunnen niet makkelijk ontbonden worden van elkaar, waardoor de robot niet heel makkelijk te recyclen is (Hopewell et al., 2009).