

De CO₂-footprint van modulair duurzame rioolwaterzuiveringsinstallaties

En de vergelijking met de Total Energy of Ownership



Tom Coenen, s1198556

In opdracht van Waterschapsbedrijf Limburg

25 juli 2014

Voorwoord

Als afsluiting van de bachelor Civiele Techniek aan de Universiteit Twente, dient er een externe, tien weken durende bacheloropdracht uitgevoerd te worden. Dit komt in het onderwijsprogramma als slot van de drie jaar durende bachelor. Omdat deze opdracht extern uitgevoerd wordt, zal naast de onderzoekskant tevens het functioneren binnen een bedrijf of organisatie een belangrijk deel van de bachelor eindopdracht betreffen. Het is daarbij de bedoeling dat de student de tijdens de studie verworven kennis en vaardigheden in de dagelijkse praktijk brengt.

Deze opdracht heb ik uitgevoerd bij het Waterschapsbedrijf Limburg (WBL). Het WBL zorgt voornamelijk voor transport en zuivering van rioolwater en alle taken die daar mee samenhangen. De opdracht die ik binnen WBL uitgevoerd heb, betrof de duurzaamheidsbeoordeling van de verschillende rioolwaterzuiveringsinstallaties, met de focus op de CO₂-footprint van modulaire duurzame rioolwaterzuiveringsinstallaties (MDR). De opdracht bij WBL heeft er eveneens voor gezorgd dat ik praktisch in aanraking ben gekomen met zowel de water- als de bouwkant van de Civiele Techniek. Hierbij heb ik me bezig gehouden met nieuwe, 'state of the art' ontwikkelingen in de waterzuiveringsbranche.

De voornaamste persoonlijke doelstelling was om een beeld te krijgen van mijn voorkeuren binnen het civiele werkterrein. Het was voor de eerste keer geweest dat ik op 'civiel gebied' binnen een bedrijf heb gefunctioneerd. Het is dan ook uitdagend om deel uit te maken van een bedrijf en een inhoudelijke bijdrage te kunnen leveren aan het project waar MDR's onderdeel van zijn. In de toekomst gaat er ook gewerkt worden met de resultaten van het onderzoek. Dit is een bijkomende stimulans geweest om de opdracht zo nauwgezet mogelijk uit te voeren.

Tot slot wil ik graag de medewerkers van WBL bedanken voor de hulp en betrokkenheid, met in het bijzonder de MDR-afdeling, die mij dagelijks van informatie heeft voorzien. Tevens heeft Olaf Durlinger me tijdens de gehele periode bij WBL op een prettige manier begeleid en wil ik Ad de Man en John Belleflamme bedanken voor hun betrokkenheid bij het onderzoek. Tot slot wil ik Denie Augustijn bedanken, die mij vanuit Universiteit Twente begeleid en beoordeeld heeft. Contactgegevens zijn te vinden in bijlage I.

Tom Coenen

25 juli 2014

Lijst van begrippen en afkortingen

Begrip:	paragraaf	Omschrijving
<i>Aeroob</i>	3.1	Zuurstofrijk/zuurstof behoevend.
<i>Afvalwater</i>	3.2	Vervuild water, doorgaans afkomstig uit het rioolstelsel.
<i>Anaeroob</i>	3.1	Zuurstofarm/niet zuurstof behoevend.
<i>Anoxisch</i>	3.1	Zuurstofarm, met aanwezigheid van nitraat (waaraan zuurstof gebonden is).
<i>BZV</i>	3.1	Biochemisch zuurstofverbruik/zuurstofverbruik door bio-organismen.
<i>Carbon footprint</i>	4.1	CO ₂ -footprint.
<i>Climate footprint</i>	4.1	Geheel aan broeikasemissies gedurende van een product tijdens de gehele levenscyclus van het product of dienst.
<i>CO₂-equivalent</i>	4.2	Eenheid uitgedrukt in de schadelijkheid van CO ₂ met hierin het aantal keren dat een kg broeikasgas even schadelijk is voor het milieu als een kg CO ₂ . Voor CH ₄ geldt 25 en voor N ₂ O 298.
<i>CO₂-footprint</i>	4.1	Totale hoeveelheid uitgestoten kilogram CO ₂ tijdens een heel product- of procesleven.
<i>Conventionele rwzi</i>	3.2	In dit rapport: een niet-modulair duurzame rwzi.
<i>CZV</i>	3.1	Chemisch zuurstofverbruik: het gewicht aan zuurstof dat wordt verbruikt om al het oxideerbaar materiaal af te breken.
<i>Defosfateren</i>	3.1	Het verwijderen van fosfaat uit afvalwater.
<i>Denitrificatie</i>	3.1	Het proces waarbij nitraat wordt omgezet in stikstofgas.
<i>Duurzaamheid</i>	3.3	Het streven om, met het oog op de toekomst, verstandig met (energie)bronnen en het milieu om te gaan.
<i>Ecological footprint</i>	4.1	Mate waarin de aarde in de behoefte van de mens kan voorzien, uitgedrukt in het vermogen dat het zichzelf kan hernieuwen.
<i>Effluent</i>	3.1	Gezuiverd afvalwater dat de rwzi verlaat.
<i>Effluenteisen</i>	3.3	Wettelijke eisen aan de kwaliteit van het effluent.
<i>Exploitatiefase</i>	2.2	Gebruiksfasen.
<i>GER</i>	5.3	Gross Energy Requirement: Totale energie die nodig voor het produceren van een materiaal.
<i>ghg-protocol</i>	2.2	Internationaal erkend protocol waarin de berekening van greenhouse gasses (broeikasgassen) van een product staat beschreven.
<i>i.e.</i>	2.2	Inwonerequivalent. Gemiddelde vervuiling door zuurstofbindende stoffen die een persoon per etmaal produceert.
<i>Influent</i>	3.1	Afvalwater dat een rwzi instroomt.
<i>KRW</i>	1.1	Kaderrichtlijn Water. Internationaal akkoord over kwaliteit van oppervlakte en grondwater.
<i>LCA</i>	4.2	Life Cycle Assessment (levenscyclusanalyse).
<i>MBR</i>	3.1	Membrane bio reactor. Zuiveringstechniek door middel van membraangebruik.
<i>MDR</i>	3.3	Modulair duurzame rwzi.

<i>Modulair</i>	3.3	Opgebouwd uit verschillende compartimenten die eenvoudig inwisselbaar zijn.
<i>Modal split</i>	6.1.1.3	Verhouding van gebruik van verschillende vervoerstypen.
<i>Modaliteit</i>	6.1.1.3	Manier van vervoer of transport.
<i>N</i>	3.1	Scheikundige notatie van het element stikstof.
<i>Nabezinken</i>	3.1	Het door middel van zwaartekracht neer laten slaan van de actiefslib uit het influent na de beluchting.
<i>Nereda®</i>	3.1	Een nieuwe zuiveringstechniek waarin de actiefslib in korrelvorm wordt toegevoegd, waarna het in een tank alle zuiveringsstappen uitvoert en vervolgens snel bezinkt.
<i>Nitrificatie</i>	3.1	Het proces waarin (door invloed van bio-organismen) ammonium in nitraat wordt omgezet.
<i>P</i>	3.1	Scheikundige notatie van het element fosfor.
<i>Precipitatie</i>	3.1	Bezinking van zwevende, vaste stoffen.
<i>Pre-precipitatie</i>	3.1	Chemicaliëndosering (doorgaans metaalzouten) die precipitatie bevordert.
<i>rwzi</i>	3.2	Rioolwaterzuiveringsinstallatie.
<i>Zuiveringsslib</i>	3.1	Restproduct van afvalwaterzuivering, met een kleiachtige structuur.
<i>TEO</i>	5.3	Total Energy of Ownership: Vereenvoudigde LCA, die het energieverbruik van een rwzi beschrijft.
<i>UCT</i>	3.1	University of Cape-Town: zuiveringsmethode waarbij met bio-organismen afvalwater wordt gezuiverd.
<i>Ulbis</i>	3.1	Ultra-laag belast actiefslibproces: Een bepaalde zuiveringsopstelling die in Nederland zeer veelvuldig wordt toegepast en waarbij geen voorbezinktanks toegepast worden.
<i>Voorbezinken</i>	3.1	Het door middel van zwaartekracht laten neerslaan van grove vuildeeltjes uit het influent.
<i>Waterschap</i>	1.1	Regionaal bestuursorgaan dat de kwalitatieve en kwantitatieve waterbeheersing op zich neemt.

Managementsamenvatting

Aanleiding en doelstelling

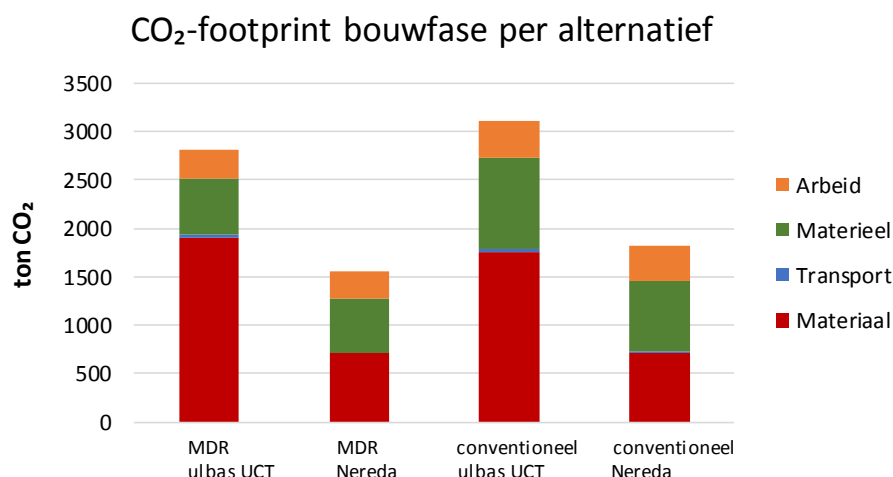
Vanaf 2010 werd, naar aanleiding van onder andere het klimaatakkoord en de Kaderrichtlijn Water (KRW), de druk bij WBL steeds groter om afvalwater goedkoper, van een hogere kwaliteit, energiezuiniger en milieuvriendelijker te zuiveren. Om de duurzaamheid van rioolwaterzuiveringsinstallaties (rwzi's) aan de hand van het energiegebruik te bepalen is destijds de Total Energy of Ownership (TEO) bepaald van de ontwerpen, die naast de ingekochte (directe) energie ook indirect energiegebruik bij bijvoorbeeld materiaalproductie in de berekening opneemt.

Deze methodologie bleek echter, door gebrek aan bekendheid en referentie, niet voldoende inzicht te geven in het milieueffect om op basis daarvan op het bestuursniveau beslissingen te kunnen nemen. In de civiele branche is de CO₂-footprint een methode die de afgelopen tien jaar een steeds grotere bekendheid heeft verworven en daarbij de life cycle assessment (LCA) niet op energie toepast, maar op de bijdrage aan het broeikas effect. Een nieuw rwzi-concept van Waterschapsbedrijf Limburg (WBL), de modulair duurzame rwzi (MDR), kan op deze manier op het gebied van duurzaamheid vergeleken worden met andere typen rwzi's. Op basis daarvan zouden bestuurders en beleidsmakers de resultaten op waarde kunnen schatten en beslissingen kunnen nemen.

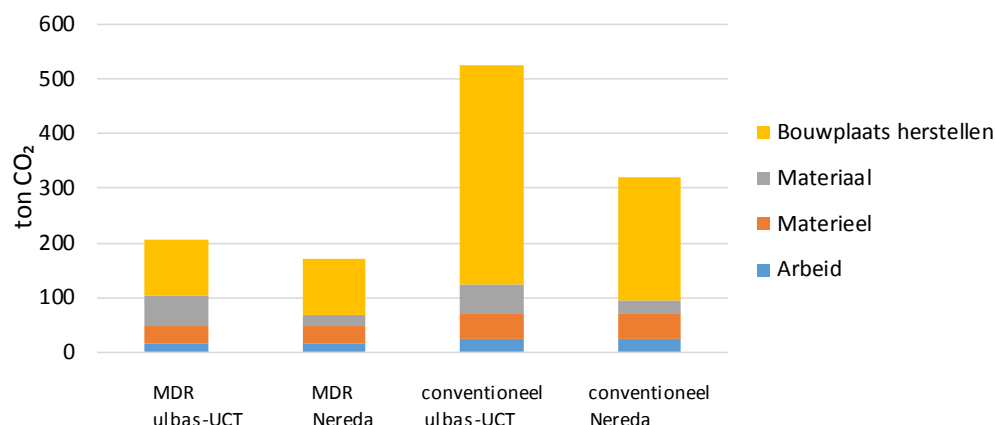
Het doel van dit onderzoek is om de CO₂-footprint over de bouw- en de sloopfase van vier rwzi-varianten bepalen, deze resultaten analyseren en ten slotte de resultaten van de CO₂-footprint te vergelijken met de resultaten van de TEO. De numerieke resultaten worden hierbij verkregen aan de hand van een tool, in de vorm van een spreadsheet, om de CO₂-footprint van rwzi's te bepalen over de bouw- en de sloopfase van een rwzi. De exploitatiefase wordt niet in het onderzoek opgenomen, omdat er uitsluitend gezocht wordt naar een vergelijking tussen de conventionele en de modulair duurzame rwzi's. Hierbij zit het verschil de in duurzaamheid vrijwel uitsluitend in de dimensionering van de constructie en de activiteiten die daar aan gelieerd zijn, zoals onderhoud en vervanging van onderdelen. De zuiveringstechnieken zijn namelijk hetzelfde en staan los van het modulair duurzame karakter van de MDR.

Resultaten

De resultaten zijn opgesplitst in de bouw- en de sloopfase. Allereerst is een grafiek weergegeven van de bouwfase en daaronder van de sloopfase. Houd hierbij rekening met de verandering in schaalverdeling aan de linker assen van de grafieken. Zo zal de bouwfase absoluut gezien significant meer CO₂ emitteren dan de sloopfase.



CO₂-footprint sloopfase per alternatief



Conclusie

Uit de twee bovenstaande grafieken blijkt dat de conventionele rwzi met ulbas-UCT de meeste CO₂-uitstoot zal genereren, zowel in de bouw- als de sloopfase. De oorzaak hiervan ligt bij de bouwfase hoofdzakelijk bij de grote hoeveelheid beton die ondergronds gestort wordt, wat tevens grote hoeveelheden wapeningsstaal en grondverzet met zich meebrengt. De variant MDR Nereda® behoeft door het toepassen van de Nereda® zuiveringstechniek relatief weinig beton en wapeningsstaal en beperkt, door het bovengrondse opstellen van de rwzi, de materieelinzet tot een minimum en is daarmee op het gebied van de CO₂-footprint in de bouwfase het best scorende alternatief.

In de sloopfase blijkt dat het herstellen van de bouwplaats de meeste CO₂-uitstoot genereert. Doordat zowel de bovengrondse bouw als het egaliseringsoppervlak klein is, produceert de sloop van MDR's veel minder uitstoot dan de sloop van conventionele rwzi's. Het herstellen van de bouwplaats is in verhouding met de rest van de uitstoot leidend, wat er voor zorgt dat de MDR-varianten, gebaseerd op de CO₂-footprint in de sloopfase, sterk de voorkeur verdienen boven de conventionele varianten. Doordat er bij de ulbas-UCT meer materiaal getransporteerd wordt dan bij Nereda®-varianten, zal de laatstgenoemde een lichte voorkeur verdienen boven de ulbas-UCT variant met betrekking tot de CO₂-footprint van de sloopfase. Dit is echter een marginaal verschil in de totale CO₂-footprint, aangezien de bouwfase meer dan vijf keer zoveel uitstoot genereert dan de sloopfase.

Deze trends zijn tevens waar te nemen in de TEO-analyse uit het rapport 'MDR: De nieuwe standaard' (WBL, 2012) en onderschrijft daarmee dat zowel het MDR ontwerpconcept als de Nereda®-zuiveringstechniek op het gebied van CO₂-uitstoot in de bouw- en de sloopfase de voorkeur verdienen boven het conventionele ontwerpconcept en de ulbas-UCT zuiveringsmethode.

Aanbevelingen

Met betrekking tot vervolgonderzoek zou de mogelijkheden van CO₂-reductie onderzocht en gekwantificeerd kunnen worden. Eveneens zou de CO₂-footprint van de exploitatiefase bepaald kunnen worden voor een compleet beeld van de gehele levenscyclus van een rwzi. Hoewel dit kennis vereist in de procestechnologie en dieper in zal gaan op de zuiverings- en mogelijk slibvergistingstechnieken, zullen deze emissiebronnen een zeer substantieel effect hebben op het totaal. Er dient echter rekening gehouden te worden met het feit dat de zuiveringsprocessen tevens grote hoeveelheden lachgas en methaan emitteren, waardoor, indien deze meegenomen worden, sprake zal zijn van een climate footprint.

Inhoudsopgave

Voorwoord.....	i
Lijst van begrippen en afkortingen	ii
Managementsamenvatting	iv
Lijst van figuren en tabellen	vii
1 Inleiding	1
1.1 Aanleiding.....	1
1.2 Leeswijzer	1
2 Onderzoeksopzet	2
2.1 Doelstelling.....	2
2.2 Methodologie.....	3
3 De rwzi en de MDR.....	8
3.1 Zuiveringstechnieken.....	8
3.2 Conventionele rwzi	9
3.3 Ontwerp MDR.....	10
4 CO ₂ -Footprint	14
4.1 Footprints	14
4.2 Definitie CO ₂ -footprint.....	15
4.3 Toepassing Life Cycle Assessment op case.....	16
4.4 Materiaalspecificaties en aannames CO ₂ -footprint.....	17
5 TEO.....	19
5.1 Ontstaan TEO.....	19
5.2 Afweging TEO	19
5.3 Uitgangspunten TEO.....	20
6 Resultaten.....	21
6.1 Resultaten CO ₂ -footprint.....	21
6.2 Resultaten TEO.....	33
6.3 Vergelijking CO ₂ -footprint met TEO.....	34
7 Conclusie en aanbeveling	37
7.1 CO ₂ -footprint.....	37
7.2 Verband tussen TEO en CO ₂ -footprint.....	38
7.3 Aanbevelingen.....	39
Referenties.....	40
Bijlage I: Contactgegevens.....	42
Bijlage II: Kengetallen CO ₂ -footprints.....	43
Bijlage III: Blokschema's rwzi-varianten.....	47
Bijlage IV: Manuren en draaiuren mobiele kraan uit investeringskosten	52
Bijlage V: Totale fasering rwzi.....	54

Lijst van figuren en tabellen

Figuren

Figuur 2.1: Processchema onderzoek CO ₂ -footprint. Bron: Pagilla et al. (2009)	4
Figuur 2.2: Projectfasering WBL. Bron: WBL (2014a)	5
Figuur 2.3: Schematisering CO ₂ -uitstoot beïnvloedende processen bouwfase.	6
Figuur 2.4: Schematisering CO ₂ -uitstoot beïnvloedende processen sloopfase	7
Figuur 3.1: Schematisering mUCT-proces. Bron: Water Environment Federation (2007)	8
Figuur 3.2: Schematisatie conventionele rwzi (WBL, 2012)	10
Figuur 3.3: Impressie concept MDR-variant Verdygo met vierkante tanks. Bron: WBL (2013).	12
Figuur 4.1: Schematisering LCA. Bron: Franchetti en Apul (2013).	17
Figuur 6.1: CO ₂ -footprint per variant naar materiaaltype	22
Figuur 6.2: CO ₂ -footprint materiaaltransport per variant naar materiaaltype	24
Figuur 6.3: grafiek CO ₂ -uitstoot graafwerkzaamheden. Bron: Kaboll et al. (2012).	25
Figuur 6.4: CO ₂ -footprint materieelinzet per variant naar materieeltype	26
Figuur 6.5: Modal split Nederland. Bron: Smokers et al. (2007).	27
Figuur 6.6: CO ₂ -footprint uit arbeid per variant als gevolg van personenvervoer	28
Figuur 6.7: CO ₂ -footprint bouwfase per alternatief naar emissiebron	29
Figuur 6.8: CO ₂ -footprint bouwfase per variant naar scope	30
Figuur 6.9: CO ₂ -footprint sloopfase per alternatief naar emissiebron	32
Figuur 6.10: CO ₂ -footprint per alternatief naar projectfase	33
Figuur 6.11: Vergelijking van energiegebruik in de aanlegfase van de verschillende concepten	34
Figuur 6.12: Grafische vergelijking TEO en CO ₂ -footprint aanlegfase	35
Figuur 6.13: vergelijking kengetallen materialen	36
Figuur 7.1: Grootte CO ₂ -footprint bouwfase per variant per onderdeel	37
Figuur 7.2: Grootte CO ₂ -footprint sloopfase per variant per onderdeel	38

Tabellen

Tabel 3.1: varianten rwzi voor CO ₂ -footprint vergelijking	13
Tabel 4.1: Verschillende definities CO ₂ -footprint	16
Tabel 6.1: Samenvatting CO ₂ -footprint uit materiaalproductie en fabricage	21
Tabel 6.2: Materiaalhoeveelheid opgesplitst in kilogram recyclebaar materiaal en afvalmateriaal	23
Tabel 6.3: Samenvatting CO ₂ -footprint als gevolg van materiaaltransport	23
Tabel 6.4: Bouw- en sloopkosten per variant. Bron: WBL (2012).	24
Tabel 6.5: Samenvatting CO ₂ -footprint als gevolg van materieelinzet	26
Tabel 6.6: Samenvatting CO ₂ -footprint als gevolg van personenvervoer	27
Tabel 6.7: Samenvatting CO ₂ -footprint bouwfase per variant naar proces	28
Tabel 6.8: Samenvatting CO ₂ -footprint bouwfase per variant naar scope	30
Tabel 6.9: Samenvatting CO ₂ -footprint sloopfase per variant naar emissiebron	31
Tabel 6.10: Samenvatting CO ₂ -footprint per variant naar fase	32
Tabel 6.11: Naamgeving verschillende concepten TEO beoordeling	33
Tabel 6.12: vergelijking conversiefactoren TEO en CO ₂ -footprint	35

1 Inleiding

Sinds 2004 heeft Limburg twee waterschappen die, afgezien van de waterzuivering en drinkwatervoorziening, alle watertaken in de provincie op zich nemen, zijnde Waterschap Peel en Maasvallei en Waterschap Roer en Overmaas. Daarnaast voorziet Waterleidingmaatschappij Limburg (hierna WML) Limburg van schoon drinkwater en neemt het Waterschapsbedrijf Limburg (hierna WBL), fungerend als dochterbedrijf van de twee waterschappen, het rioolwatertransport en –zuivering van beide waterschappen op zich. Naast het transporteren en zuiveren van afvalwater, valt tevens het verwerken van het zuiveringsslib onder haar taken (WBL, 2014b). Deze zuivering wordt gerealiseerd met behulp van rioolwaterzuiveringsinstallaties (hierna rwzi's).

WBL wil zichzelf gaan profileren als een 'High Performance Organisatie'. Door middel van innovatieve ontwerpconcepten als de modulair duurzame rwzi (MDR, zoals in hoofdstuk 3 toegelicht), nieuwe vergistingstechnieken als thermische drukhydrolyse (TDH) en procesmanagementtechnieken als WAUTER probeert WBL de andere waterschappen in de benchmark voor te blijven. Met behulp van deze innovaties wil WBL zo hoog mogelijke prestaties tegen zo laag mogelijke maatschappelijke kosten realiseren.

1.1 Aanleiding

Vanaf 2010 werd, naar aanleiding van onder andere het klimaatakkoord en de Kaderrichtlijn Water (hierna KRW), de druk steeds groter om afvalwater goedkoper, van een hogere kwaliteit, energiezuiniger en milieuvriendelijker te zuiveren. WBL is in 2012 gekomen met de modulair duurzame rwzi (hierna MDR). De effecten en eventuele verbeteringen van dit ontwerp ten opzichte van de conventionele rwzi op het milieu zijn echter nog onvoldoende in kaart gebracht. Om deze nieuwe rwzi op duurzaamheid te onderzoeken, te vergelijken en te beoordelen, is een nieuwe door Tauw ontwikkelde beoordelingsmethodiek gebruikt. Het totale directe en indirecte energieverbruik voor de eigenaar 'van wieg tot graf' van de rwzi's wordt gemeten aan de hand van de 'Total Energy of Ownership' (hierna TEO). In hoofdstuk 5 wordt dieper op deze methodiek ingegaan.

In de bouw- en waterwereld is de CO₂-footprint (in de Engelstalige literatuur carbon footprint) echter een veel frequenter gebruikte en meer tot de verbeelding sprekende maatstaf voor het beoordelen van de milieubelasting van objecten, installaties en processen. Tevens betekent een laag energieverbruik niet per definitie een lage milieubelasting en andersom, dus geldt de CO₂-footprintmethodiek niet als vervanging van de TEO-methodiek.

De CO₂-footprint die op dit moment door waterschappen en onderzoeksinstituten berekend wordt, houdt echter niet of nauwelijks rekening met de bouw en de sloop van de rwzi's en de materialen die hiervoor gebruikt worden, maar houdt zich voornamelijk bezig met de uitstoot van procesgassen en richt zich bijna uitsluitend op de uitstoot en verbruik in de exploitatiefase (Kolkhuis Tanke en Rijdsijk, 2012). Omdat TEO op dit moment nog weinig bekendheid heeft, kunnen beleidsmakers en bestuursorganen de beslissingen niet of onvoldoende op basis van deze duurzaamheidsvergelijking maken. Daarbij is TEO op dit moment nog geen beproefde beoordelingsmethodiek, waardoor van bewezen resultaten uit het verleden geen sprake is.

1.2 Leeswijzer

Allereerst wordt in hoofdstuk 2 het onderzoek ingekaderd en wordt de onderzoeksmethodiek beschreven. In hoofdstuk 3 wordt het gehele MDR-principe uitgewerkt en worden de ontwerpen beschreven van de vier uiteindelijk door te rekenen rwzi varianten. In hoofdstuk 4 en 5 wordt toegewerkt naar de resultaten van respectievelijk CO₂-footprint en TEO. Omdat de TEO in het rapport 'MDR: De nieuwe standaard' reeds uitgewerkt is, ligt de nadruk op de CO₂-footprint. Vervolgens worden in hoofdstuk 6 de resultaten weergegeven en worden deze geanalyseerd en onderling vergeleken. In hoofdstuk 7 zijn de conclusies gegeven. Eveneens worden in dit laatste inhoudelijke hoofdstuk aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek. Begrippen en afkortingen zijn voorin het rapport beschreven.

2 Onderzoeksopzet

Allereerst is in dit hoofdstuk de doelstelling van het onderzoek omschreven met de daarbij horende onderzoeksvraag. Daaropvolgend is de onderzoeksmethodologie beschreven. Ook de projectfasering is hierin opgenomen.

2.1 Doelstelling

De doelstelling zal bestaan uit een beschrijving van de doelstelling met daarbij de onderzoeksvraag en de afbakening van dit onderzoek. Tevens is de case kort beschreven die is gebruikt voor het uitvoeren van het onderzoek.

2.1.1 Onderzoeksvraag

Om een volledige en door iedereen te begrijpen duurzaamheidsvergelijking van de bouw en de sloop van rwzi's te realiseren, wordt gebruik gemaakt van de CO₂-footprint (zie hoofdstuk 4). Het uiteindelijke doel van het onderzoek is om een CO₂-vergelijking te visualiseren door middel van een matrix van enerzijds de bouwmethodieken 'conventioneel' en 'modulair duurzaam' (zie hoofdstuk 3) en anderzijds de zuiveringsmethodieken 'ulbas-UCT' en 'Nereda®' (zie paragraaf 3.1). Deze uitkomsten worden vergeleken met de TEO van deze varianten. De onderzoeksvraag waarop het onderzoek leunt, is als volgt geformuleerd:

“Hoe kan de CO₂-footprint van de bouw- en sloopfase van verschillende rwzi's bepaald worden, wat zijn hiervan de resultaten en hoe verhouden deze resultaten zich ten opzichte van elkaar en van de TEO?”

Een bijproduct van het onderzoek is een spreadsheet, waaruit met de juiste invoer een totale CO₂-footprint van de aanleg- en sloopfase van een MDR volgt. Wat onder deze fasen valt, is in paragraaf 2.2.4 beschreven. Met deze spreadsheet is het mogelijk om van vijf rwzi's de effecten op de CO₂-balans in kaart te brengen, al zijn in dit onderzoek slechts vier varianten vergeleken. Op het gebied van de zuiveringsprocessen zijn er talloze publicaties over de CO₂-footprint bekend, zoals van Gupta en Kumar Singh (2012) en Snip (2009), maar op het gebied van de bouwmaterialen en processen die hiermee samenhangen, zoals transport en montage zijn deze dat niet. Het onderzoek naar de CO₂-footprint van de materialen en materiaalgebruik betreft daarom het grootste deel van het onderzoek.

2.1.2 Afbakening onderzoek

Zoals blijkt uit de onderzoeksvraag, richt het onderzoek zich niet op de exploitatiefase, ondanks dat deze fase niet per definitie minder uitstoot genereert. De reden hiervan ligt bij het feit dat er uitsluitend gezocht wordt naar een vergelijking tussen de conventionele en de modulair duurzame rwzi's. Hierbij zit het verschil in duurzaamheid vrijwel uitsluitend in de dimensionering van de constructie en de activiteiten die daar aan gelieerd zijn, zoals onderhoud en vervanging van onderdelen. De zuiveringstechnieken zijn namelijk hetzelfde en staan los van het modulair duurzame karakter van de MDR. Zo kan het duurzame Nereda®-proces (paragraaf 3.1.2) in conventionele installaties toegepast worden en het 'klassieke' ulbas-UCT proces (paragraaf 3.1.1) in MDR's, waar ook het vergelijkend onderzoek naar gedaan wordt. Wel zijn installatietechnische veranderingen tijdens de exploitatiefase vanwege het modulaire karakter van de MDR goedkoper, energiezuiniger, efficiënter en milieuvriendelijker, maar is dit, door gebrek aan theoretische en empirische data, niet gekwantificeerd in de CO₂-footprintberekeningen. Overigens is de uitstoot van procesgassen van rwzi's, zij het vrij globaal, reeds door WBL in kaart gebracht. De bijdrage van de bouw- en sloopfase aan de totale CO₂-footprint van een rwzi zal dus aan de hand van dit onderzoek niet bepaald kunnen worden, maar wel kunnen de resultaten van dit onderzoek gebruikt worden om de significantie van deze twee fasen ten opzichte van de exploitatiefase in een mogelijk vervolgonderzoek te bepalen.

Daarnaast is er gekeken of de uit literatuur gehaalde waarden en om energieverbruik om te zetten in CO₂ overeenkomen met de gevonden waarden uit dit onderzoek. Het is hierbij van belang dat beide methodieken ook op dezelfde processen en onderdelen toegepast worden. Allereerst is de gehele CO₂-footprint berekend, met als uitgangspunt de life cycle assessment (LCA, zie paragraaf 4.3) en zijn deze voor de verschillende varianten bepaald. Bij de vergelijking met de TEO zijn daarentegen uitsluitend de aspecten meegenomen die ook bij de TEO-berekeningen meegenomen zijn. Daaropvolgend worden de resultaten van de TEO vergeleken met deze van de CO₂-footprint. Zo is geanalyseerd of er in de CO₂-footprint dezelfde trends te herkennen zijn als bij de TEO. De verwachting hierbij is dat de trends in grote lijnen hetzelfde zullen zijn, aangezien met dezelfde materiaalhoeveelheden is gerekend en deze materiaalhoeveelheden naar verwachting een groot aandeel in het totaal zullen hebben.

2.1.3 Onderzoekscase

De onderzoeksvraag vormt de leidraad voor het onderzoek. Als case is, net als in de TEO-berekeningen, de CO₂-footprintberekeningen van de business case rond de rwzi van Wijlre genomen. Deze rwzi is als een 'gemiddelde' te beschouwen qua grootte (ca. 60.000 inwonerequivalenten). Op basis van zuiverings- en constructietechnieken is dit echter geen representatieve rwzi, omdat deze rwzi een zeer forse chemicaliëndosering behoeft en de gebruikte constructietechnieken inmiddels gedateerd zijn. Er zullen dus alleen de omgeving en de omstandigheden van de case gebruikt worden. Op basis van deze case wordt zowel de conventionele als de modulair duurzame rwzi met beide zuiveringsmethodieken getoetst, waarna de resultaten vergeleken en geanalyseerd worden.

2.2 Methodologie

Allereerst is in deze paragraaf de onderzoeksvraag opgesplitst in verschillende onderdelen. Het rapport is op basis van deze onderdelen en volgorde opgebouwd. Vervolgens is een stappenplan voor het uitwerken van de CO₂-footprint en de projectfasering gegeven.

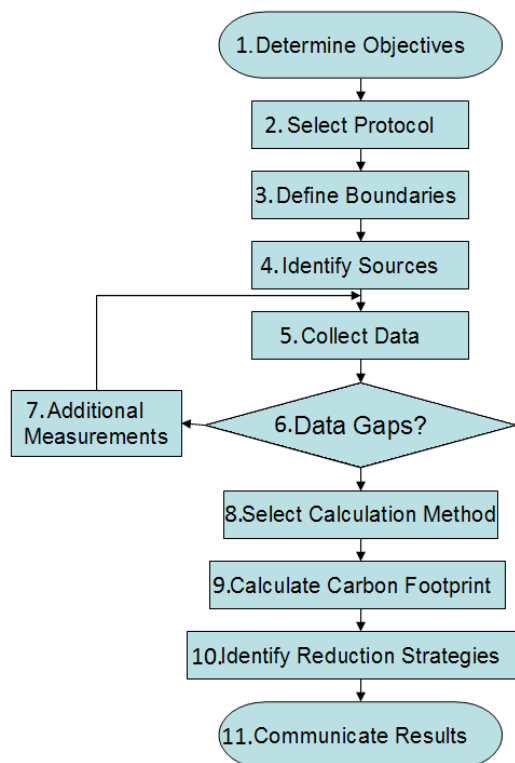
2.2.1 Onderzoek

De onderzoeksvraag, hoe de CO₂-footprint van de bouw- en sloopfase van een MDR bepaald worden en hoe de resultaten zich ten opzichte van de TEO verhouden, zal stapsgewijs beantwoord moeten worden. Deze vraag bestaat namelijk uit vier onderdelen die van elkaar afhankelijk zijn en samen een geheel vormen.

1. **Onderdelen rwzi:** Allereerst zijn de componenten van de vier verschillende rwzi's bepaald. Dit is grotendeels bepaald aan de hand van het rapport 'MDR: De nieuwe standaard' (WBL, 2012). De conventionele rwzi ligt ten grondslag aan deze MDR en is als eerste toegelicht. Ook de zuiveringstechnieken zijn kort behandeld. Eveneens zijn de interne onderzoeken aangaande de TEO geraadpleegd om er zeker van te zijn dat de CO₂-footprint op dezelfde aspecten beoordeeld wordt als de TEO. Daarnaast is er gebruik gemaakt van WBL's expertise en externe contacten en is intern beschikbare informatie en literatuur betreffende de conventionele rwzi's geraadpleegd. De uitwerking van de vier rwzi's zijn terug te vinden in hoofdstuk 3.
2. **CO₂-footprint:** Vervolgens is onderzocht wat de CO₂-footprint precies inhoudt, wat voornamelijk is voortgekomen uit literatuuronderzoek. De basisgedachte van de CO₂-footprint is in dit onderdeel behandeld en de bestaande databases met gegevens over deze beoordelmethode zijn gezocht en geraadpleegd (zoals beschreven in het stappenplan uit paragraaf 2.2.2). Tevens is hierin beschreven waarom de CO₂-footprint in dit onderzoek het meest geschikt is. Dit gedeelte is uitgewerkt in paragraaf 4.1, 4.2 en 4.4.
3. **CO₂-footprint per rwzi-onderdelen en -processen:** Vervolgens is bepaald hoe voor elk relevant deel van de vier rwzi's de CO₂-footprint berekend wordt. Uit verschillende databases zijn beschikbare gegevens gehaald. Waar deze ontbraken, is met behulp van andere gegevens,

zoals bijvoorbeeld energieverbruik of begrotingen, tot een gefundeerde CO₂-footprint gekomen. Daaropvolgend is de spreadsheet samengesteld en toegepast op de verschillende varianten uit de case. In hoofdstuk 6, resultaten, is dit uitgewerkt.

4. **TEO:** Het laatste onderdeel van de onderzoeksvraag, die de vergelijking met de resultaten van de TEO betreft, is uit de verschillende rapporten van de verschillende cases gehaald. Tevens zijn rapporten van Tauw geraadpleegd, waarin de MDR's gereviewed en beoordeeld zijn. Ook is binnen WBL naar documenten en spreadsheets gezocht die hier meer onderbouwing voor geven. De TEO-methodiek is beschreven in hoofdstuk 5. Vervolgens zijn de bestaande TEO resultaten vergeleken met de bevindingen die zijn verkregen door het spreadsheet op de cases toe te passen. Net als de CO₂-footprintresultaten zijn de resultaten van de TEO en de analyse van de vergelijking met de CO₂-footprint zijn in hoofdstuk 6 weergegeven



Figuur 2.1: Processchema onderzoek CO₂-footprint. Bron: Pagilla et al. (2009)

2.2.2 Stappenplan

Een groot deel van het onderzoek, is het achterhalen van de individuele CO₂-footprintbijdragen van de onderdelen in het proces (stap 3 uit paragraaf 2.2.1). Deze zijn aan de hand van stappen uit het schema uitgevoerd (zie Figuur 2.1). Dit rapport richt zich op de stappen 1 tot en met 9.

Stappen 10 en 11 gaan namelijk over de CO₂-footprint verkleining, terwijl de footprint in dit rapport uitsluitend in kaart is gebracht.

Stap 1 is in paragraaf 1.2 doorlopen en houdt de onderzoeksdoelstelling in. Stap 2 vraagt om een protocol, zodat alle data gebaseerd zijn op dezelfde uitgangspunten. De verzamelde data zijn daarom allemaal gebaseerd zijn op het ghg-protocol (greenhouse-gas). Dit protocol is het meest gebruikte CO₂-uitstoot tool en betreft een uitgebreide richtlijn voor het berekenen van de ghg's (greenhouse-gasses), die ten grondslag liggen aan de CO₂-footprint (Gupta en Kumar Singh, 2012).

De inkadering van het onderzoek, die in stap 3 gevraagd wordt, vraagt om een concretisering en afbakening van het onderzoeksgebied. De afbakening van de vraagstelling is terug te vinden in paragraaf 2.1.2. Ook betreft het in dit geval de onderdelen waarvoor de CO₂-footprint berekend zijn en de nauwkeurigheid van de LCA's. Dit hangt strikt samen met de fasering van de levenscyclus van een rwzi, die in paragraaf 2.2.4 is beschreven.

Stap 4 betreft een literatuurstudie om bronnen te vinden waaruit de data (stap 5) gehaald zijn. Stap 5, 6 en 7 vormen een iteratief proces, waarbij steeds data uit de bronnen worden gehaald. Hierna is bepaald of deze voldoen en compleet zijn. Waar de data tekortschieten, dienen andere methoden toegepast te worden. Nadat alle data verzameld zijn, kan met stap 8 begonnen worden.

Voor het berekenen van de CO₂-footprint zijn door Wiedmann en Minx (2007) twee belangrijke protocollen (stap 8) ontworpen: procesanalyse en input-outputanalyse (Environmental input-output, EIO). Bij het eerste protocol worden alle processen binnen een systeem geanalyseerd. Het tweede

protocol richt zich op wat er een systeem binnenkomt en verlaat. Dit geeft de best samenhangende uitkomst over de productie en consumptie van de CO₂-footprint van de bouw- en sloopfase van een rwzi, zeker omdat er een concrete materiaalinput vastgesteld is. Over de CO₂-footprintberekening van de bouw- en sloopfase over de individuele processen of producten wordt de hybride EIO LCA aanpak aangeraden. Deze aanpak combineert de EIO met de LCA. Bij dit proces dient echter te allen tijde in acht genomen te worden dat individuele LCA-waarden niet dubbel geteld worden met de optelling van levenscycli van verschillende onderdelen.

Hierna is per rwzi-element berekend hoe groot de CO₂-footprint is. Vervolgens is de CO₂-footprint voor de nevenprocessen, bijvoorbeeld betreffende transport, materieelinzet en arbeid berekend (stap 9) en zijn deze bij elkaar en bij de CO₂-emissies uit de rwzi-elementen opgeteld.

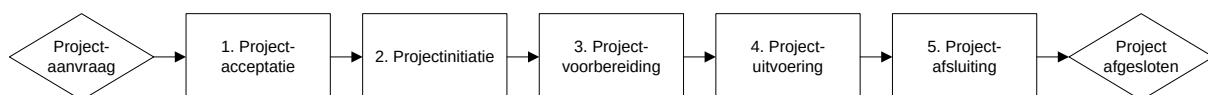
2.2.3 Scopes

Deze CO₂-uitstoot is onderverdeeld in 3 scopes, om zo een beeld te krijgen van de verhouding tussen directe en indirecte uitstoot (Snip, 2009):

- Scope 1: De ghg's die uitgestoten worden door emissiebronnen die rechtstreeks aan de bouw en de sloop van de MDR te linken zijn. Denk hierbij bijvoorbeeld aan emissiegassen van materieel en uitlaatgassen ten gevolge van transport. Omdat in dit onderzoek de exploitatiefase niet geanalyseerd wordt, is deze scope slechts gedeeltelijk uitgewerkt en worden de zuiveringsprocesgassen bijvoorbeeld niet meegenomen.
- Scope 2: De gassen die vrijkomen bij de externe productie van energie die rechtstreeks bij de bouw- en sloopprocessen van de MDR gebruikt worden. Dit geldt voor de gehele externe productie van elektriciteit.
- Scope 3: Hieronder vallen de uitstootgassen die indirect door het bouw- en sloopproces van de MDR veroorzaakt worden, maar die er niet waren geweest als de bouw en de sloop niet plaats hadden gevonden. Denk hierbij aan de uitstoot bij grondstofwinning van gebruikte metalen en bij de fabricage van onderdelen.

2.2.4 Projectfasering

Omdat de fasering van bouwprojecten niet universeel gedefinieerd is, is de methode die intern bij WBL gebruikt wordt gehanteerd. Deze faseringsaanpak is in Figuur 2.2 weergegeven.



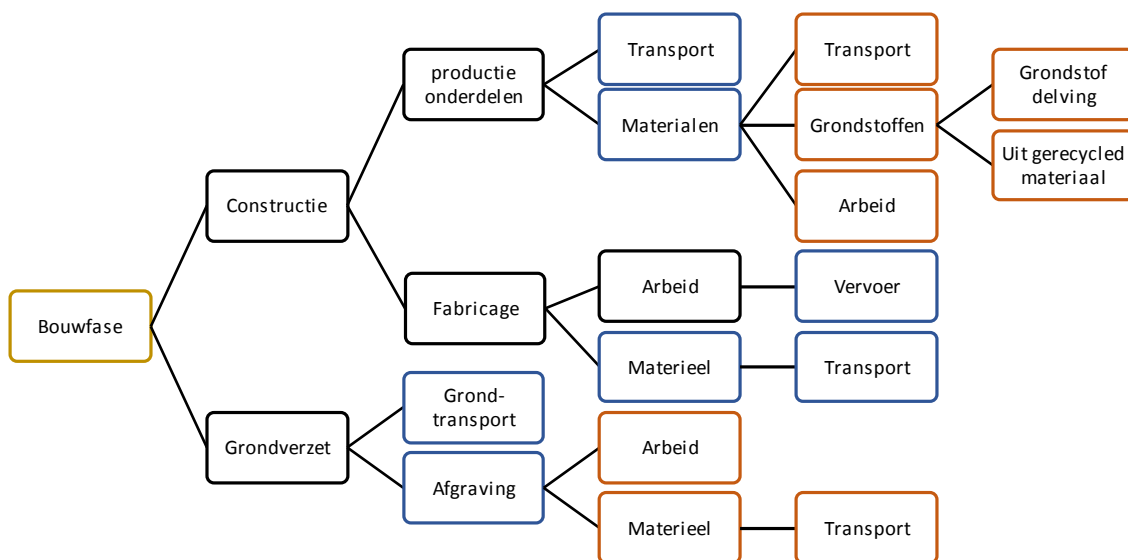
Figuur 2.2: Projectfasering WBL. Bron: WBL (2014a)

Allereerst wordt er een projectaanvraag ingediend. De opdrachtgever voor de aanvraag of aanleiding tot het project kan zowel van interne als van externe aard zijn. (1) Vervolgens wordt onderzocht of de projectscope helder is en het project realistisch, noodzakelijk en haalbaar is en wordt het project al dan niet geaccepteerd. (2) Hierna wordt in de projectinitiatie een plan van aanpak opgesteld. Nadat is besloten om het project door te zetten, wordt (3) in de projectvoorbereiding de gehele ontwerpfase doorlopen en wordt het project aanbesteed. In deze fase wordt ten slotte bepaald of het project definitief zijn doorgang zal vinden. Al deze fasen generen geen significante en expliciet aan te wijzen CO₂-uitstoot en worden in de CO₂-footprintanalyse buiten beschouwing gelaten. Omdat fase 3, waarin de meest gedetailleerde beslissingen gemaakt worden, echter zo'n grote invloed heeft op de definitieve projectuitvoering, zal deze fase wel een zeer grote invloed op de hoeveelheid later uitgestoten CO₂ hebben.

Daaropvolgend (4) wordt het project uitgevoerd in de projectuitvoeringsfase en wordt het werk na voltooiing en goedkeuring opgeleverd. (5) De laatste actieve fase die het WBL beschrijft is de projectafsluiting, waarin de documentatie op orde gebracht en beoordeeld wordt. Ook de tekeningen van de installatie nadat de bouw gereed is, worden in deze fase aangeleverd. Tot slot wordt het project ook administratief afgerond.

2.2.5 Bouw- en sloopfase

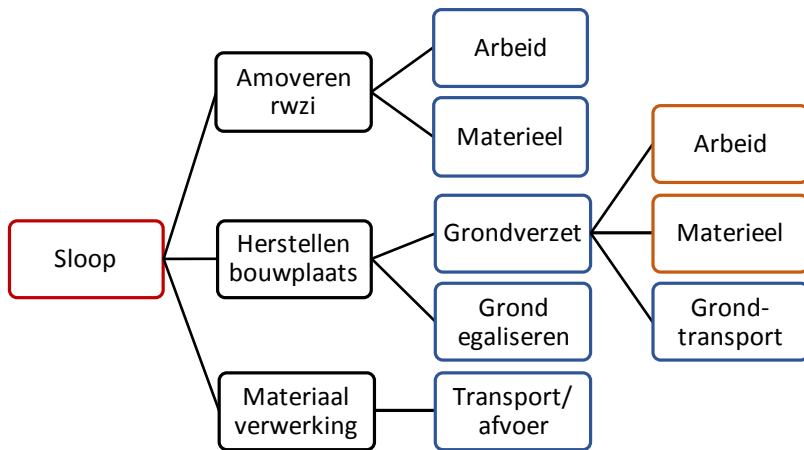
De bouwphase, die in de vorm van 'projectuitvoering' te vinden is in Figuur 2.2, richt zich voornamelijk op de communicatieve kant van het project. De bouwphase die in de rapport genoemd wordt, richt zich echter uitsluitend op de fysieke processen die CO₂-emissies genereren (zie Figuur 2.3). In de berekening wordt de productie van onderdelen en materialen echter niet apart berekend, maar worden hiervoor reeds door externe organisaties bepaalde kengetallen gebruikt. Naar deze individuele materiaalgerelateerde eenheden zijn namelijk talloze studies en onderzoeken gedaan, wat het overbodig maakt om dit nog een keer te berekenen. Dit geldt naast de materialen ook voor transport, materieelinzet en dergelijke. Ter verduidelijking zijn de bepaalde elementen **blauw** gemaakt. De onderliggende, **oranje** gekleurde, processen zijn daarbij in de externe onderzoeken reeds meegenomen. Waar een onderliggende proces net als het bovenliggende proces blauw gekleurd is, wil dit zeggen dat het aspect op het lagere niveau niet is meegenomen in de berekening van het bovenliggende proces. Dit geldt voor zowel Figuur 2.3 als Figuur 2.4.



Figuur 2.3: Schematisering CO₂-uitstoot beïnvloedende processen bouwphase.

Wat opvalt, is dat er in het schema uit Figuur 2.2 de exploitatiefase en de sloopfase niet meegenomen wordt. Dit komt omdat de ontwerpteams van WBL hier geen rechtstreekse taken meer in hebben. Toch is het van belang om bij de CO₂-footprintberekening de sloopfase mee te nemen, omdat deze per variant sterk kan verschillen en tevens deel uit maakt van een levenscyclus van een rwzi. WBL is bezig om dit ook door te voeren in de ontwerpen en de contracten aan de hand van integraal ontwerpen. Hierin wordt getracht om op gebied van functionaliteit, fasering, contractering en communicatie met een ontwerp een zo alomvattend mogelijk product aan te leveren. In de sloopfase, die strikt genomen ook meegenomen wordt met integraal ontwerpen, zal tevens uitstoot plaats vinden en zal er, met het oog op duurzaamheid en hergebruik van materialen, winst te behalen zijn in doordachte ontwerpen en materiaalkeuzes. De processen die bij deze sloopfase plaatsvinden zijn te zien in Figuur 2.4. Als er uitsluitend sprake is van modernisering of revisering, zal het schema niet volledig gevolgd hoeven te worden. Zo zal er mogelijk geen amovering of bouwplaatsegalisatie plaats hoeven te vinden.

Van alle materiële stappen en activiteiten uit Figuur 2.3 en Figuur 2.4 zal elk individueel project door het verschil in omvang, omstandigheden en de gekozen zuiveringsprocessen van een ander project verschillen. Het is van belang om allereerst overzichtelijk te maken wat een rwzi is en uit welke



componenten deze bestaat, waarna de exacte kaders van het onderzoek vastgesteld kunnen worden. Hierna wordt met behulp van de LCA-methode bepaald welke handelingen aan het plaatsvinden van de bouw en de sloop van een rwzi toegeschreven kunnen worden. De schematisering van de gehele LCA op het gebied van de CO₂-footprint van een rwzi, inclusief exploitatie, is terug te vinden in bijlage V.

Figuur 2.4: Schematisering CO₂-uitstoot beïnvloedende processen sloopfase

3 De rwzi en de MDR

De MDR is een gemodificeerde variant van de conventionele rwzi. De zuiveringstechnieken verschillen daarbij niet per ontwerpaanpak en gelden als basis van de rwzi. Deze zijn allereerst toegelicht in paragraaf 3.1. Om de MDR te begrijpen is daaropvolgend de conventionele rwzi met de bijbehorende processen toegelicht (paragraaf 3.2). Tot slot is in paragraaf 3.3 de MDR en de ontwerpfilosofie achter deze rwzi toegelicht.

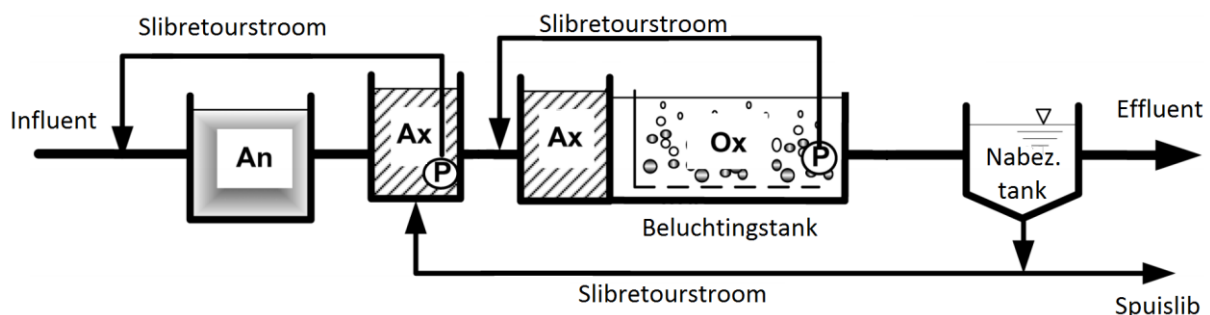
3.1 Zuiveringstechnieken

Het karakter van de MDR staat los van de zuiveringstechniek. De zuiveringstechnieken kunnen in zowel de conventionele als de modulair duurzame rwzi toegepast worden. Het WBL onderscheidt in het rapport 'MDR: De nieuwe standaard' de technieken ulbas-UCT (die heden te dagen in veel installaties wereldwijd wordt toegepast), Nereda® en MBR. Het ulbas-UCT proces ligt ten grondslag aan de andere twee zuiveringstechnieken (paragraaf 3.1.2 en 3.1.3) en wordt daarom als eerste en het meest uitgebreid behandeld. De drie zuiveringsmethoden zijn hieronder toegelicht.

3.1.1 Ulbas-UCT

Ulbas staat voor ultra laag belast actiefslibproces. Deze wordt gecombineerd met het (m)UCT (modified University of Cape-Town) proces. Het UCT-proces dat tegenwoordig wordt toegepast verschilt iets van de originele methode (een extra bezinkstap) en wordt daarom ook vaak het modified (Nederlands: aangepast) UCT proces genoemd. Hoe dit proces binnen de gehele rwzi past, is beschreven in paragraaf 3.2. De opstelling van het UCT-proces ziet er doorgaans als volgt uit (WBL, 2012):

- Biologische reactoren voor denitrificatie, fosfor- en CZV verwijdering;
- Eventueel voorbezinktank voor afvangen van grove slibdeeltjes en andere zwevende deeltjes;
 - o Anaerobe reactor ten behoeve van biologische fosforverwijdering;
 - o Selector voor de bestrijding van licht slib;
 - o Anoxische reactor in de vorm van een voordennitrificatietank;
 - o Eventueel wisselreactor;
 - o Aerobe reactor in de vorm van een nitrificatietank;
- Nabezinktank(s);



Figuur 3.1: Schematisering mUCT-proces. Bron: Water Environment Federation (2007)

Het UCT-proces, dat hierin toegepast wordt, verloopt zoals geschematiseerd is in Figuur 3.1. In de anaerobe reactor (An) wordt er op biologische wijze (idealerweise zonder toevoeging van chemicaliën) gedefosfateerd. Vervolgens wordt in de aerobe reactor (Ox) door middel van beluchting fosfaat opgenomen door het slib. In de eerste anoxische reactor (Ax) vindt dan de voordennitrificatie plaats. In deze reactor wordt het nitraat uit het retourslib gedenitrificeerd met het restant aan afbreekbaar CZV (chemisch zuurstofverbruik) uit de anaerobe tank.

Hierna wordt het slib zonder nitraat vanuit de eerste anoxische reactor (Ax) teruggevoerd naar de anaerobe tank door middel van een slibretourstroom. In een tweede anoxische reactor (Ax) wordt het nitraat dat is gevormd in de aerobe reactor gedenitrificeerd en teruggevoerd met een slibretourstroom. In de aerobe reactor vindt de nitrificatie plaats en wordt het restant aan afbreekbaar CZV omgezet in slib. Indien de biologie te zwaar belast wordt, kan de biologische fosfaatverwijdering nog ondersteund worden met metaalzoutendosering, doorgaans ijzer- of aluminiumzouten (WBL, 2012).

3.1.2 Nereda®

Nereda® is een nieuwe zuiveringstechniek voor industrieel en communaal afvalwater, waarbij gebruik wordt gemaakt van snel bezinkbaar aerob korrelslib (Van der Roest et al., 2011). De zuiveringstechniek verschilt met reguliere actiefslibsystemen door de significant lagere chemische, ruimte- en energievraag alsmede lagere kosten. Deze korrelslib neemt alle biologische zuiveringsstappen uit de vorige paragraaf op zich en bezinkt snel, waardoor er geen nabezinking meer plaats hoeft te vinden na de beluchting, wat een zuiveringsstap en daarmee gigantische nabezinktanks bespaart. Bovendien zijn ook de anaerobe en anoxische tanks vervangen door deze Nereda®-tank, die al deze functies in dezelfde ruimte plaats laat vinden. Dit is te interpreteren als het wegvallen van 2 CL in Figuur 3.1 en vervanging van An, Ax1, Ax2 en Ox1 door de Nereda®-tank(s).

Het korrelslib neemt alle taken (denk aan bijvoorbeeld nitrificatie en defosfatering) stapsgewijs op zich. Omdat dit een vaste volgorde is die in de Nereda®-tank doorlopen wordt, waarna al het slib bezinkt, wordt de zuivering in batches (met een proceslooptijd van ongeveer 6 uur) doorlopen. Daardoor is een buffer voor deze Nereda®-tanks noodzakelijk en zijn er altijd minimaal twee Nereda®-tanks nodig om de capaciteit te waarborgen. Specifieke nadelen ten opzichte van de UCT techniek zijn er tot nu toe nog niet gevonden, al dient hier wel bij vermeld te worden dat deze techniek nog niet volledig uitontwikkeld is.

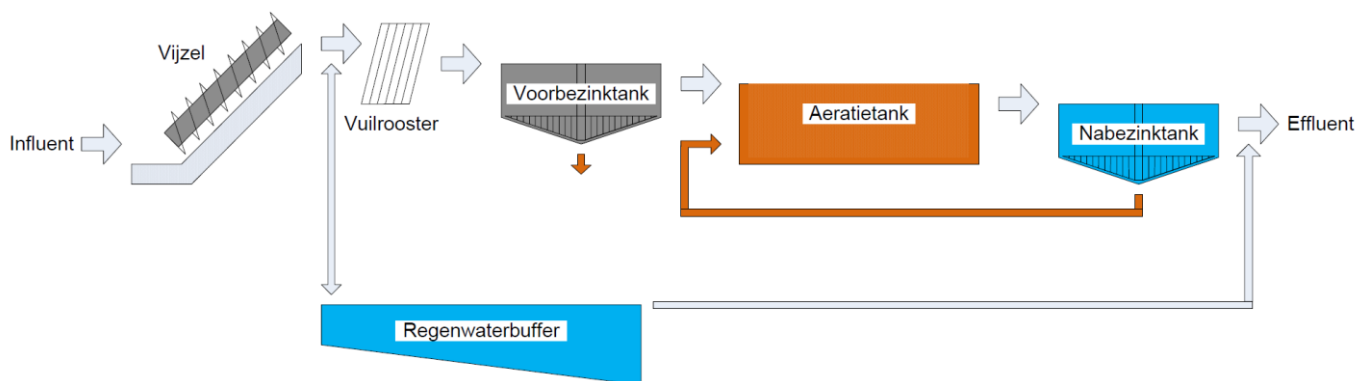
3.1.3 MBR

De membraanbioreactor (MBR) vervangt de nabezinktank in de reguliere rwzi. In Figuur 3.1 zou 2 CL vervangen worden door de MBR. De laatste zuiveringsstap neemt de MBR op zich, die het water zuivert tot op uitzonderlijk hoge effluentkwaliteit. Hierbij zullen enkele kleine modificaties in de voorgaande stappen moeten plaatsvinden. Zo dient het water minder zwevende deeltjes te bevatten en zal er een vetvang geïnstalleerd moeten worden om de vervuiling van de membranen te minimaliseren. Deze vervuiling blijkt met de huidige technieken echter toch nog tot problemen te leiden (Meng et al., 2009). Tevens is deze techniek duur in zowel de investering als de exploitatie (groot energieverbruik). Het voordeel, naast de uitzonderlijk hoge effluentkwaliteit, is dat de installatie door vervanging van de nabezinktank veel compacter gebouwd kan worden. Vanwege de significant hogere exploitatiekosten (energiekosten), wordt deze zuiveringstechniek niet meegenomen in de verdere berekeningen en vergelijkingen in dit rapport.

3.2 Conventionele rwzi

Het doel van een rwzi is om afvalwater te zuiveren, zodat het geloosd kan worden in het oppervlaktewater. Het influent doorloopt de installatie in een aantal stappen, waaronder de zuiveringsstappen uit de vorige paragraaf, tot het effluent de installatie verlaat. Deze zuiveringsprocessen zijn toegelicht in paragraaf 3.1. Een schematisering is weergegeven in Figuur 3.2. De opstelling is weergegeven met toepassing van een versimpelde ulbas-UCT zuiveringsmethode. De ulbas-UCT methode die in Figuur 3.1 beschreven is, zou zo de onderstaande stappen 4, 5 en 6 beslaan. De rwzi's zijn niet in iedere situatie identiek, maar in Limburg zien deze er in grote lijnen als volgt uit (WBL, 2012):

1. Vijzel die het influent de installatie inpompt (influentgemaal), waarna het water stap voor stap, door middel van zwaartekracht, door de installatie stroomt;
2. Vuilrooster die het grof vuil uit het influent haalt, een zandfilter en eventueel een vetvang;
3. Eventueel een regenwaterbuffer die ervoor zorgt dat de nabezinktanks hier niet voor hoeven te functioneren en dus kleiner uitgevoerd kunnen worden.
4. Eventueel voorbezinktank die het fijnere (organische) vuil in de vloeistof laat bezinken. Afhankelijk van het type rwzi wordt hierbij (voornamelijk bij ouderwetse installaties) pre-precipitatie (chemicaliëndosering) toegepast;
5. Beluchting in een aeratietank;
6. Nabezinktank, waar de actiefslibvlokken voor de laatste keer kunnen bezinken;
7. Het effluent (uitvoer) komt gezuiverd uit de installatie.



Figuur 3.2: Schematisatie conventionele rwzi (WBL, 2012)

De kenmerken die deze vorm van rwzi's met zich mee brengen zijn als volgt:

- Statische en massieve constructiebouw;
- Bewezen technieken;
- Goede en goed controleerbare effluentkwaliteit;
- Lange ontwerp- en bouw tijden;
- Robuuste bouw wijze, veelal bestaande uit betonnen constructies en ondergrondse constructiebouw met ondergronds leidingwerk;
- Tijdrovend onderhoud, dat plaatsvindt onder minder aantrekkelijke arbeidsomstandigheden;
- Geen reële mogelijkheid tot flexibiliteit bij externe veranderingen, zoals technologische ontwikkelingen, verandering in afvalwateraanbod, gewijzigde wet- en regelgeving en levering van andere soorten water;
- Groot ruimtebeslag.

De conventionele rwzi bestaat uit verschillende facetten elementen, zoals ook te zien is in Figuur 3.2. Het exacte ontwerp van de rwzi, met als uitgangspunt de rwzi uit rapport 'MDR: de nieuwe standaard' (WBL, 2012), zal afhangen van een van de zuiveringstechnieken uit voorgaande paragraaf 3.1 en ontwerp methode, waaronder de MDR uit paragraaf 3.3, die toegepast wordt.

3.3 Ontwerp MDR

Er zijn verschillende redenen waarom de MDR van toegevoegde waarde is ten opzichte van de conventionele rwzi. De MDR is, zeker op lange termijn, namelijk goedkoper en flexibeler. Waar deze oordelen op gebaseerd zijn komt aan de orde in deze paragraaf. Binnen deze MDR zal, net als bij de conventionele rwzi, zowel de zuiveringsmethode ulbas-UCT als Nereda® in overweging genomen

worden. De losse modules van de MDR zullen allemaal zo ontworpen worden dat deze meteen inzetbaar zijn na aankoppeling, zonder hierbij andere modules te moeten modificeren.

3.3.1 Ontwerpomschrijving

Het verschil tussen de MDR en de conventionele rwzi zit voornamelijk in de voortrein (aanvoerstep) en de middentrein (zuiveringsstep), maar ook gedeeltelijk in de natrein (nageschakelde technieken en afvoerstep). De voortrein bestaat uit het opvoerwerk, de roosters en de zandvang. Al deze modules zijn los afkoppelbaar van een centrale goot/leiding die het water over de compartimenten verdeelt. Verder zullen de losse modules zodanig gedimensioneerd worden, dat deze eenvoudig transporteer- en vervangbaar zijn ('plug&play'-systeem). De gehele voortrein wordt bovengronds opgesteld, wat als bijkomend voordeel heeft, dat het graafwerkzaamheden bespaart. Wel dient er voor constructies van deze omvang evengoed nog een fundering in de grond aangebracht te worden, zij het maar enkele tientallen centimeters (indien op staal). Aanvankelijk is het systeem ontworpen voor rwzi's met een capaciteit van 10.000 tot 100.000 inwonerequivalenten (i.e.). Er liggen reeds echter ontwerpen met grotere capaciteiten, die gebruik maken van meerdere parallel geschakelde systemen. De case die in dit rapport beschreven wordt, gaat uit van 60.000 i.e., wat doorgaans gezien wordt als een gemiddelde zuiveringsinstallatie.

De middentrein bestaat uit de biologische zuiveringsonderdelen en de regenwaterbuffer. De biologische zuiveringstrap zal ook volledig boven maaiveld geïnstalleerd worden. De technieken zijn net als in de voortrein vervangbaar, vervoerbaar en afkoppelbaar en de tanks zijn opgebouwd uit losse elementen. Daardoor zijn deze flexibel in dimensionering en ook tijdens de exploitatiefase aanpasbaar. Tevens zal met de materiaalkeuze van de tanks rekening gehouden worden met duurzaamheid. De tanks kunnen worden gebruikt voor meerdere doeleinden in het zuiveringsproces. De zuiveringsstappen zullen, afhankelijk van de situatie en van verder onderzoek bestaan uit de ulbas-UCT en Nereda® technieken.

De nageschakelde technieken zullen net als in de voortrein eenvoudig aan- en afkoppelbaar, transportabel en vernieuwbaar zijn. In de toekomst kan daardoor eenvoudig worden geanticipeerd op verscherpte kwaliteitseisen en nieuwe innovaties. Ook deze compartimenten zullen volledig bovengronds opgebouwd worden.

De MDR verschilt schematisch niets met de conventionele rwzi die als uitgangspunt zijn genomen in Figuur 3.1 en Figuur 3.2. Het verschil zit daarentegen in de ontwerpen van de individuele onderdelen en de manier van bouwen.

3.3.2 Visie en toekomst

Vanwege de flexibiliteit van de installatie, die gegarandeerd wordt door de modulaire aard van het ontwerp, ligt er naar verwachting van WBL een internationale toekomst voor de MDR in het verschiet. Door middel van octrooien wil het WBL dit gedachtegoed beschermen, wat tevens de mogelijkheid creëert om het concept 'MDR' te gaan vermarkten. De duurzaamheid van de installatie zal echter grotendeels van de gebruikte materialen en bouwmethoden en de zuiveringsmethode afhangen en zal dus niet heel veel verschillen met een goed doordachte conventionele rwzi. Wel zorgt de gewaarborgde flexibiliteit voor duurzaamheid tijdens de exploitatie- en sloopfase vanwege herbruikbaarheid van materialen en onderdelen.

Het punt waar deze MDR de conventionele rwzi in de exploitatiefase ruimschoots voorbij schiet, is wanneer er aanpassingen aan de installatie gepleegd moeten worden. Modules hoeven er niet meer uitgesloopt of wekenlang gerepareerd te worden, maar kunnen met het 'plug & play'-systeem snel (enkele uren tot dagen) verwijderd, bijgeplaatst of vervangen worden. Er zullen reservemodules

gebouwd worden, die verwisseld worden met een onderdeel dat aan reparatie of onderhoud onderhevig is. Tevens is het mogelijk om modules van verschillende locaties te verwisselen als externe factoren hier aanleiding toe geven. WBL is er echter wel op gericht om de installatie in duurzame materialen te bouwen en waar mogelijk op het gebied van energie grotendeels zelfvoorzienend te worden. Tevens wordt gestreefd naar toepassing van de meest milieuvriendelijke en energiezuinige zuiveringsmethoden in de rwzi. Een 'artist impression' van de MDR, die in het kader van vermarkting de naam Verdygo is gaan dragen, is te zien in Figuur 3.3.



Figuur 3.3: Impressie concept Verdygo met vierkante tanks. Bron: WBL (2013).

3.3.3 Opbouw en beperkingen MDR-berekeningen

De MDR bestaat uit verschillende losse componenten, die elk uit verschillende elementen bestaan. Een module zal namelijk uit verschillende pompen, kleppen en dergelijke bestaan. Per component en per element zijn er verschillende factoren die van invloed zijn op de CO₂-footprint. Tevens zijn er verschillende zuiveringsmethoden, die elk verschillende componenten vereisen.

In tegenstelling tot in de conventionele rwzi is de MDR bovengronds opgebouwd. Hierdoor kan het bijvoorbeeld gefundeerd worden op prefab Stelcon® vloerelementen. In de inventarisatie van materiaalgebruik zitten echter nog hiaten. Door WBL wordt er per materiaalsoort doorgaans 10% onvoorzien toegevoegd die deze gebreken in de berekening compenseren, wat ook in dit onderzoek is gebeurd. Dit zal de nauwkeurigheid van de hoeveelheid materialen beïnvloeden, maar zal geen groot effect op het totaal hebben. Deze hiaten zijn als volgt:

- De MDR is nog niet tot in het kleinste detailniveau uitgewerkt. Hierdoor zijn er voor de materiaalstromen koper, aluminium en kunststof geen precieze hoeveelheden bekend. Tevens zijn veel van deze materialen in aangeleverde installaties verwerkt, waardoor niet te achterhalen is hoeveel er aanwezig is. Hiervoor zijn schattingen gemaakt en waar dit niet mogelijk was, zijn deze achterwege gelaten en vallen deze binnen de bovenstaande 10%. Omdat de relatieve afwijking naar verwachting in iedere installatie ongeveer gelijk is, heeft dit op de resultaten in de onderlinge vergelijking weinig effect.
- Het materiaal dat gebruikt is in fabricagetools, zoals bouw materieel en machines, die de bouw ondersteunen zijn niet inbegrepen in de inventarisatie. Deze zijn namelijk niet afhankelijk van de bouwwijze en bovendien niet exact te achterhalen.

In dit rapport zijn naast de varianten binnen de MDR ook dezelfde varianten binnen de conventionele rwzi vergeleken. De effluenteisen zijn gesteld op N=10mg/l en P=1 mg/l, omdat dit reële richtlijnen zijn, die in overeenstemming zijn met het KRW. Dit zal neer komen op de volgende varianten (zie Tabel 3.1). De Blokschema's van de onderdelen en processen en een schematische weergave van de Nereda® en de ulbas-UCT processen van een installatie, met als uitgangspunt de omstandigheden van de rwzi in Wijlre, zijn terug te vinden in Bijlage III. Ook de zuiveringsmethoden zijn in deze bijlage geschematiseerd.

Tabel 3.1: varianten rwzi voor CO₂-footprint vergelijking

Code	Concept
rwzi 1a	MDR, Ulbas-UCT, N=10 mg/l en P=1 mg/l
rwzi 1b	MDR, Nereda [®] , N=10 mg/l en P=1 mg/l
rwzi 2a	Conventioneel, Ulbas-UCT, N=10 mg/l en P=1 mg/l
rwzi 2b	Conventioneel, Nereda [®] , N=10 mg/l en P=1 mg/l

4 CO₂-Footprint

In paragraaf 4.1 is beargumenteerd waarom er voor de CO₂-footprint is gekozen. Dit is aan de hand van de achtergronden van de verschillende footprints onderzocht. Daaropvolgend is de achtergrond en definitie van de CO₂-footprint gegeven. De exacte aanpak van de methodiek is reeds uitgewerkt in paragraaf 2.2. De numerieke uitwerking van de footprints is gegeven in hoofdstuk 6 en is terug te vinden in het spreadsheet 'CO2-footprint rwzi - MDR.xlsx'.

4.1 Footprints

De duurzaamheids-, omgevings- en milieuaspecten zijn de laatste jaren veelvuldig onderzocht aan de hand van de footprints (Nederlands: voetafdrukken) van stoffen of ketens. Enkele van deze footprints zijn: water footprint, digital footprint, CO₂-footprint, climate footprint en ecological footprint. Elk van deze methodieken heeft zijn eigen specificaties en is ontworpen op basis van andere visies en uitgangspunten. Voor de beoordeling van de rwzi's en in het bijzonder de MDR's, worden de laatste drie van deze footprints behandeld en zal worden bepaald waarom de CO₂-footprint het meest geschikt en relevant is. De andere twee footprints, de water- en de digital footprint, zeggen niets over uitstoot van broeikasgassen en worden daarom buiten beschouwing gelaten in deze analyse. Het kenmerk van een 'footprint' is, dat de hele keten van elk individueel product of proces wordt meegenomen en niet enkel de rechtstreeks te meten uitstoot of verbruik. Dit gebeurt over de hele levenscyclus van een bepaald product, dienst of proces op basis van het Life Cycle Assessment (LCA, zie paragraaf 4.3). Omdat de doelstelling uitsluitend het in kaart brengen van broeikasgassen is, zijn andere milieubeoordelingsmethodieken niet in overweging genomen.

4.1.1 CO₂-footprint

De meest bekende en tevens meest voorkomende footprint op het gebied van milieubeoordeling is de CO₂-footprint. Deze wordt door Wright et al. (2011) beschreven als "een maat voor de totale hoeveelheid CO₂ van een bepaalde populatie, systeem of activiteit, met daarin alle relevante bronnen en opslag binnen ruimtelijke en tijdsgebonden begrenzing van de populatie, systeem of activiteit die onderzocht worden. Deze wordt als CO₂ equivalent berekend met in acht name van het aardopwarmingsvermogen over 100 jaar (GWP100)". Dit wil zeggen dat deze eenheid gelijk staat aan de schadelijkheid over 100 jaar van de hoeveelheid uitgestoten CO₂ over de gehele productie-, gebruiks- en afbraakcyclus van een product.

4.1.2 Climate footprint

De climate footprint is een uitgebreidere versie van de CO₂-footprint (Wiedmann en Minx, 2007). Alle aspecten binnen de levenscyclus van het product, de keten of het proces worden hierin meegenomen (Van Kleef, 2011). Het grote verschil met de CO₂-footprint is hierbij dat alle broeikasgassen worden meegenomen in de resultaten. De uiteindelijke output is het jaarlijkse broeikaspotentieel over 100 jaar (GWP100), uitgedrukt in het CO₂-equivalent (CO₂-e). Hierin wordt alle uitstoot van broeikasgassen met behulp van conversiefactoren omgezet naar de hoeveelheid CO₂ die eenzelfde effect veroorzaakt zou hebben. De Global Warming Potentials (GWP) over 100 jaar zijn door het IPCC (2007)¹ vastgesteld op 25 voor methaan en voor lachgas op 298. Hierbij geldt koolstofdioxide als referentie met een waarde 1. Dit wil zeggen dat 1 kilogram methaan over 100 jaar dezelfde milieueffecten tot gevolg heeft als 25 kilogram koolstofdioxide en dat 1 kilogram lachgas die nu uitgestoten wordt over 100 jaar een gelijkwaardige belasting op het milieu heeft als 298 kilogram koolstofdioxide. Al deze verschillende CO₂-e worden bij elkaar opgeteld en vormen de climate footprint.

¹ Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) is een organisatie, dat als onderdeel van de Verenigde Naties de risico's van klimaatveranderingen in kaart brengt en evalueert.

4.1.3 Ecological footprint

De ecological footprint (Nederlands: ecologische voetafdruk) is de eerste 'footprint' (Safire, 2008) en beschrijft de vraag naar bruikbare middelen uit ecosystemen op de aarde en de mate waarin de aarde hierin aan deze behoefte kan voorzien. Het is een gestandaardiseerde maat in hectares landgebruik per hoofd van de wereldbevolking die de vraag naar natuurlijk kapitaal vergelijkt met de ruimtelijke en ecologische capaciteit van de aarde om het aanbod te regenereren. Vaak wordt dit ook bepaald per regio, per land of per continent. Het uiteindelijke getal is altijd omgerekend in het aantal malen van de vraag naar vruchtbaar land (of water) ten opzichte van het aanbod. Alle verbruikte elementen, zoals grondstoffen, energie, water, emissies en eten worden omgezet in hectares landgebruik. Het doel hiervan is om te achterhalen hoe de mensheid gebruik maakt van de ecologische diensten die de aarde op het moment kan leveren ten opzichte van de hernieuwbaarheid van de ecologie (Ewing et al., 2010).

4.1.4 Conclusie footprints

De ecological footprint valt als eerste af, aangezien deze footprint kijkt naar de gehele aarde of een groot gedeelte hiervan. Een individuele rwzi zal niet significant bijdragen aan het broeikaseffect en zal geen substantieel effect hebben op de totale ecological footprint. Daarbij is het in de branche niet gebruikelijk om duurzaamheid in deze footprint uit te drukken, waardoor de uitkomst van het onderzoek niet te vergelijken valt met resultaten van andere onderzoeken.

Het verschil tussen de CO₂-footprint en de climate footprint zit in de nauwkeurigheid van de methodieken. Omdat het bij de beoordeling van de MDR's voornamelijk over onderlinge relatieve beoordelingen gaat, zal het onderlinge beeld tussen varianten niet veranderen en is het onnodig om de climate footprint toe te passen. Eveneens is het de vraag of de beschikbare informatie toereikend is om hier een reëel en waarheidsgetrouw getal aan te koppelen. Als in het onderzoek het doel was geweest om de uitstoot tijdens de exploitatiefase te berekenen, zou de climate footprint echter veruit het meest geschikte zijn. Hierin wordt namelijk ook de lachgas en methaan uitstoot meegenomen, die bij de zuiveringsprocessen in de exploitatiefase een significante milieubelasting ten opzichte van de CO₂ vormen (Daelman et al., 2013; Listowski et al., 2011). Voor uitsluitend de beoordeling van de bouw en de sloop is de CO₂ veruit het meest prominente broeikasemissiegas en is de CO₂-footprint als duurzaamheidsbeoordelingsmethodiek het meest geschikt.

4.2 Definitie CO₂-footprint

In het rapport is reeds globaal ingegaan op de term CO₂-footprint, maar waar dit begrip begint en eindigt is nog niet helemaal duidelijk beschreven en CO₂-footprint daarbij niet universeel vastgelegd. De basisgedachte, de visie en de afbakening hiervan is in deze paragraaf beschreven.

De laatste paar jaren is de term 'CO₂-footprint' steeds populairder geworden en daardoor steeds meer als 'buzzwoord' gebruikt door bedrijven en organisaties die iets willen zeggen over de duurzaamheid van hun producten of diensten. Een nadeel die aan deze populariteit hangt, is dat de definitie van de term is gaan vervagen en tevens andere vormen aan is gaan nemen. Als gevolg daarvan wordt de oorspronkelijke gedachte nogal eens uit het oog verloren.

Veel instanties, onderzoeks- en adviesbureaus hebben de term al willen uitkristalliseren, maar zowel het gedachtegoed als het doel dat de verschillende instanties met deze term hebben willen beschrijven verschilt erg van elkaar. Wiedmann en Minx (2007) hebben enkele van deze definities op een rij gezet, welke zijn te zien in Tabel 4.1.

Tabel 4.1: Verschillende definities CO₂-footprint

BRON	DEFINITIE
BP (2007)	"The carbon footprint is the amount of carbon dioxide emitted due to your daily activities – from washing a load of laundry to driving a carload of kids to school."
British Sky Broadcasting (Patel, 2006)	"The carbon footprint was calculated by "measuring the CO ₂ equivalent emissions from its premises, company-owned vehicles, business travel and waste to landfill."
Carbon Trust (2007)	"... a methodology to estimate the total emission of greenhouse gases (GHG) in carbon equivalents from a product across its life cycle from the production of raw material used in its manufacture, to disposal of the finished product (excluding in-use emissions)."
Energetics (2007)	"...the full extent of direct and indirect CO ₂ emissions caused by your business activities."
ETAP (2007)	"...the 'Carbon Footprint' is a measure of the impact human activities have on the environment in terms of the amount of greenhouse gases produced, measured in tons of carbon dioxide."
Global Footprint Network (2007)	"...the demand on bio capacity required to sequester (through photosynthesis) the carbon dioxide (CO ₂) emissions from fossil fuel combustion."
Grub & Ellis (2007)	"A carbon footprint is a measure of the amount of carbon dioxide emitted through the combustion of fossil fuels. In the case of a business organization, it is the amount of CO ₂ emitted either directly or indirectly as a result of its everyday operations. It also might reflect the fossil energy represented in a product or commodity reaching market."
Parliamentary Office of Science and Technology (POST, 2006)	"A 'carbon footprint' is the total amount of CO ₂ and other greenhouse gases, emitted over the full life cycle of a process or product. It is expressed as grams of CO ₂ equivalent per kilowatt hour of generation (g CO ₂ -e/kWh), which accounts for the different global warming effects of other greenhouse gases."

In dit rapport zal de CO₂-footprint uitsluitend de uitstoot van CO₂ betreffen. Het betreft de totale CO₂ emissie van de complete levenscyclus van alle betreffende procesketens binnen de waterzuiveringsprocessen en –installaties. De definitie die in het vervolg gehanteerd wordt, is als volgt:

"De CO₂-footprint geeft het aantal kilogram uitgestoten CO₂ dat direct of indirect te linken is aan het bestaan en of plaatsvinden van een activiteit of product over de gehele levenscyclus over elke keten van een component of activiteit."

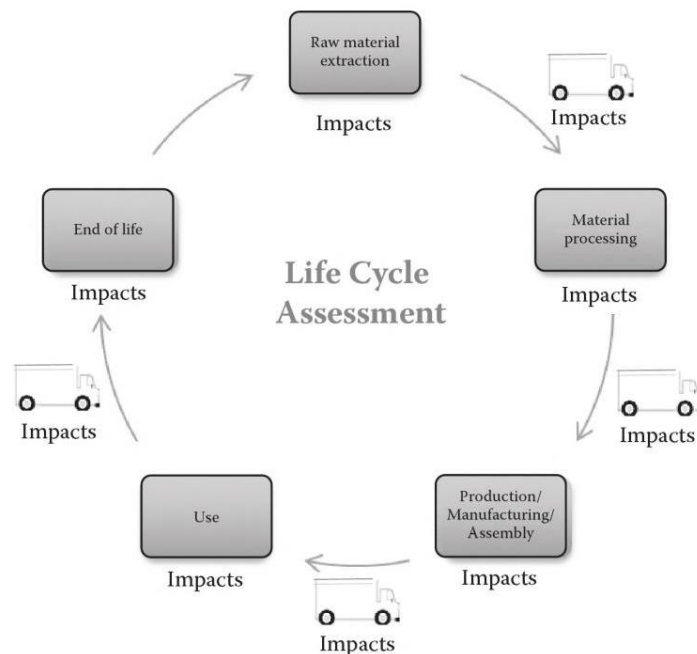
Alle factoren worden hierin meegenomen die ten gevolge van het bestaan van een product, proces of dienst sporen achter laten op de hoeveelheid CO₂ in het ecologische systeem. Denk hierbij aan het delven van grondstoffen, maar ook bijvoorbeeld aan het transport en verwerking van materialen. Dit wordt bepaald door volledige levensfasen van een product of proces in overweging te nemen. Deze analyse wordt uitgevoerd aan de hand van een Life Cycle Assessment (LCA).

4.3 Toepassing Life Cycle Assessment op case

Een belangrijk aspect van deze definitie van de CO₂-footprint is het feit dat er gekeken wordt over een of meerdere complete levensfasen van een product of dienst en alle processen en ketens die binnen deze levenscyclus vallen. Dit wordt ook wel omschreven als de Life Cycle Assessment (LCA, in het Nederlands levenscyclusanalyse). Deze LCA wordt door Franchetti en Apul (2013) omschreven als het onderzoek en evaluatie van de milieu-impact van een bepaald product of dienst veroorzaakt door zijn

bestaan. Het doel van deze analyse is het inzichtelijk maken van de gevolgen van een bepaald product of dienst op de omgeving. De schematisering hiervan is weergegeven in Figuur 4.1. De CO₂-footprint is dus de optelsom van de uitgestoten CO₂ over deze gehele cyclus over elk specifiek component waaruit het product, de MDR, bestaat. Omdat de exploitatiefase niet wordt meegenomen, zal deze LCA onvolledig uitgevoerd worden over de levenscyclus van een rwzi, maar per fase die wel wordt meegenomen (bouw en sloop), zal deze daarentegen volledig worden gevolgd.

In de TEO zijn echter uitsluitend de materialen van de onderdelen meegenomen. Van deze materialen is wel de gehele LCA doorlopen, maar met verdere fabricage en implementatie van de onderdelen, transport en arbeid is geen rekening gehouden. In de CO₂-footprintberekening zal dit echter wel meegenomen worden, maar in de onderlinge vergelijking met TEO wordt dit achterwegen gelaten, om te voorkomen dat op afwijkende aspecten vergeleken wordt.



Figuur 4.1: Schematisering LCA. Bron: Franchetti en Apul (2013).

4.4 Materiaalspecificaties en aannames CO₂-footprint

Uit een grote hoeveelheid literatuur zijn van alle procesgerelateerde zaken die binnen de materiële kant van de bouw van een MDR vallen de losse kengetallen van de CO₂-footprints verzameld. Indien er meerdere relevante bronnen voor een bepaald onderdeel gevonden zijn, is telkens de meest actuele bron als leidend beschouwd, daarbij aangenomen dat alle wetenschappelijke artikelen en publicaties door middel van een grondige literatuurstudie de reeds bestaande waarden in overweging hebben genomen. De resulterende lijst is terug te vinden in Bijlage II. Al deze waarden zijn berekend aan de hand van het ghg-protocol (zie paragraaf 2.2.2), waarop tevens 'ISO 14064: Carbon Footprint' gebaseerd is. Deze ISO-publicatie is het eerste initiatief tot internationale standaardisatie van de CO₂-footprint.

Omdat de mogelijke CO₂-uitstoot die uit niet-fossiele organische stoffen geëmitteerd wordt (denk aan bomen en planten) kortcyclisch is en dus netto niet bijdraagt aan het broeikaseffect, wordt deze ook niet meegenomen in de CO₂-footprint. De CO₂-uitstoot van houtproducten zijn berekend in twee fasen. De uitstoot van het ruwe materiaal is allereerst op de dezelfde wijze berekend als alle andere materialen. Vervolgens is het opgenomen CO₂ van de groeiende boom berekend en hier van afgehaald.

Dit betekent dat houtproducten, na verbranding, een CO₂-neutrale uitstoot hebben, zijnde de netto CO₂ uitgestoten door de productie van het product met inbegrip van de absorptie tijdens de teelt van de boom (Alcorn, 2003). Dit is tevens de kortcyclische aard van de CO₂-uitstoot van houtproducten.

Bij de keuze van materialen is rekening gehouden met de recyclebaarheid van de grondstof. De gehanteerde aannames die hierbij gemaakt zijn, zijn in de literatuur anders dan in de TEO-berekeningen. Zowel voor de absolute CO₂-berekening als voor de vergelijking met de TEO is een lijst met aannames opgesteld (WBL, 2012). Allereerst staat hieronder de lijst met aannames die ook bij de TEO-berekening gehanteerd is:

- Staal kan na de levensduur van de installatie voor 100% worden hergebruikt.
- Beton kan voor 20% als hoogwaardig materiaal worden hergebruikt. Het overige beton kan nog gebruikt worden voor de fundering van wegen, maar wordt als niet-recyclebaar beschouwd door de sterke kwaliteitsdaling.
- Hout wordt niet hergebruikt, maar is wel een forse energiedrager (wat bij verbranding vrij komt) en heeft voor het gebruik in de installatie CO₂ omgezet in zuurstof. Er is gekozen voor naaldhout.

Om de CO₂-footprint zo nauwkeurig mogelijk op te stellen zijn er meer en specifiekere aannames gedaan dan bij de TEO berekeningen. De lijst die uitsluitend voor de CO₂-footprintberekening gebruikt is, is als volgt:

- Hout wordt voor 61% gerecycled tot spaanplaat, voor 36% tot brandstof in biomassacentrales, voor 2% voor inzet voor secundaire brandstof en voor 1% voor verbranding in een afvalverbrandingsinstallatie (hierna AVI) (Bijleveld et al., 2014).
- 50% van het kunststof wordt gerecycled. De rest wordt verbrand in een AVI (Bijleveld et al., 2014).
- Gegalvaniseerd staal bestaat voor 2% uit zink en 98% uit staal (afgeleid uit NEN-EN-ISO 1461).
- Constructie- en wapeningsstaal bestaat voor 92% uit schroot². Ook de kentallen van overige stalen onderdelen zijn hierop gebaseerd.
- Stalen constructieonderdelen worden tot 49% onveranderd hergebruikt en voor 51% omgesmolten (Stichting MRPI, 2013).
- Het aandeel schroot in de staalproductie zal in de nabije toekomst (10-20 jaar) niet substantieel veranderen.
- Koper wordt voor 78% gerecycled en aluminium voor 68% (Bijleveld et al., 2014).

De verdere aannames die zijn gedaan betreffende het wapeningsaandeel in beton zijn als volgt:

- Betonelementen bevatten 150 kg wapeningsstaal per m³ beton.
- Groot betonnen leidingwerk (ø > 700mm) bevat 30 kg wapeningsstaal per m³ beton.
- Klein betonnen leidingwerk (ø < 700mm) bevat geen wapening.

Hierbij is de verwachte levensduur van staal en beton 60 jaar en heeft hout een verwachte levensduur van 15 jaar. De installatie als geheel heeft een levensduur van 30 jaar en de installatietechnische (werktuigbouwkundige) onderdelen worden na 15 jaar technisch afgeschreven en zullen dus op de helft van de levensduur van een rwzi vervangen moeten worden.

² Deze informatie is verkregen met medewerking van dhr. B. Hoekstra Bonnema, general manager van TATA-Steel. Ook de verdere aannames betreffende staal en ijzerproducten zijn gedaan op basis van het advies van dhr. Hoekstra Bonnema.

5 TEO

Een doelstelling van het onderzoek is om de resultaten van de CO₂-footprint te vergelijken met de resultaten van de TEO en hier een link tussen te leggen. De deelresultaten CO₂-footprint zijn in hoofdstuk 4 berekend, terwijl de TEO resultaten nog niet aan bod zijn gekomen. Om een vergelijking – en wellicht een koppeling – te leggen tussen de CO₂-footprint en de TEO, is allereerst de TEO berekening geanalyseerd, om de CO₂ berekeningen eerlijk met de TEO berekening te kunnen vergelijken. Nadat de TEO-methodiek toegelicht is in dit hoofdstuk, zullen de resultaten van de TEO weergegeven, geanalyseerd, bediscussieerd en met de CO₂-footprint vergeleken worden in hoofdstuk 6.

Om de achterliggende gedachte van de TEO te beschrijven, is allereerst bepaald waarom deze methodiek is ontworpen en waarom de reeds bestaande methodieken niet voldeden. Hierna worden de uitgangpunten van de methodiek beschreven, waarna de keuzes binnen de methodiek verklaard kunnen worden.

5.1 Ontstaan TEO

In opdracht van stichting Rioned ontwikkelde ingenieurs van adviesbureaus DHV en Tauw in 2011 een methode om energieverbruik in het Nederlandse waterwezen in kaart te brengen en hier advies over uit te brengen. Hieruit kwam destijds de publicatie ‘Water en energie’ (De Brauw et al., 2012) voort. Naar aanleiding hiervan heeft WBL contact opgenomen met Tauw met de vraag of ze deze beoordelingsmethodiek op de rwzi’s wilden specificeren. De methode die hier voor gebruikt is, is destijds in samenwerking met Tauw en WBL geschreven door een van de medeauteurs van ‘Water en energie’, dr. J. Kluck, en heeft de naam TEO gekregen.

5.2 Afweging TEO

TEO staat voor Total Energy of Ownership, letterlijk vertaald: totale energie van bezit. Hiermee wordt de totale energie bedoeld die direct of indirect te koppelen is aan een product over de gehele levenscyclus van het product. Al in 1974 kwam het eerste rapport uit die deze totale energie berekend met behulp van de ‘Energy Analysis’ (IFIAS, 1974). Deze methode is echter zeer gedetailleerd.

Voor de onderlinge energievergelijking van rwzi’s is het hoge detailniveau van de ‘Energy Analysis’ echter totaal irrelevant. Er wordt namelijk uitsluitend gezocht naar een globale inschatting van het energieverbruik en naar hoe bepaalde zuiverings- en installatietechnieken zich in deze ten opzichte van elkaar verhouden. Als gevolg hiervan is TEO ontworpen, die wel gebruik maakt van de door IFIAS (1974) opgestelde GER (gross energy requirement) waarden, maar men uitsluitend het energieverbruik van de bouwmaterialen (inclusief recycling) en het energieverbruik van de exploitatiefase in de berekening meeneemt. Deze GER waarden geven de totale energie in Joules van een product, bepaald over de hele levenscyclus. Naast deze GER waarden van materialen, is het voor een reële energiebeoordeling van rwzi’s van belang om de ingekochte energie die in de exploitatie zit eveneens mee te nemen, omdat dit energieverbruik in tegenstelling tot de bouw- en de sloopfase zeer hoog en variabel per zuiveringstechniek is. De exploitatiekosten zitten grotendeels in de energie-inkoop. Om de exploitatiekosten in kaart te brengen is het van belang om de impact van installatie- en zuiveringstechniekekeuzes op het energieverbruik inzichtelijk te maken. Op het gebied van milieu en duurzaamheid zal deze methodiek echter niet zoveel zeggen, omdat op het gebied van milieu een ontzetten groot verschil zit in de energieproductiemethoden en hierdoor een milieubewuste energie-inkoop van veel groter belang is dan een marginaal verschil in de inkoophoeveelheden.

5.3 Uitgangspunten TEO

De TEO, toegepast op de MDR's en andere varianten van de rwzi, betreft niet de gehele cyclus van de rwzi. Uitsluitend op de volgende punten is beoordeeld:

- Exploitatiefase:
 - gerekend met een levensduur van 30 jaar voor de civiele en 15 jaar voor werktuigbouwkundige installaties;
 - Uitstoot van warmte en gasen tijdens zuiverings- en vergistingsprocessen worden niet meegenomen.
- Aanlegfase:
 - Uitsluitend de meest gebruikte materialen worden in de berekening meegenomen;
 - Alleen grondwerk wordt naast materiaalgebruik meegenomen;
 - Dezelfde rwzi-componenten als in bijlage III, en dus bij de CO₂-footprint zijn gebruikt.

Net als bij de CO₂-footprintberekening zijn in het rapport 'MDR: De nieuwe standaard' aannames gedaan om de berekening niet onnodig complex te maken. De materiaalconstanten zijn uit het rapport 'MDR: De nieuwe standaard' gehaald, maar zijn daarnaast ook algemeen geldende constanten. De levensduren van de installatie(onderdelen) zijn gebaseerd op de technische afschrijvingstermijnen van de onderdelen. De volgende uitgangspunten en aannames zijn hierbij gedaan:

- Materiaalconstanten:
 - Soortelijke dichtheid beton, ρ_{beton} : 2.400 kg/m³
 - Soortelijke dichtheid staal, ρ_{staal} : 7.800 kg/m³
 - Soortelijke dichtheid water, ρ_{water} : 1.000 kg/m³
 - Zwaartekrachtversnelling, g: 9,81 m/s²
- Levensduur in jaren:
 - Civiel bouwwerk op rwzi: 30
 - Mechanisch en elektrisch op rwzi: 15
 - Gemaal mechanisch elektrisch: 15
 - Gemaal bouwkundig: 45
 - rwzi als geheel: 30

De berekeningen die hierbij gemaakt zijn en de analyses die zijn uitgevoerd zijn terug te vinden in het rapport 'MDR: De nieuwe standaard' en in het specifiek 'Appendix 10: Duurzaamheid' (WBL, 2012). De resultaten zijn te vinden in hoofdstuk 6, waarin deze ook geanalyseerd zijn en vergeleken worden met de CO₂-footprint.

6 Resultaten

Allereerst zijn in dit hoofdstuk de resultaten van de CO₂-footprint (paragraaf 6.1) en de TEO (paragraaf 6.2) gegeven en zijn de resultaten geanalyseerd. De resultaten van de CO₂-footprint zijn opgesplitst in de bouw- en de slooffase. Vervolgens is de CO₂-footprint vergeleken met de TEO in paragraaf 6.3 en tot slot is het theoretische verband tussen CO₂-emissies en energie vergeleken in de analyse. De conclusies die uit deze analyses zijn getrokken, zijn terug te vinden in hoofdstuk 7.

6.1 Resultaten CO₂-footprint

De concepten die onderling op basis van de case uit 'MDR: De nieuwe standaard' vergeleken worden zijn niet hetzelfde als bij de TEO-analyse, waar ook naar verschillende effluenteisen is gekeken. De variant conventioneel Nereda® is in TEO-analyse niet meegenomen. De varianten met effluentkwaliteit met N=16mg/l en P=0,5 zijn in de CO₂-footprint niet meegenomen, omdat deze waarden in de praktijk nergens toegepast gaan worden en omdat de effluentkwaliteit geen grote invloed heeft op de aspecten binnen de bouw- en de slooffase. Allereerst zijn de resultaten van de bouwfase behandeld. Vervolgens is de slooffase geanalyseerd en ten slotte zijn de totalen beschreven. De totalen zijn telkens afgerond op tonnen CO₂.

Ter recapitulatie:

- rwzi 1a MDR ulbas-UCT
- rwzi 1b MDR Nereda®
- rwzi 2a Conventioneel ulbas-UCT
- rwzi 2b Conventioneel Nereda®

6.1.1 CO₂-footprint bouwfase

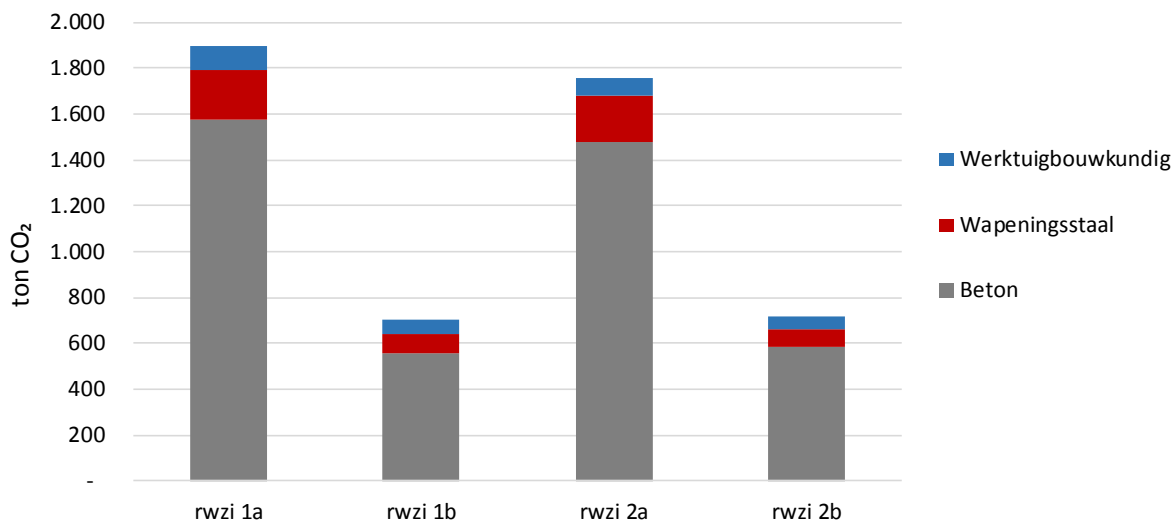
De bouwfase is opgesplitst in CO₂-uitstoot uit materiaalproduct, materiaaltransport, materieelinzet en arbeid. In deze volgorde is in deze paragraaf de CO₂-footprint uit de bouwfase samengesteld.

6.1.1.1 CO₂-footprint uit materiaal

Door per rwzi-onderdeel, die uit bijlage III gehaald zijn, de hoeveelheden materiaal te bepalen en dit met de kengetallen uit bijlage II en de aannames uit hoofdstuk 4 te combineren, is de materiële kant van de CO₂-footprint berekend. De exacte hoeveelheden, per kilogram, zijn terug te vinden in het spreadsheet "CO₂-footprint rwzi - MDR.xlsx". Per onderdeel, zoals in de blokschema's uit bijlage III te zien is, de footprint berekend. Deze zijn opgesplitst in een civiel en een werktuigbouwkundig gedeelte. Het civiele gedeelte omvat het beton en het wapeningstaal en onder het werktuigbouwkundige gedeelte vallen de installaties, waarin enkel aluminium en gegalvaniseerd staal zijn meegenomen, omdat deze veruit het meest prominent aanwezig zijn. De uitstoot die aan het bestaan van deze materialen toe te schrijven is, wordt veroorzaakt bij de productie, waardoor deze emissies volledig binnen scope 3 vallen (zie paragraaf 2.2.2). Een samenvatting van deze resultaten is in Tabel 6.1 weergegeven en is gevisualiseerd in Figuur 6.1.

Tabel 6.1: Samenvatting CO₂-footprint uit materiaalproductie en fabricage

	rwzi 1a	rwzi 1b	rwzi 2a	rwzi 2b
Beton	1.576.767	560.371	1.481.123	583.624
Wapeningsstaal	218.111	77.419	200.777	77.313
Werktuigbouwkundig	102.549	66.918	72.259	54.814
Totaal (kg CO₂)	1.897.400	704.710	1.754.200	715.750



Figuur 6.1: CO₂-footprint per variant naar materiaaltype

De CO₂-emissie ten gevolge van de materiaalproductie beslaat in twee van de vier varianten meer dan 50% van de gehele footprint. De grootte van de uitstoot uit materiaal van de footprint verschilt echter zeer sterk per variant. De oorzaak hiervan ligt bij het feit dat de hoeveelheid materiaal – en in het bijzonder beton en wapeningsstaal – sterk per variant varieert.

Doordat de ulbas-UCT varianten, 1a en 2a, meer betonnen tanks bevatten, zoals de nabezinktanks, is de CO₂-footprint van het materiaalgebruik van varianten 1a en 2a groter dan de totale CO₂-footprint van Nereda® varianten 1b en 2b. Ook de hoeveelheid aluminium in de rwzi's hangt af van de hoeveelheid tanks, omdat het aluminium zich vooral bevindt in de ruimerbruggen van de tanks. Omdat de MDR-varianten een metalen 'goot' hebben en doordat de modulaire aard extra voorzieningen vereist, is de uitstoot uit het aluminium en gegalvaniseerd staal bij de MDR's (1a en 1b) groter dan bij de conventionele varianten (2a en 2b).

6.1.1.2 Materiaal naar herkomst

Het gebruikte materiaal in de installaties zal niet volledig gerecycled kunnen worden. De vraag is hoe deze materialen verwerkt worden. Een overzicht van de hoeveelheden van deze onderverdeling is te zien in Tabel 6.2. Omdat het betonaandeel veruit het grootste is in de installaties (circa 92%), is dit materiaal vanwege de degradatie (tot granulaat of fundering) als niet-recyclebaar (afval) beschouwd. Daarbij moet wel in acht genomen worden dat beton voor bijna 100% tot granulaat in nieuw beton te verwerken is (Van der Poel, 2007). Doorgaans wordt in betonnen installaties 20% granulaat gebruikt zonder dat dit significant kwaliteitsverlies tot gevolg heeft. Daarom is er voor gekozen om in de berekening beton voor 20% uit gerecycled materiaal te laten bestaan (granulaat). Verder valt op dat de rest van de materialen voor alle varianten voor meer dan de helft in het tabelgedeelte 'recyclebaar materiaal' staat, wat er op duidt dat de metalen bijna volledig te recyclen zijn. Dit zijn tevens de recycleverhoudingen die gebruikt zijn in de berekening van de CO₂-footprints per materiaal. De twee tabellen bij elkaar opgeteld vormen de totale hoeveelheid materiaal in kilogram.

Tabel 6.2: Materiaalhoeveelheid opgesplitst in kilogram recyclebaar materiaal en afvalmateriaal

Totaal afvalmateriaal					
	Wapeningsstaal	Betonblok	Gegalvaniseerd staal	Aluminium, gegoten	Totaal (kg)
rwzi 1a	49.571	7.933.420	12.461	3.731	7.999.183
rwzi 1b	17.595	2.819.476	10.424	1.144	2.848.639
rwzi 2a	45.631	7.452.192	7.766	3.221	7.508.810
rwzi 2b	17.571	2.936.472	8.329	1.021	2.963.393

Totaal recyclebaar materiaal					
	Wapeningsstaal	Betonblok	Gegalvaniseerd staal	Aluminium, gegoten	Totaal (kg)
rwzi 1a	570.063	1.983.355	143.299	7.929	2.704.646
rwzi 1b	202.346	704.869	119.871	2.431	1.029.518
rwzi 2a	524.757	1.863.048	89.309	6.844	2.483.959
rwzi 2b	202.069	734.118	95.786	2.169	1.034.142

6.1.1.3 CO₂-footprint uit materiaaltransport

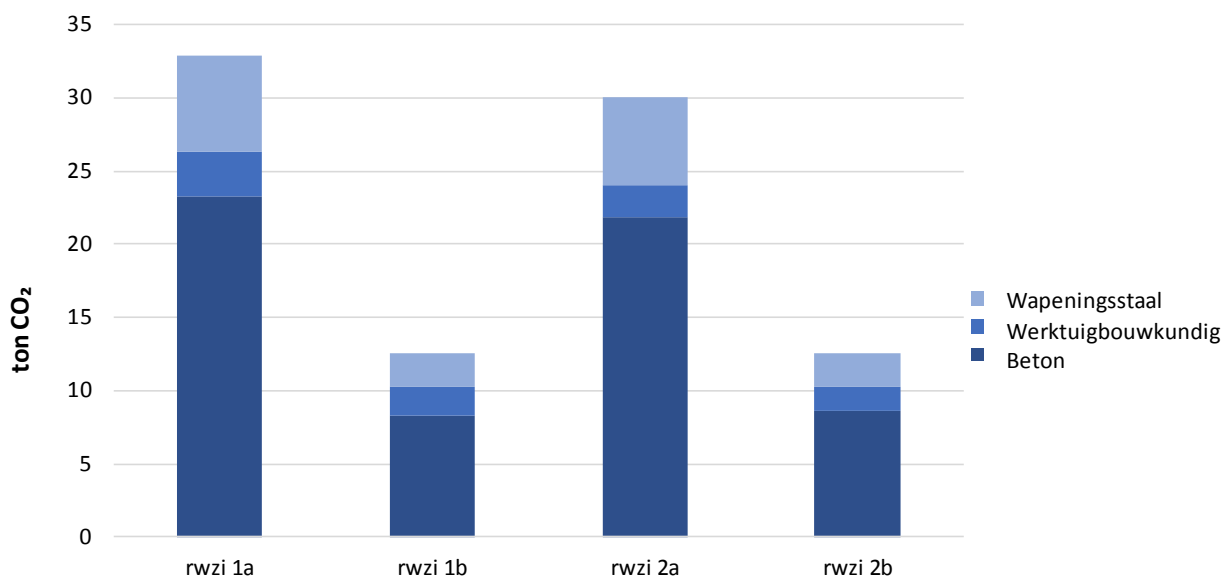
Naast de uitstoot uit gefabriceerde en gemonteerde onderdelen uit paragraaf 6.1.1.1 zijn er tevens immateriële emissiebronnen van CO₂. De kengetallen voor transport van materiaal worden doorgaans gegeven in kg CO₂ per tonkilometer. In een halfvolle vrachtwagen zal een kilo materiaal namelijk een zwaardere belasting dragen, dan wanneer er dubbel zo veel materiaal met hetzelfde transport is vervoerd. De kengetallen die bij deze transportmodaliteiten horen, zijn te vinden in bijlage II. Hier wordt het transport bij het grondverzet niet meegenomen, omdat deze als geheel wordt behandeld in paragraaf 6.1.1.4.

Omdat de herkomst van de materialen niet exact te achterhalen is, is in overleg met het MDR-team bij WBL besloten om op basis van ervaring een gemiddelde afstand voor alle materialen te nemen. Het materiaal wordt daarbij via de weg getransporteerd. De leveranciers van de metalen onderdelen bevinden zich allemaal in Nederland, België en in het westen van Duitsland. Deze afstand is van leverancier tot rwzi op gemiddeld 100 kilometer gesteld voor metalen en houten onderdelen en gemiddeld 50 kilometer voor beton. Betoncentrales liggen namelijk verspreid door het hele land, waaronder in Limburg.

Per materiaalsoort, waarbij de hoeveelheden in paragraaf 6.1.1.2 te zien zijn, is het aantal kilogram vermenigvuldigd met de afstand en de uitstoot van het transportmiddel. Het wapeningsstaal wordt per vrachtwagen over de weg getransporteerd en het beton wordt door middel van betonwagens met een capaciteit van 20 ton als bulk vervoerd. De metalen installaties worden als non-bulk in vrachtwagens over de weg getransporteerd. De resultaten hiervan zijn te zien in Tabel 6.3 en zijn gevisualiseerd in Figuur 6.2. Omdat dit transport een direct gevolg van de bouw is, vallen deze emissies onder scope 1 (zie paragraaf 2.2.2).

Tabel 6.3: Samenvatting CO₂-footprint als gevolg van materiaaltransport

	Vrachtauto, <20 ton, bulk (beton)	Vrachtauto, <20 ton, (werktuigbouwkundig)	Vrachtauto, <20 (wapeningsstaal)	Totaal (kg CO ₂)
rwzi 1a	23.257	3.076	6.543	32.877
rwzi 1b	8.265	2.008	2.323	12.596
rwzi 2a	21.847	2.168	6.023	30.038
rwzi 2b	8.608	1.644	2.319	12.572



Figuur 6.2: CO₂-footprint materiaaltransport per variant naar materiaaltype

Omdat er in de varianten met ulbas-UCT zuiveringstechniek (1a en 2a) veel tanks gebouwd moeten worden, is er tevens veel wapeningsstaal nodig. Hierdoor is zowel de CO₂-emissie uit beton als uit wapeningsstaal bij deze varianten het grootste. De werktuigbouwkundige en elektrotechnische installaties verschillen qua materiaalhoeveelheden niet zo veel van elkaar, dus ook de verschillen van CO₂-uitstoot in het transport hiervan is niet zo groot als bij beton en wapeningsstaal.

6.1.1.4 Materieel

De cijfers van de immateriële aspecten zijn niet allemaal bekend en zijn waar nodig bepaald aan de hand van de geraamde aanneemsommen van deze projecten en projecten in het verleden. Deze getallen hebben zowel betrekking op de arbeid als de materieelinzet. Deze financiële aspecten zijn uitgewerkt in appendix 5 uit het rapport 'MDR: De nieuwe standaard'. De sloopkosten bevatten twee keer de kosten van de sloop van onderdelen met een levensduur van 15 jaar en één keer de sloopkosten van de materialen met een levensduur van 30 jaar, waarbij de totale levensduur van de rwzi's op 30 jaar is gesteld. In Tabel 6.4 zijn de resultaten weergegeven. Deze zijn, net als de materiële aspecten, allemaal berekend met behulp van het spreadsheet "CO₂-footprint rwzi - MDR.xlsx".

Tabel 6.4: Bouw- en sloopkosten per variant. Bron: WBL (2012).

	rwzi 1a	rwzi 1b	rwzi 2a	rwzi 2b
Bouwkosten	€ 15.900.000	€ 15.000.000	€ 19.800.000	€ 18.500.000
Sloopkosten	€ 840.000	€ 840.000	€ 1.320.000	€ 1.320.000

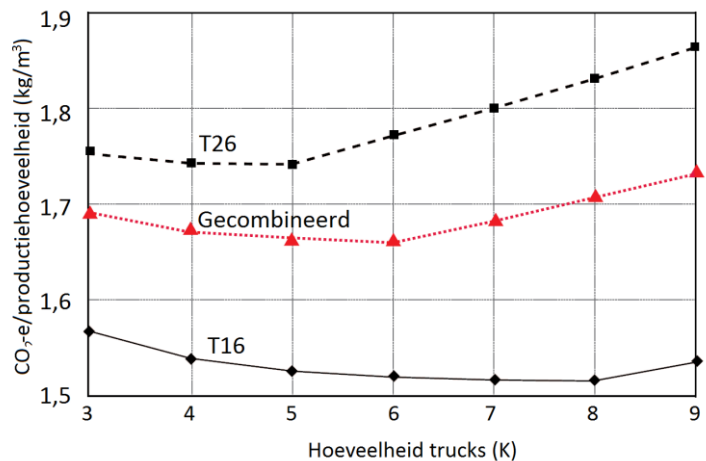
Het materieel draait om de grote werktuigen die gebruikt worden tijdens de bouw van de installatie. Klein gereedschap, zoals bijvoorbeeld lasapparatuur worden door de relatief geringe uitstoot niet meegenomen. Het materieel wordt opgesplitst in verschillende delen:

- Grondverzet (ontgraving en grondtransport);
- Montage;
- Materieeltransport.

6.1.1.4.1 Grondverzet

Allereerst zal het grondverzet berekend worden. De kwantificeringen die hiermee samenhangen zijn gebaseerd op de grondverzet-berekeningen van het WBL. Het materieel dat noodzakelijk is voor het verslepen en monteren van de rwzi-onderdelen wordt daarna bepaald.

Voor de CO₂-footprint van grondverzet op de bouwplaats is door Kaboll en Carmichael (2012) een richtlijn opgezet. In Figuur 6.3 is de uitstoot per kubieke meter zand te zien, afhankelijk van het aantal ingezette vrachtwagens (K) per graafmachine. De T16 truck heeft een capaciteit van 16 ton en een vermogen van 469 pk en de T26 een capaciteit van 26 ton en een vermogen van 739 pk. Ook de uitstoot van de graafmachine zit in deze waarden verwerkt. De reden dat naarmate het aantal trucks stijgt het CO₂-e eerst daalt en vervolgens stijgt, ligt aan het feit dat er bij te weinig trucks niet optimaal gebruik kan worden gemaakt van de beschikbaarheid van de graafmachine en bij te veel trucks een wachtrij bij de graafmachine ontstaat. Tevens geldt, hoe groter de truck, des te langer het laden duurt en des te langer wordt de wachtrij. Het aantal en het type trucks is niet bekend en door de afstand tot de dumpplek wordt geen wachtrij verwacht. Daarom is de uitstoot bij alle 4 de rwzi's vastgesteld op een waarde van 1,7 kg CO₂ per m³ grond.



Figuur 6.3: grafiek CO₂-uitstoot graafwerkzaamheden. Bron: Kaboll et al. (2012).

6.1.1.4.2 Grondvervoer

De uitstoot die vervolgens wordt veroorzaakt door de afvoer van de grond, wordt veroorzaakt door bulkvervoer middels vrachtwagens. Hierbij is aangenomen dat de grond over 30 kilometer getransporteerd dient te worden alvorens het op plaats van bestemming gestort kan worden. Als de hoeveelheid grond alleen in gewicht bekend is, zal wel rekening gehouden moeten worden met het verschil in dichtheid tussen vaste grond en afgegraven, losse grond. Hierbij is een factor van 1,8 aangenomen (Bogaerts, 2004). Er geldt dus dat 1 m³ vaste grond qua volume gelijk staat aan 1,8 m³ losse grond.

6.1.1.4.3 materieel

De montage van de installatie zal grotendeels met relatief klein gereedschap voltooid worden en wordt daarom verwaarloosd. Het enige grote en prominent aanwezige materieel is de mobiele kraanwagen, die de elementen van de vrachtwagen tilt en op de juist plaats zet. Op basis van de aanneemsom van het project en het uurloon van een kraanmachinist is het aantal draaiuren van de kraan bepaald. Deze berekening is terug te vinden in bijlage IV. De conclusie die hieruit getrokken is, is dat bij de bouw van een rwzi 1% van de aanneemsom op gaat aan arbeidsloon van kraanmachinisten. Dit komt, uitgaande van een uurloon van €60 bruto voor een kraanmachinist, neer op 2.650, 2.500, 3.300 en 3.080 draaiuren voor respectievelijk rwzi 1a, 1b, 2a en 2b. Deze draaiuren zijn vermenigvuldigd met de bijbehorende kengetallen uit bijlage II.

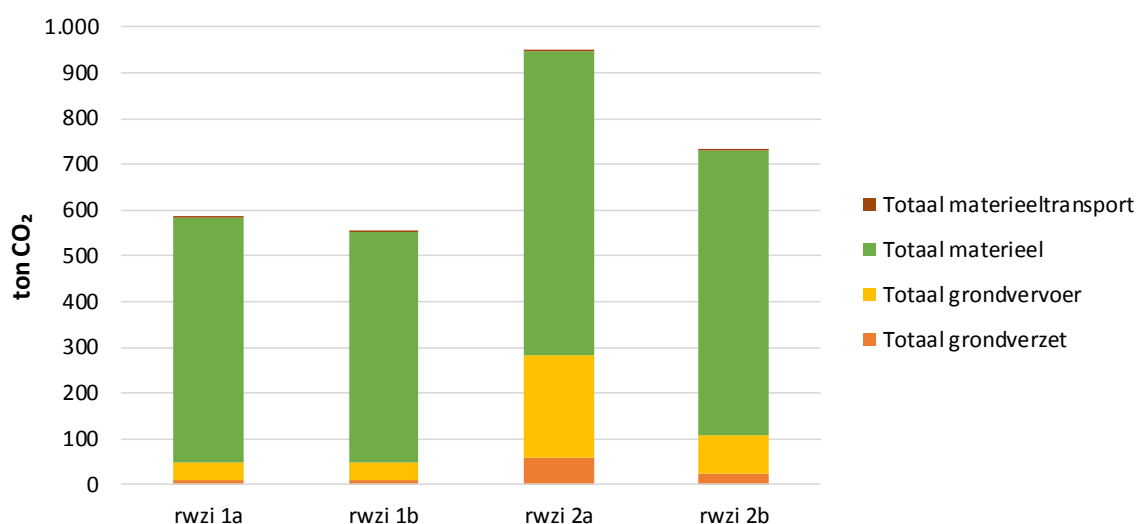
6.1.1.4.4 Materieeltransport

Om te zorgen dat al het materieel op de bouwplaats komt, dient het getransporteerd te worden. Hierbij is uitgegaan van twee kranen, die de gehele bouw- en slooperperiode aanwezig zijn en daardoor beide twee keer de afstand tot de verhuurder afleggen, die gesteld is op gemiddeld 100 km. Een grote

mobiele kraanwagen weegt circa 75 ton (BKV, 2014). Dit gewicht dient dus twee keer 100 kilometer heen en terug getransporteerd te worden. De resultaten van de materieel gerelateerde uitstoot zijn weergegeven in Tabel 6.5 en visueel weergegeven in Figuur 6.4.

Tabel 6.5: Samenvatting CO₂-footprint als gevolg van materieelinzet

	Totaal grondverzet	Totaal grondvervoer	Totaal materieel	Totaal materieeltransport	Totaal (kg CO ₂)
rwzi 1a	9.894	33.611	535.353	3.900	582.760
rwzi 1b	9.894	36.845	505.050	3.900	555.690
rwzi 2a	59.373	221.852	666.666	3.900	951.790
rwzi 2b	22.697	77.102	622.222	3.900	725.920



Figuur 6.4: CO₂-footprint materieelinzet per variant naar materieeltype

Het verschil in de materieeluitstoot tussen de vier varianten hangt, net als de materiaaluitstoot, sterk af van de hoeveelheid tanks die relatief veel grondverzet vereisen. Daarom emitteren de ulbas-UCT varianten (1a en 2a) meer CO₂ dan de Nereda® varianten (1b en 2b). Verder zullen de tanks, afgezien van de Nereda®-tanks die te allen tijde bovengronds opgesteld worden, in de conventionele varianten (2a en 2b) ingegraven zijn, waardoor er meer grondverzet plaatsvindt dan bij de boven maaiveld opgebouwde MDR-tanks (1a en 1b).

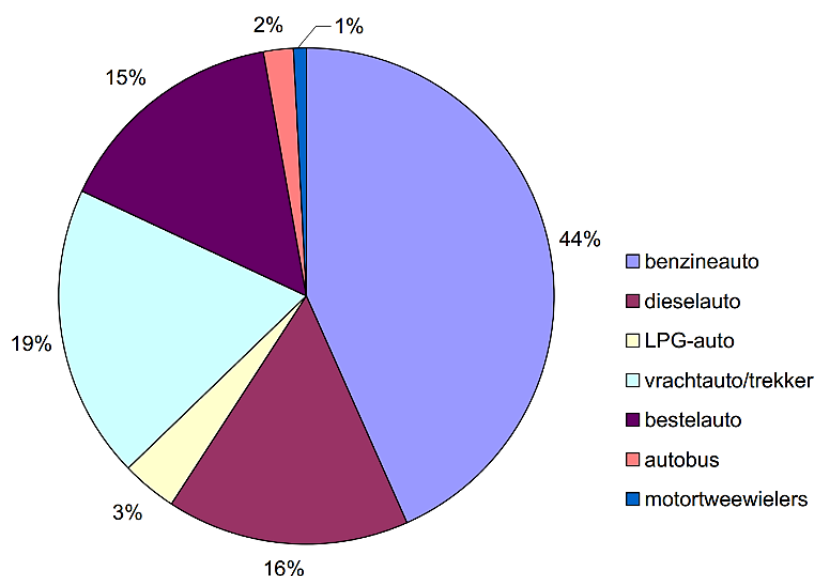
Het is opvallend dat het materieelgebruik (mobiele kraanwagens) de meeste CO₂ emitteert. Hoewel de waarden relatief niet zo veel verschillen tussen de vier varianten, is dit wel een post die meer dan 70% van de gehele materieeluitstoot betreft. De oorzaak hiervan ligt bij de grote hoeveelheid draaiuren van deze kraanwagen(s). Daarbij is de mobiele kraan, getuigende bijlage II, een van de meest vervuulende machines.

6.1.1.5 Arbeid

Het is zeer onnauwkeurig, ingewikkeld en onzeker om het verrichten van arbeid toe te bedelen aan CO₂-uistoot. Deze personen zouden namelijk ook bijgedragen hebben als deze arbeid niet op die plek had plaatsgevonden. In dit rapport wordt daarom enkel het personenvervoer meegenomen. Er wordt hierbij uitgegaan van gemiddeld 2,5 personen per voertuig, aangenomen dat elektrotechnische en werktuigbouwkundige werknemers met 2 personen in een voertuig zitten en civiele werknemers met 3 personen. De gemiddelde afstand die het bouwpersonnel tot de zuivering af moet leggen is op basis van de spreiding van de aannemers in Nederland gesteld op 75 kilometer, omdat veel aannemers in

Brabant en west-Nederland gevestigd zijn. De kengetallen die SKAO (2014) voor de vervoersmodaliteiten geeft zijn te zien in bijlage II.

De modal split is bepaald op basis van het rapport 'State-of-the-Art CO₂ en mobiliteit' (Smokers et al., 2007) en CBS Statline. De grafiek is te zien in Figuur 6.5. Door telkens de uitstoot per modaliteit als percentage van de totale modal split te nemen en deze bij elkaar op te tellen is zo op een gemiddelde uitstoot gekomen.

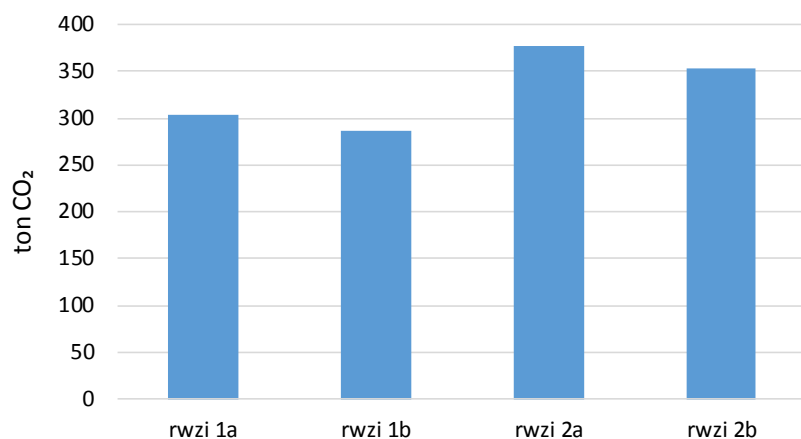


Figuur 6.5: Modal split Nederland. Bron: Smokers et al. (2007).

Het aantal arbeidsuren is berekend aan de hand van het aandeel van de aanneemsom dat aan uurloon is besteed bij projecten uit het verleden. Deze berekening is terug te vinden in bijlage IV. De conclusie uit de berekeningen is dat in de bouwfase 23% van de aanneemsom op gaat aan loon en dat een gemiddelde bouwplaatsmedewerker €50 bruto per uur verdient. Op basis van het totaal afgelegde kilometers en de bekende modal split is Tabel 6.6 opgesteld. De resultaten zijn in Figuur 6.6 grafisch weergegeven.

Tabel 6.6: Samenvatting CO₂-footprint als gevolg van personenvervoer

	Totaal (kg CO ₂)
rwzi 1a	302.630
rwzi 1b	285.660
rwzi 2a	377.150
rwzi 2b	352.310



Figuur 6.6: CO₂-footprint uit arbeid per variant als gevolg van personenvervoer

Net als de materieelinzet is de arbeid afhankelijk gesteld van de begrotingen van de vier varianten. De verschillen die de grafiek weergeeft zijn dus relatief gezien gelijk aan de relatieve verschillen binnen de begrotingen.

6.1.1.6 Totalen CO₂-footprint bouwphase

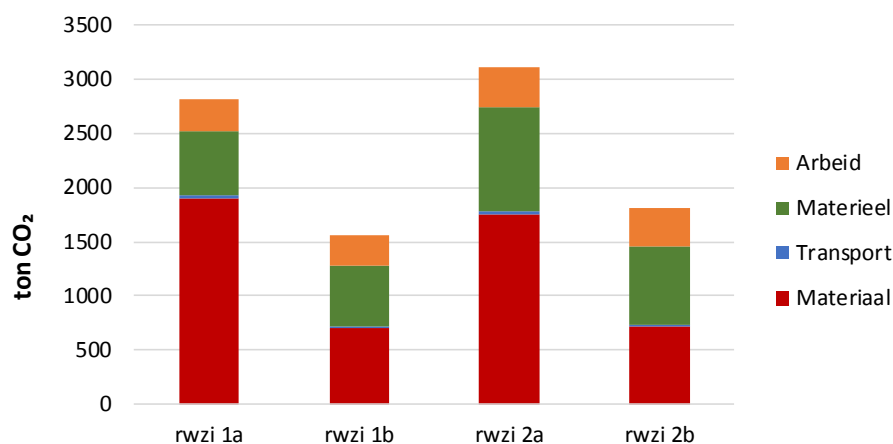
De totalen die van de CO₂-footprint van de vier varianten zijn in deze paragraaf weergegeven. Allereerst is dit gedaan op basis van emissiebron, zoals deze in de voorgaande paragrafen beschreven zijn, en vervolgens op basis van scope.

6.1.1.6.1 Emissiebronnen

In Tabel 6.7 zijn de resultaten van de bouwphase weergegeven, uitgesplitst per emissiebron. In Figuur 6.7 zijn de resultaten naar emissiebron grafisch weergegeven.

Tabel 6.7: Samenvatting CO₂-footprint bouwphase per variant naar proces

	rwzi 1a	rwzi 1b	rwzi 2a	rwzi 2b
Materiaal	1.897.400	704.710	1.754.200	715.750
Transport	32.877	12.596	30.038	12.572
Materieel	582.760	555.690	951.790	725.920
Arbeid	302.630	285.660	377.150	352.310
Totaal (kg CO₂)	2.816.000	1.559.000	3.113.000	1.814.000



Figuur 6.7: CO₂-footprint bouwphase per alternatief naar emissiebron

Het transport van materiaal beslaat, zoals in Figuur 6.7 te zien is, slechts een zeer klein deel van de totale footprint (ongeveer 1% van het totaal) en kan in het vervolg als insignificant beschouwd worden of hier kan een vast percentage van bijvoorbeeld 1% voor geteld worden. Het vervoer van bouwplaatsmedewerkers daarentegen is een grote, variantonafhankelijke emissiepost die vanwege de kleine onderlinge verschillen bovenop de gehele footprint geplaatst kan worden.

Van de emissiehoeveelheden van de vier varianten, die volgen uit vervoer van bouwplaatsmedewerkers en waarvan in Tabel 6.7 de waarden vermeld zijn, betreft de relatieve standaardafwijking ongeveer 10%. Dit wil zeggen dat de spreiding tussen de vier rwzi-varianten klein is. De kanttekening die hier echter bij geplaatst moet worden is, dat de arbeid uitsluitend uit aanneemsommen van conventionele rwzi's uit het verleden opgebouwd is. MDR projecten in de toekomst zullen moeten uitwijzen of de gemaakte aanname, dat arbeidsloon 23% van de totale aanneemsom bedraagt, juist is.

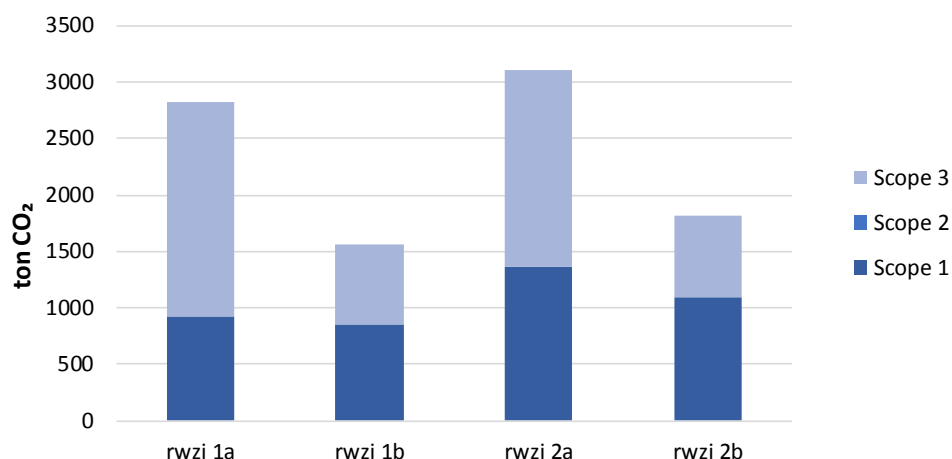
Voornamelijk als gevolg van de fluctuatie van de CO₂-uitstoot uit materiaalgebruik is uit Figuur 6.7 te concluderen dat de Nereda®-varianten (1b en 2b) in de bouwphase een veel kleinere CO₂-emissie genereren dan de ulbas-UCT varianten (1a en 2a). Het verschil in benodigde materieelinzet zorg er daarbij voor dat, zij het in de marge, de MDR's (1a en 1b) minder CO₂-uitstoot genereren dan de conventionele rwzi's (2a en 2b). Al met al zal de variant MDR Nereda® (rwzi 1b), gebaseerd op de CO₂-footprint in de bouwphase, de gunstigste variant zijn en de conventionele rwzi met ulbas-UCT (rwzi 2a) de meest vervuilende.

6.1.1.6.2 Scopes

In Tabel 6.8 zijn de resultaten weergegeven aan de hand van de 3 scopes uit paragraaf 2.2.2. Samengevat staat scope 1 hierbij voor direct uitgestoten ghg's, scope 2 voor externe emissiegassen uit ingekochte energie en scope 3 voor elders extern uitgestoten ghg's (broeikasgassen). Deze scopes geven de locatie weer van de bronnen van de uitgestoten CO₂. Elke scope behoeft een specifieke aanpak tot CO₂-reductie. Tevens worden deze scopes met betrekking tot CO₂-uitstoot in vrijwel alle literatuur gehanteerd, waardoor de resultaten te vergelijken zijn met andere onderzoeken. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 6.8.

Tabel 6.8: Samenvatting CO₂-footprint bouwfase per variant naar scope

	rwzi 1a	rwzi 1b	rwzi 2a	rwzi 2b
Scope 1	918.267	853.946	1.358.978	1.098.512
Scope 2	0	0	0	0
Scope 3	1.897.400	704.710	1.754.200	715.750
Totaal (kg CO₂)	2.816.000	1.559.000	3.113.000	1.814.000



Figuur 6.8: CO₂-footprint bouwfase per variant naar scope

Omdat het transport en arbeid absoluut gezien redelijk constante emissiebronnen zijn (zie Figuur 6.7), is de schommeling in scope 1 te wijten aan de schommeling op het gebied van het materieelinzet en daarmee het grondverzet. Verder is er tijdens de bouw geen energie extern ingekocht en dus valt scope 2 weg. Dit is grafisch weergegeven in Figuur 6.8. Scope 3 werkt in de bouw van de installatie uitsluitend door in de externe materiaalproductie en beslaat dus de gehele scope 3. Figuur 6.8 bevestigt daarmee de conclusie uit paragraaf 6.1.1.6.1 dat uitstoot uit materiaal absoluut gezien het meest variabel is en daarmee het meest bepalend is voor de CO₂-uitstoot per variant.

6.1.2 CO₂-footprint sloopfase

Omdat de sloop in een totaal ander tijdsbestek (fase) plaatsvindt (zie bijlage V), is deze los van de bouwfase bepaald. De sloop is opgesplitst in de onderdelen arbeid, materieel, materiaal(afvoer) en het herstellen van de bouwplaats. Hoewel, afhankelijk van omstandigheden zoals eigendom van de grond en impact op het milieu, de rwzi niet altijd volledig geamoveerd wordt, wordt er in deze studie van uit gegaan dat de gehele installatie na exploitatie verwijderd wordt. Na amovering wordt de grond volledig met zand geëgaliseerd. De bovenste 30 centimeter van de grond zal bestaan uit de deklaag, maar omdat het grondverzet van deze grondlaag niet anders is dan de rest van de grond, wordt dit verschil buiten beschouwing gelaten. Tot slot is aangenomen dat al het afvalmateriaal volledig naar externe afvalverwerkingsbedrijven afgevoerd wordt. De berekeningen zijn echter minder nauwkeurig toegelicht dan bij de bouwfase, omdat de aanpak van de berekeningen grotendeels overeen komt.

6.1.2.1 Materiaaltransport

In tegenstelling tot bij de bouw, worden zowel de werktuigbouwkundige installaties als het beton en het wapeningsstaal als non-bulk vervoerd. De reden hiervan ligt bij het feit dat het beton als brokstukken uit de rwzi's komt en dus niet meer als een massief geheel getransporteerd kan worden. Het beton zal nu niet meer vervoerd worden naar een betoncentrale, maar naar een centrale die dit beton kan verwerken tot granulaat, wat gebruikt zal worden in nieuw beton. Deze centrales liggen

over Nederland minder dicht gezaaid dan de betoncentrales, waardoor de gemiddelde afstand op 100 kilometer is gesteld.

6.1.2.2 Materieel

De materieelinzet bij de sloop bestaat uit de hoeveelheid gebruikt materieel en de draaiuren van het materieel. De mobiele kraan wordt als hoofdgereedschap beschouwd, die berekend is aan de hand van het aandeel van de aanneemsom die aan het uurloon van een kraanmachinist uitgegeven wordt (zie bijlage IV). Deze is net als in de bouwfase gesteld op 1% van de totale sloopkosten.

6.1.2.3 Arbeid

De arbeid die hiermee berekend wordt is uitsluitend het woon/werkverkeer van de arbeiders. De cijfers zijn gebaseerd op dezelfde waarden als paragraaf 6.1.1.5. De berekening van de arbeidsuren is te vinden in bijlage IV. Hierbij is aangenomen dat 40% van de aanneemsom aan arbeidsloon besteed wordt en dat net als bij de sloop het gemiddelde uurloon van een bouwplaatsmedewerker €50 bruto betreft.

6.1.2.4 Herstellen bouwplaats

Na de amovering van de rwzi zal de bouwplaats bestaan uit kuilen waarin de tanks en installaties zich hebben bevonden. Bij de MDR zal deze hoeveelheid kuilen kleiner zijn dan bij de conventionele rwzi's. De bouwplaats dient echter 'teruggegeven' te worden aan de natuur, en zal dus weer tot een vlak stuk grond opgeleverd moeten worden. Als er op dezelfde locatie een nieuwe installatie gebouwd gaat worden, hoeft deze stap niet of slechts gedeeltelijk uitgevoerd te worden.

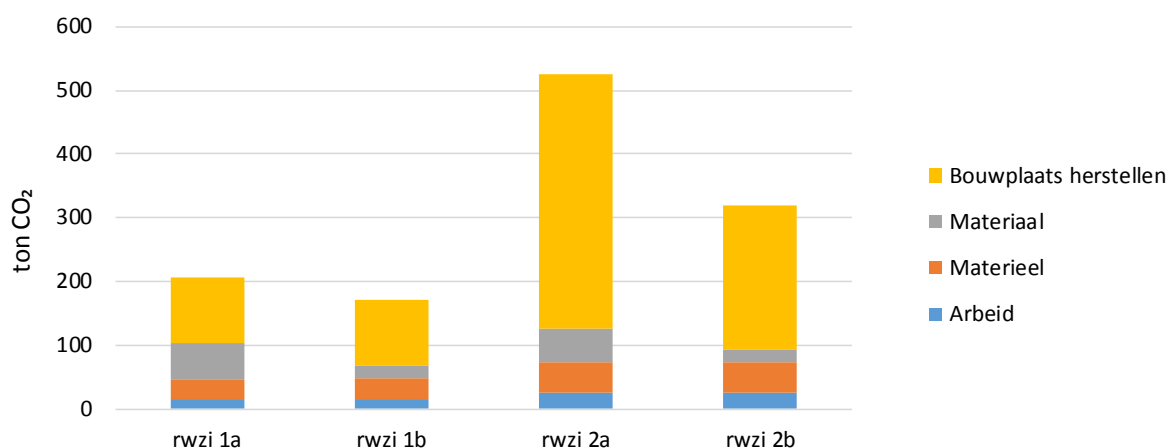
Allereerst wordt het verzette grond naar de bouwplaats getransporteerd en worden de gaten opgevuld. Dit proces is vergelijkbaar met het grondverzet uit paragraaf 6.1.1.4. Vervolgens dient van de deklaag het hele oppervlak geëgaliseerd te worden. Hier worden bulldozers, shovels en graders voor ingezet. De grootte van deze materieelinzet is afhankelijk van de oppervlakte van bouwplaats. Het herstellen van de bouwplaats bestaat dus uit het grondverzet en het egaliseren van de grond. Hierbij wordt er voor het gemak van uitgegaan dat de ondergrond goed gescheiden is gehouden van de teelaarde en dat de grond niet vervuild is geraakt, waardoor het gesaneerd zou moeten worden. De gehele bouwplaats zal als gevolg van gebruikssporen geëgaliseerd moeten worden. Omdat de MDR op een kleiner oppervlak gerealiseerd kan worden, zal de uitstoot hiervan ook iets lager zijn.

6.1.2.5 Totalen CO₂-footprint sloopfase

De emissiehoeveelheden die volgen uit al deze deelstappen zijn samengevat in Tabel 6.9 en Figuur 6.9. Omdat er geen ingekochte energie verbruikt wordt en er geen producten extern geproduceerd worden, zal deze uitstoot tijdens de sloop volledig binnen scope 1 vallen.

Tabel 6.9: Samenvatting CO₂-footprint sloopfase per variant naar emissiebron

	rwzi 1a	rwzi 1b	rwzi 2a	rwzi 2b
Arbeid	16.146	16.146	25.254	25.254
Materieel	30.233	30.883	47.044	47.044
Materiaal	56.923	21.141	52.625	21.473
Bouwplaats herstellen	103.907	103.780	399.695	225.979
Totaal (kg CO₂)	207.000	172.000	525.000	320.000



Figuur 6.9: CO₂-footprint sloopfase per alternatief naar emissiebron

In Figuur 6.9 zijn de waarden uit Tabel 6.9 gevisualiseerd. De gele piek bij rwzi 2a (conventioneel ulbas-UCT) is hierbij het eerste wat opvalt. Het herstellen van de bouwplaats, wat deze piek voorstelt, zorgt ervoor dat de uitstoot bijna drie keer zo hoog wordt als bij rwzi 1b. Deze uitschieter in de uitstoot in de emissiebron 'bouwplaats herstellen' heeft twee oorzaken. Allereerst is het te bewerken oppervlak voor de conventionele rwzi's (2a en 2b) veel groter en zal het egaliseren van de bouwplaats meer materieelinzet behoeven dan bij de MDR's (1a en 1b). Ten tweede zullen de ulbas-UCT varianten (1a en 2a) meer tanks en dus meer grondverzet vereisen. De grote hoeveelheid tanks is tevens de reden dat de uitstoot door materiaal(transport) bij rwzi 1a en 2a groter is.

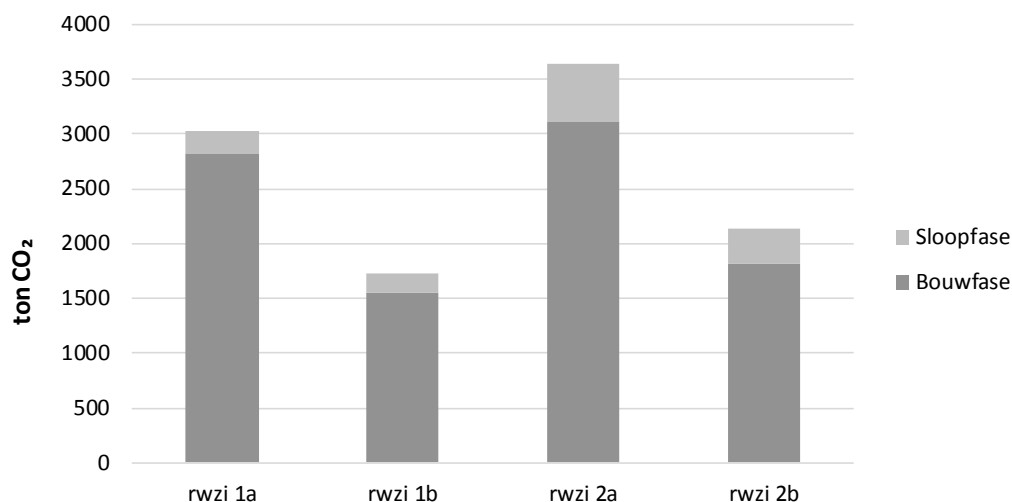
Het materiaal(transport) heeft in de sloopfase een veel grotere relatieve impact dan in de bouwfase. Dit komt omdat het materiaal volledig als non-bulk getransporteerd moet worden en de verwerkingsbedrijven op een grotere afstand van de rwzi liggen dan de betoncentrales. Het gewicht aan vervoerd materiaal is hierbij hetzelfde. Omdat de uitstoot uit materiaaltransport in de sloopfase groter is dan de materiaaltransportuitstoot in de bouwfase en de totale CO₂-footprint van de bouwfase veel groter is dan de totale CO₂-footprint van de sloopfase, zal het procentuele aandeel materiaaltransport in de sloopfase veel groter zijn.

6.1.3 Totale CO₂-footprint bouw- en sloopfase

Tot slot zullen beide fasen vergeleken worden. In Tabel 6.10 is een samenvatting weergegeven van de totale CO₂-footprints per fase. Deze resultaten zijn grafisch weergegeven in Figuur 6.10.

Tabel 6.10: Samenvatting CO₂-footprint per variant naar fase

	rwzi 1a	rwzi 1b	rwzi 2a	rwzi 2b
Bouwfase	2.891.027	1.558.656	3.113.178	1.814.262
Sloopfase	207.210	171.950	524.620	319.750
Totaal (kg CO₂)	3.098.000	1.731.000	1.638.000	2.134.000



Figuur 6.10: CO₂-footprint per alternatief naar projectfase

In Figuur 6.10 is te zien dat de variant met de hoogste uitstoot in de bouwfase, rwzi 2a, tevens de grootste uitstoot in de sloopfase heeft en dat de variant 1b zowel de kleinste bouw- als sloopuitstoot genereert. Sprake van een lineaire verband tussen bouw en sloop is er niet. Dit volgt uit de resultaten van rwzi 1a en 2b en is als volgt te verklaren. De MDR varianten (1a en 1b) hebben een kleinere sloopuitstoot dan de conventionele rwzi's (2a en 2b). Dit volgt uit de uitstoot als gevolg van het herstellen van de bouwplaats, die bij de conventionele varianten (2a en 2b) groter is dan bij de MDR's (1a en 1b).

De totale CO₂-footprint over de bouw en de sloopfase van rwzi 1a (MDR ulbas-UCT) is volgens Figuur 6.10 ruim 3.000.000 kg CO₂. Deze CO₂-footprint staat voor de beeldvorming volgens bijlage II gelijk aan de verbranding van ongeveer 1.640.000 m³ aardgas, 13.600.000 reizigerskilometers met een benzineauto en 6.380.000 kWh ingekochte energie.

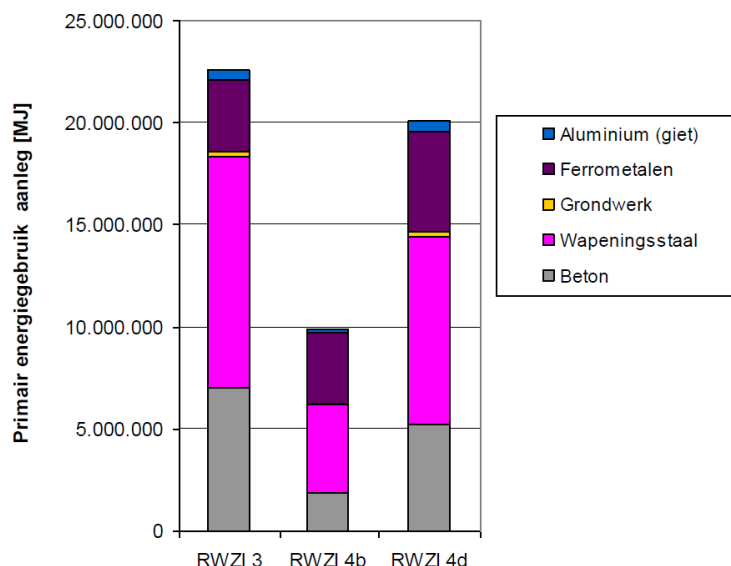
6.2 Resultaten TEO

De TEO is destijds voor 7 varianten uitgerekend, waaronder varianten met verschillende effluenteis en een rwzi-variant die pre-precipitatie toepast in de eerste zuiveringsstap. In Tabel 6.11 zijn echter alleen de drie varianten die ook voor de CO₂-footprint bepaald zijn beschreven. Alleen met deze drie varianten wordt de TEO met de CO₂-footprint vergeleken. De codering uit het rapport 'MDR: De nieuwe standaard' wordt behouden om de consistentie met het TEO onderzoek te handhaven.

Tabel 6.11: Naamgeving verschillende concepten TEO beoordeling

Code (TEO)	Code (CO ₂ -footprint)	Concept
RWZI 3	rwzi 2a	Conventioneel, ulbas-UCT N=10 mg/l en P=1 mg/l
RWZI 4b	rwzi 1b	MDR, Nereda® N=10 mg/l en P=1 mg/l
RWZI 4d	rwzi 1a	MDR, ulbas-UCT N=10 mg/l en P=1 mg/l

In Figuur 6.11 is het energieverbruik over de aanlegfase te zien, die ook gebruikt gaat worden voor de vergelijking met de CO₂-footprint in paragraaf 6.3.



Figuur 6.11: Vergelijking van energiegebruik in de aanlegfase van de verschillende concepten

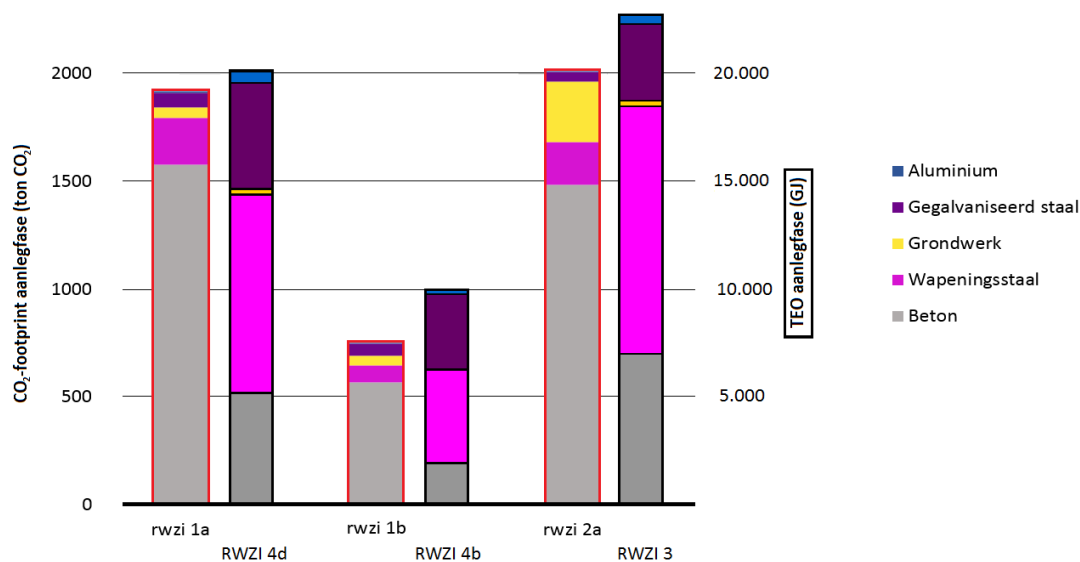
In Figuur 6.11 valt op dat de MDR met ulbas-UCT (RWZI 3) met nauwelijks minder energieverbruik (ongeveer 20%) gebouwd wordt dan de conventionele installatie (RWZI 4d), terwijl een MDR met de Nereda®-technologie (RWZI 4b) met minder dan de helft van de energie die bij RWZI 3 verbruikt wordt gebouwd kan worden. Dit wijst uit dat op het gebied van aanlegenergie de zuiveringsmethode een veel significantere impact heeft dan de modulair duurzame structuur van de rwzi. Deze conclusie zou echter nog geverifieerd kunnen worden door van de variant conventioneel Nereda® de TEO te bepalen en hieruit te concluderen of het verschil eveneens in vergelijking met RWZI 4d waar te nemen is. Het verschil in energieverbruik zit voornamelijk in de hoeveelheid beton en wapeningsstaal. Dit komt doordat de hoeveelheden van die twee materialen het grootste zijn en tevens relatief het meest variabel zijn.

6.3 Vergelijking CO₂-footprint met TEO

In de TEO is uitsluitend het materiaalgebruik en het grondverzet in de berekening meegenomen. In de vergelijking met de CO₂-uitstoot is dus bij beide vergelijkingsmethodieken (TEO en CO₂-footprint) alleen naar het materiaalgebruik en grondverzet uit de bouwfase gekeken. Ten slotte is vergeleken of de verhouding tussen de onderlinge waarden te koppelen zijn aan de energie-CO₂-footprintkoppelingen uit de literatuur.

6.3.1 Onderlinge relaties

In Figuur 6.12 zijn beide milieubeoordelingsmethodieken in één grafiek samengebracht. De zwart omlijnde staven (met de coderingen in hoofdletters) betreffen de TEO's voor de drie varianten en horen bij de rechter grafiek-as. De CO₂-footprints per variant (in kleine letters) zijn rood omlijnd en corresponderen met de linker as. Let dus op dat de staven niet allemaal met dezelfde grootheden corresponderen, maar uitsluitend vanwege relatieve vergelijkingen tussen TEO en de CO₂-footprint in één grafiek zijn ondergebracht.



Figuur 6.12: Grafische vergelijking TEO en CO₂-footprint aanlegfase

In grote lijnen komen de verhoudingen tussen de varianten van TEO en de CO₂-footprint behoorlijk overeen. Op het gebied van CO₂-emissies is het aandeel beton echter veel substantiëler dan de overige materialen, terwijl in de TEO het wapeningsstaal de grootste hoeveelheid energie verbruikt. Aangezien de hoeveelheid wapeningsstaal afhangt van de hoeveelheid beton (zie paragraaf 4.4) en deze waarden zowel bij TEO als de CO₂-footprint gebruikt zijn, zullen de totalen deze onderlinge verschillen echter compenseren. Verder nemen de installatietechnische materialen (aluminium en gegalvaniseerd staal) bij de TEO een groter gedeelte van het totaal in, terwijl de gebruikte hoeveelheden in kilogram hetzelfde zijn. Het is dus niet mogelijk om de CO₂-footprint-onderdelen met één vaste waarde te converteren naar een TEO, aangezien dit sterk afhangt van de materiaalsoorten.

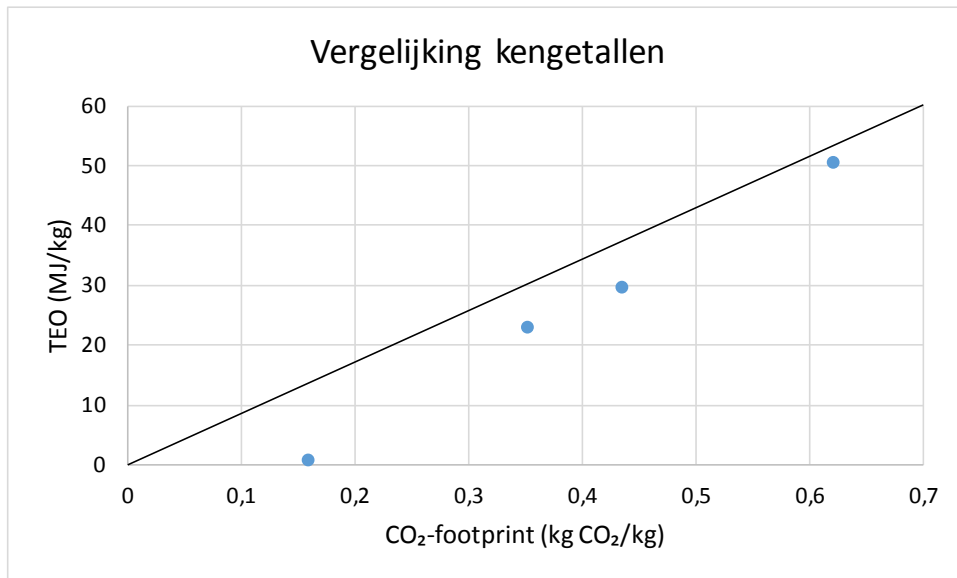
De CO₂-footprint- en TEO-waarden van de losse materialen zijn gegeven in Tabel 6.12. Uit deze tabel wordt meteen duidelijk dat de verhouding tussen de TEO uit beton en de rest van de metalen in Figuur 6.12 te wijten is aan het feit dat de conversiefactor voor beton bij TEO in verhouding tot de andere materialen zeer klein is (ongeveer 35 keer kleiner). Deze conversiefactoren geven individuele kengetallen van materialen en processen in respectievelijk kg CO₂/kg en MJ/kg. Bij de CO₂-footprint is dit verschil veel geringer (ongeveer 3 keer). Hieruit blijkt dat relatief gezien het beton in de CO₂-footprint een veel substantiëlere invloed heeft dan bij de TEO en dat bij de TEO de werktuigbouwkundige gedeelte een veel grotere invloed op het totaal zal hebben dan in de CO₂-footprint berekening. Ook uit Figuur 6.13, waarin de conversiefactoren per materiaal zowel tegen de TEO als de CO₂-footprint zijn uitgezet, blijkt dat de verhouding tussen de conversiefactoren een redelijk overeenkomt met een lineaire lijn door de oorsprong een blijkt hierin ook dat beton hier de grootste afwijking bij heeft.

Tabel 6.12: vergelijking conversiefactoren TEO en CO₂-footprint

Materiaal/onderdeel	CO ₂ -footprint (kg CO ₂ /kg)	TEO (MJ/kg)
Aluminium	0,622	50,6
Gegalvaniseerd staal	0,435	29,6
Grondwerk	5,00*	8,00**
Wapeningsstaal	0,352	23,1
Beton	0,159	0,8

* kg CO₂/m³, uit afgraving en grondtransport.

** MJ/m³ grond.



Figuur 6.13: vergelijking kengetallen materialen

6.3.2 Relaties in vergelijking met literatuurwaarden

Uit Figuur 6.12 blijkt dat bij de vergelijking van 'rwzi 1a' met 'RWZI 4d' 1.900 ton CO₂ (linker as) ongeveer gelijk staat aan een TEO van 20.000 GJ energie (rechter as). 1 GJ energie kost dus zo'n 95 kg CO₂, waaruit volgt dat over de gehele bouw en sloop van de rwzi 1 kWh gelijk staat aan 0,417 kg uitgestoten CO₂. Voor de verhouding tussen rwzi 1b en RWZI 4b ligt dit op 0,270 kg CO₂/kWh en voor de verhouding tussen rwzi 2a en RWZI 3 op 0,312 kg CO₂/kWh. Als energie ingekocht wordt van een gemiddelde energieleverancier, emitteert dit ongeveer 0,470 kg CO₂ per kWh (Segers, 2014). Hoewel de waarden in orde van grootte met de literatuurwaarden overeenkomen, valt wel op dat de berekende waarden lager uitvallen dan de waarde uit de literatuur.

7 Conclusie en aanbeveling

Allereerst zijn conclusies getrokken uit resultaten van de berekeningen van rwzi's met betrekking tot de CO₂-footprint. Daaropvolgend is de relatie tussen de TEO en de CO₂-footprint vergeleken. Tot slot worden de hiaten van dit onderzoek en de daaruit volgende aanbevelingen voor vervolgonderzoek gegeven.

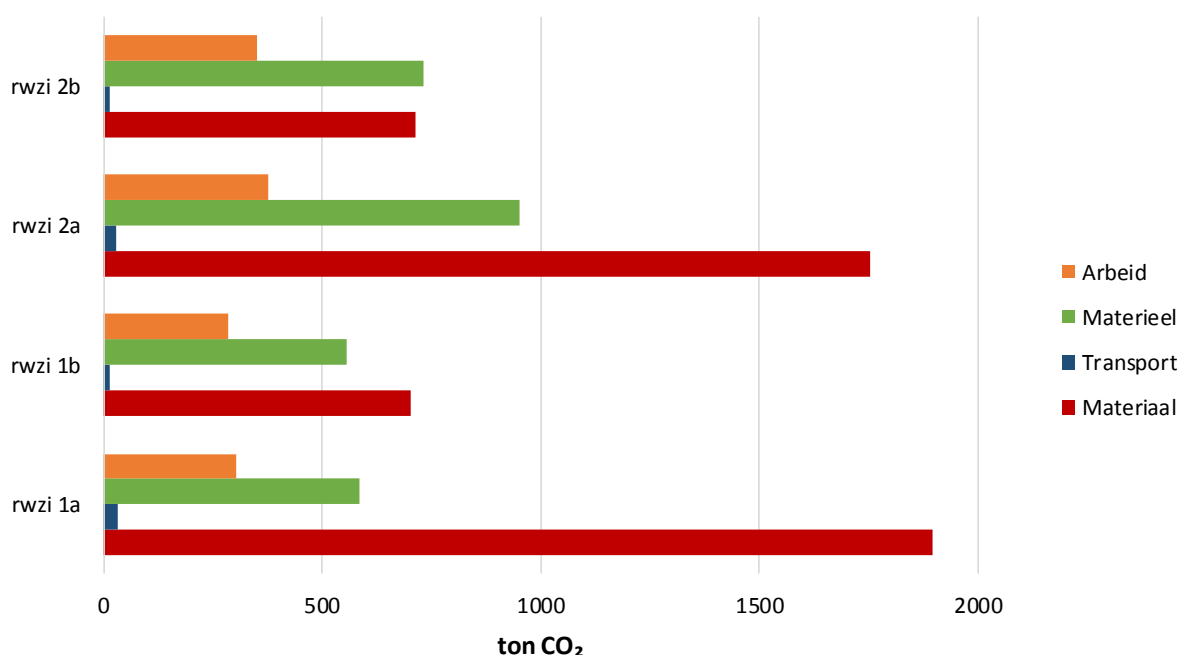
7.1 CO₂-footprint

De CO₂-footprint is voor de varianten MDR ulbas UCT (rwzi 1a), MDR Nereda® (rwzi 1b), conventioneel ulbas-UCT (rwzi 2a) en conventioneel Nereda® (rwzi 2b) uitgerekend, voor zowel de bouw- als de sloopfase. Hieruit is gebleken dat, zowel voor de bouw- als de sloopfase, de conventionele rwzi met ulbas-UCT (rwzi 2a) de grootste CO₂-footprint genereert en de MDR met Nereda® (rwzi 1b) de kleinste.

De oorzaak hiervan ligt in de bouwfase hoofdzakelijk bij de grote hoeveelheid beton die ondergronds gestort wordt, wat een grote hoeveelheid wapeningsstaal en grondverzet met zich meebrengt. In de sloopfase blijkt dat het herstellen van de bouwplaats de meeste CO₂-uitstoot genereert. Vanwege de combinatie met het te egaliseren grondoppervlak (MDR kan veel compacter gebouwd worden dan conventioneel) en de grote hoeveelheid benodigde grondaanvulling steekt de variant conventioneel ulbas-UCT (rwzi 2a) er ruimschoots bovenuit en genereert de bouw van MDR met Nereda® (rwzi 1b) ook in de sloopfase de kleinste CO₂-uitstoot.

7.1.1 Bouwfase

Al met al is met betrekking tot de bouwfase te concluderen dat het civiele materiaal (beton en wapeningsstaal) en het grondverzet de grootste invloed hebben op de CO₂-footprint hebben. Dit blijkt tevens uit Figuur 7.1. Verder blijkt dat de conventionele rwzi met ulbas-UCT (rwzi 2a) veruit de meeste materieelinzet behoeft en het verschil in emissie uit materiaalgebruik niet veel kleiner is dan de koploper, rwzi 1a. Hierdoor emitteert rwzi 2a de meeste CO₂ in de bouwfase. Rwzi 1a benodigt door het toepassen van de Nereda® zuiveringstechniek relatief weinig beton en wapeningsstaal en beperkt daarmee, door het bovengrondse opstellen van de rwzi, de materieelinzet tot een minimum.

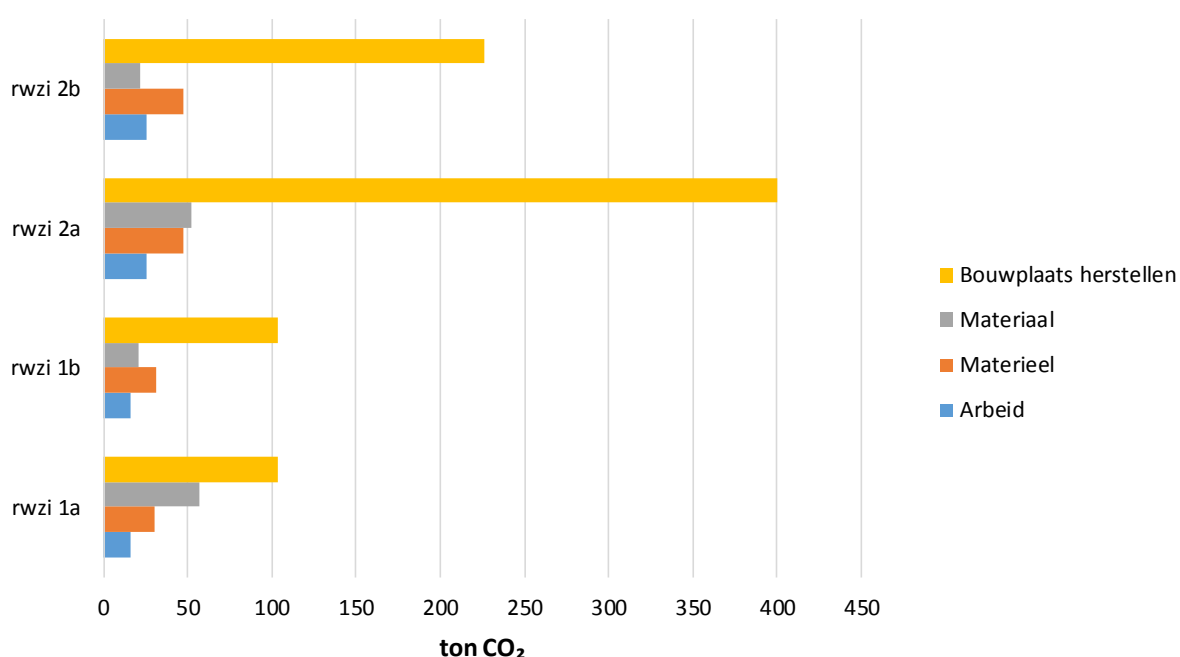


Figuur 7.1: Grootte CO₂-footprint bouwphase per variant per onderdeel

7.1.2 Sloopfase

Met betrekking tot de sloopfase geldt dat het herstellen van de bouwplaats veruit de meeste uitstoot genereert (zie Figuur 7.2). Het herstellen van de bouwplaats hangt het meeste af van de hoeveelheid te egaliseren grond en hoeveelheid te transporteren grond. Omdat rwzi 2a naast het grote egaliseringsoppervlak veel aan te vullen grond behoeft, heeft deze variant ook in de sloop de grootste CO₂-footprint.

Doordat zowel de bovengrondse bouw als het egaliseringsoppervlak klein is, produceren de MDR's (1a en 1b) veel minder uitstoot in de bouwfase dan conventionele rwzi's. Ten opzichte van de uitstoot tijdens het herstellen van de bouwplaats is het verschil in de rest van de uitstoot niet bepalend, wat met zich mee brengt dat de MDR-varianten (1a en 1b), gebaseerd op de CO₂-footprint in de sloopfase, sterk de voorkeur verdienen boven de conventionele varianten (2a en 2b). Doordat er bij de ulbas-UCT meer materiaal getransporteerd wordt dan bij Nereda®-varianten, zal de laatstgenoemde op dat onderdeel meer CO₂ uitstoten dan de ulbas-UCT variant met betrekking tot de CO₂-footprint van de sloopfase. Dit is echter een zeer marginaal verschil in de totale CO₂-footprint, aangezien de bouwfase meer dan vijf keer meer uitstoot genereert dan de sloopfase.



Figuur 7.2: Grootte CO₂-footprint sloopfase per variant per onderdeel

7.2 Verband tussen TEO en CO₂-footprint

De verhouding tussen varianten komen tussen de CO₂-footprint (gemodificeerd, met daarin dezelfde emissiebronnen als in de TEO meegenomen) en TEO redelijk met elkaar overeen. Hoewel de verhouding tussen de emissiebronnen onderling verschillen, compenseren deze elkaar in de totalen.

Een één op één verband tussen CO₂-footprint en TEO is echter niet te leggen, zeker omdat er bij TEO zoveel ketens buiten beschouwing zijn gelaten en niet de LCA gevolgd is. Door de CO₂-footprint te versimpelen tot enkel het grondverzet en het materiaal zijn de TEO en de CO₂-footprint nog te vergelijken, maar is de vraag of dit nog van toegevoegde waarde is, aangezien er zeer weinig variabelen gebruikt worden en hierdoor met toepassing van enkele conversiefactoren de TEO in de versimpelde CO₂-footprint om te rekenen is.

Energie die van de energieleverancier ingekocht wordt, levert dit ongeveer 0,470 kg CO₂ per kWh (Segers, 2014). De hoeveelheid CO₂ per kWh energie ligt voor de vier varianten echter onder deze waarde, maar komt het in orde van grootte overeen. Het is echter opmerkelijk dat de uitstoot uit energie die in de bouw van de installatie is gestopt lager is dan de uitstoot uit ingekochte energie. Dat betekent namelijk dat de energie die men bij materiaalproductie heeft gebruikt milieuvriendelijker geproduceerd is dan de energie die gemiddeld van de energieleveranciers in Nederland wordt verkregen.

7.3 Aanbevelingen

In dit onderzoek zijn talloze grof geschatte aannames gedaan om onbekende waarden toch kwantificeerbaar te maken. Sommige aannames zijn echter op basis van bijvoorbeeld de aanneemsom gemaakt en zijn zo onafhankelijk van de ontwerpmethodiek of zuiveringstechniek bepaald. Omdat de MDR nog nergens in bedrijf is en er geen empirische gegevens bekend zijn, zou de berekening in de toekomst op basis van meetgegevens en ervaringen aangepast kunnen worden. Er dient hierbij echter wel rekening gehouden te worden met de significantie van het te onderzoeken deel. Als dit namelijk nauwelijks invloed heeft op het geheel, verdient het de aanbeveling om hier niet te veel tijd in te steken. Zaken die de totale CO₂-footprint van de bouw- en sloopfase wel significant kunnen veranderen na implementatie van empirische waarden zijn:

- Materiaalhoeveelheden;
- Arbeid;
- Materieelinzet.

Tot nu toe is in het rapport de CO₂-emissie alleen in kaart gebracht. Een vervolgonderzoek zou echter inzicht kunnen bieden in de reductie van deze footprint door bijvoorbeeld verandering in materiaalgebruik of logistiek. Deze reducties zijn met behulp van het opgestelde spreadsheet te kwantificeren.

Ook geeft de CO₂-footprint maar een zeer beperkt gedeelte van de totale milieueffecten. Voor een volledig beeld van de effecten van een rwzi op zijn omgeving en het milieu zouden bijvoorbeeld watergebruik, verzuring en landschapsvervuiling ook meegenomen moeten worden. Hierbij zou gebruik gemaakt kunnen worden van de rekentool GreenCalc+, die al deze factoren in de berekening meeneemt en samenvoegt tot één waarde.

In het TEO-onderzoek is de variant 'conventioneel Nereda®' niet meegenomen in de analyse. Dit is echter wel van belang bij de getrokken conclusie in het rapport 'MDR: De nieuwe standaard', dat MDR 20% energiezuiniger zou zijn dan de conventionele variant in de bouwfase. Tevens zou na uitvoering naar de resultaten van deze variant een vergelijking met alle vier de varianten van de CO₂-footprint gemaakt kunnen worden.

Tot slot zou de jaarlijkse CO₂-footprint van de exploitatiefase nog op dezelfde manier inzichtelijk gemaakt kunnen worden als voor de bouw en de sloop van de rwzi is gedaan. Hoewel dit kennis vereist in de procestechnologie en dieper in zal gaan op de zuiverings- en mogelijk slibvergistingstechnieken, zullen deze emissiebronnen een zeer substantieel effect hebben op de totale CO₂-footprint. Het is hierbij sterk aan te bevelen om hiervoor de climate footprint toe te passen in plaats van de CO₂-footprint, in verband met de grote hoeveelheden methaan en lachgas die, naast CO₂, tijdens de zuiverings- en vergistingsprocessen geëmitteerd worden. Aan de hand hiervan kan bepaald worden of de CO₂-footprints van de bouw- en de sloopfase significant zijn ten opzichte van deze footprint in de exploitatiefase.

Referenties

- Ace, J. (2011). Recycled Paper: how does it impact carbon emissions? *Climate Earth*.
- Alcorn, A. (2003). Embodied energy and CO2 coefficients for NZ building materials. *Centre for Building Performance Research*.
- Ashby, M. F. (2012). *Materials and the Environment: Eco-informed Material Choice* (3rd ed.). Cambridge: Elsevier.
- Berners-Lee, M. (2011). *How bad are bananas? The carbon footprint of everything*. Vancouver, Canada: D&M Publishers Inc.
- Bijleveld, M. M., Bergsma, G. C., Krutwagen, B. T. J. M., & Afman, M. A. (2014). Milieu-impacts van Nederlandse bouw- en sloopactiviteiten in 2010 *Metten is weten in de Nederlandse bouw*. Delft: CE Delft.
- BKV. (2014). Barneveldse kraanverhuur. Retrieved 16 juni, 2014, from <http://www.barneveldsekraanverhuur.nl/mobiele-kranen/mobiele-torenkraan/>
- Bogaerts, S. (2004). Vraag en antwoord. Retrieved 4 juni, 2014, from <http://www.livios.be/nl/extra/gratis-diensten/vraag-en-antwoord/vraag/7942/prijzen-teelaarde/>
- Bouwen met Staal. (2013). CO2-footprint staal per lifstage. *MRPI*.
- Daelman, M. R. J., Van Voorthuizen, E. M., Van Dongen, L. G. J. M., Volcke, E. I. P., & Van Loosdrecht, M. C. M. (2013). Methane and nitrous oxide emissions from municipal wastewater treatment - results from a long-term study. *Water Science Technology*.
- De Brauw, H., Kluck, J., Stapel, W., & Tilma, M. (2012). Water en energie: feiten over energieverbruik in het stedelijk waterbeheer. *Stichting Rioned*.
- Ecofys, Fraunhofer Institute, & Öko-Institut. (2009). Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU.
- Ewing, B., Reed, A., Galli, A., Kitzes, J., & Wackernagel, M. (2010). Calculation Methodology for the national footprint accounts, 2010 edition: Global Footprint Network.
- Franchetti, M. J., & Apul, D. (2013). *Carbon Footprints Analyses: Concepts, Methods, Implementation, and Case Study*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Frijns, J., Mulder, M., & Roorda, J. (2008). Op weg naar een klimaatneutrale waterketen. In S. e. KWR (Ed.). Lelystad.
- Gilbert, P., Roeder, M., & Thornley, P. (2013). The chemical industry in the UK. Manchester: Tyndall Manchester: Climate Change Research.
- Gupta, D., & Kumar Singh, S. (2012). Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment Plants. *Journal of Water Sustainability*, 2(2), 8.
- IFIAS. (1974). *Energy Analysis Workshop on Methodology and Conversion Federation of Institutes for Advanced Study, Workshop report No. 9*.
- IPCC. (2007). IPCC fourth assessment report: Climate Change 2007. Retrieved 6 mei, 2014
- Kaboll, A. S., & Carmichael, D. G. (2012). Emission and Cost Configurations in Earthmoving Operations. *Organization, Technology and Management in Construction - An international Journal*, 4(1), 9.
- Keoleian, G., Miller, S., De Kleine, R., Fang, A., & Mosley, J. (2012). Life Cycle Material Data Update for GREET Model.
- Kolkhuis Tanke, H. A., & Rijdsdijk, V. (2012). Klimaatmonitor 2012. 's-Hertogenbosch: Arcadis.
- Listowski, A., Ngo, H. H., Guo, W. S., Vigneswaran, S., Shin, H. S., & Moon, H. (2011). GHG Emissions from urban wastewater system: future assessment framework and methodology. *Journal of Water Sustainability*, 1(1), 12.
- Meng, F., Chae, S.-R., Drews, A., Kraume, M., Shin, H.-s., & Yang, F. (2009). Recent advances in membrane bioractors: membrane fouling and membrane material. *Water Research*, 43, 23.
- Pagilla, K., Shaw, A., Kuntz, T., & Schiltz, M. (2009). A systematic approach to establishing carbon footprints for wastewater treatment plants. *Water Environmental Federation*, 10.
- Safire, W. (2008, 17 February). Footprint. *The New York Times*.

- Segers, R. (2014). Rendementen en CO2-emissie van elektriciteitsproductie in Nederland, update 2012. *Webartikel 2014*.
- SKAO. (2014). *Handboek CO2 prestatieladder 2.2*. Utrecht: SKAO.
- Smokers, R. T. M., Den Boer, L. C., & Faber, J. F. (2007). State-of-the-Art CO2 en Mobiliteit. In C. Delft (Ed.), *Oplossingen voor milieu, economie en technologie*. Delft.
- Snip, L. (2009). Quantifying the greenhouse gas emissions of wastewater treatment plants. *Wageningen University, Thesis project*.
- Stichting MRPI. (2013). Heavy Construction Products. *Steel Construction Products*.
- Van der Poel, M. (2007). Betongranulaat als grindvervanger. *Agrabeton*, 3, 2.
- Van der Roest, H. F., De Bruin, L. M. M., Gademan, G., & Coelho, F. (2011). Towards sustainable waste water tretment with Dutch Nereda® technology. *Water Practice & Technology*, 6(3), 4.
- Van Kleef, H. (2011). Klimaatvoetafdruk 2010. In T. investing (Ed.). Amsterdam.
- Water Environment Federation. (2007). Biological Nutrient Removal Processes *Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants* (6th ed.). Alexandria, : Water Environment Federation;.
- WBL. (2012). MDR: De Nieuwe Standaard.
- WBL. (2013). Verdygo: A new standard in wastewater treatment. Retrieved 2 May, 2014, from <http://www.verdygo.com/>
- WBL. (2014a). Intranet. Retrieved 16 juni, 2014
- WBL. (2014b). Over Ons. Retrieved 23 april, 2014
- Wiedmann, T., & Minx, J. (2007). A definition of 'Carbon Footprint'. In I. R. Consulting (Ed.), *Ecological Economics Research Trends* (Vol. 1, pp. 1-11). Hauppauge, NY: Nova Science Publishers.
- Wright, I., Kemp, S., & Williams, I. (2011). Carbon footprinting: towards a universally accepted definition. *Carbon Management*, 2(1), 10.

Bijlage I: Contactgegevens

Contactgegevens stagiair:

Naam: Tom B.J. Coenen
Opleiding: Bachelor Civiele Techniek, Universiteit Twente
Adres: Campuslaan 53 216
7522NK Enschede
E-mail: t.b.j.coenen@student.utwente.nl
Telefoonnummer: +31(0)623955627

Contactgegevens begeleider Universiteit Twente:

Naam: Dr. Ir. Denie C.M. Augustijn
Werkzaam: Vakgroep Water Engineering & Management, Universiteit Twente
Adres: Drienerlolaan 5
7522NB Enschede
E-mail: d.c.m.augustijn@utwente.nl
Telefoonnummer: +31(0)534894510

Contactgegevens begeleider WBL:

Naam: Ing. Olaf L.C. Durlinger
Werkzaam: Unit bouwen en renoveren, WBL
Adres: Maria Theresialaan 99
6040KH Roermond
E-mail: o.durlinger@wbl.nl
Telefoonnummer: +31(0)655742353

Bijlage II: Kengetallen CO₂-footprints

Categorie	Energiedragers	specifiek	Gebruikte naamgeving	eenheid	Footprint/eenheid	Bron	Opmerking
	Benzine		Benzine	kg CO ₂ /liter	2,780	1	
	Kolen	Steen- en bruinkoolbriketten	Kolen	kg CO ₂ /kg	2,315	1	
	Diesel		Diesel	kg CO ₂ /liter	3,135	1	
	Grijze stroom	van 2010 en later	Grijze energie	kg CO ₂ /kWh	0,455	1	
	Groene stroom	wind	Windenergie	kg CO ₂ /kWh	0,015	1	
	Groene stroom	Water	Waterenergie	kg CO ₂ /kWh	0,015	1	
	Groene stroom	Zon	Zonne energie	kg CO ₂ /kWh	0,080	1	
	Groene stroom	Stortgas	Stortgasenergie	kg CO ₂ /kWh	0,080	1	
	Groene stroom	Overig	Groene energie	kg CO ₂ /kWh	0,300	1	
	Gemiddelde door CBS		Gemiddeld Nederland	kg CO ₂ /kWh	0,470	13	
	LPG		LPG	kg CO ₂ /liter	1,860	1	
	Aardgas		Aardgas	kg CO ₂ /m ³	1,825	1	
	Biogas	Stortgas	Stortgasenergie	kg CO ₂ /m ³	0,400	1	
	Ruwe Olie	Aardolie	Aardolie	kg CO ₂ /kg	3,735	1	
	Kerosine		Kerosine	kg CO ₂ /kg	3,710	1	
	Smeerolie		Smeerolie	kg CO ₂ /kg	3,625	1	

Categorie	Chemie basis	specifiek	Gebruikte naamgeving	eenheid	Footprint/eenheid	Bron	Opmerking
	Bitumen	Bitumen, at refinery/RER 5	Bitumen	kg CO ₂ /kg	0,171	3	
	Ammonia		Ammoniak	kg CO ₂ /kg	1,400	2	
	Polyacrylamide	kationisch, vloeibaar, emulsie 50%	Polyacrylamide	kg CO ₂ /kg	1,150	12	
	Ijzerchloride	FeCl ₃	Ijzerchloride	kg CO ₂ /kg	1,150	12	
	Ijzersulfaat	FeSO ₄	Ijzersulfaat	kg CO ₂ /kg	0,110	12	
	Natronloog	NaOH	Natronloog	kg CO ₂ /kg	0,960	12	
	Zoutzuur	HCl	Zoutzuur	kg CO ₂ /kg	0,350	12	
	Ethylene	Ethylene, average, at plant/RER 5	Ethyleen	kg CO ₂ /kg	1,650	2	

Categorie	Kunststof	specifiek	Gebruikte naamgeving	eenheid	Footprint/eenheid	Bron	Opmerking
	HDPE	Polyethylene, HDPE, granulate, at plant	HDPE	kg CO ₂ /kg	3,447	3	
	LDPE	Polyethylene, LDPE, granulate, at plant	LDPE	kg CO ₂ /kg	3,540	3	
	PS, expandable	Polystyrene, expandable, at plant/RER 5	PS, expandable	kg CO ₂ /kg	2,495	3	
	PVC	Polyvinylchloride, at regional storage/R	PVC	kg CO ₂ /kg	4,349	3	
	Polystereen	geëxpandeerd	Polystereen, expanded	kg CO ₂ /kg	2,495	3	
		geperst	Polystereen, geperst	kg CO ₂ /kg	2,495	3	
	PET		PET	kg CO ₂ /kg	2,959	7	
	PP		PP	kg CO ₂ /kg	2,248	7	
	ABS		ABS	kg CO ₂ /kg	3,68	7	
	Nylon 6		Nylon 6	kg CO ₂ /kg	2,959	7	
	Nylon 66		Nylon 66	kg CO ₂ /kg	6,459	7	
	PC		PC	kg CO ₂ /kg	4,583	7	
	EPDM		EPDM	kg CO ₂ /kg	1,93	7	
	PUR		PUR, stijf	kg CO ₂ /kg	2,98	7	
			PUR, flexibel	kg CO ₂ /kg	3,358	7	
	Glasvezel versterkt plastic		Kunststof, glasvezel	kg CO ₂ /kg	4,339	7	
	koolstofvezel versterkt plastic		Kunststof, koolstofvezel	kg CO ₂ /kg	8,802	7	

Categorie	Ferrometalen	specifiek	Gebruikte naamgeving	eenheid	Footprint/eenheid	Bron	Opmerking
	Staal	industrieel	Staal, industrieel	kg CO ₂ /kg	0,396	11	
		92% gerecycled, wapeningsstaal	Wapeningsstaal	kg CO ₂ /kg	0,352	3	
		92% gerecycled, draad	Staaldraad	kg CO ₂ /kg	0,526	3	
		Gegalvaniseerd, 92% gerecycled	Gegalvaniseerd staal	kg CO ₂ /kg	0,435	11	
		RVS	RVS	kg CO ₂ /kg	5,457	3	

Categorie	non-Ferrometalen	specifiek	Gebruikte naamgeving	eenheid	Footprint/eenheid	Bron	Opmerking
	Lead	Lead, at regional storage/RER S	Lood	kg CO2/kg	1,459	3	
	Nickel	Nickel, 99.5%, at plant/GLO S	Nikkel	kg CO2/kg	1,340	3	
	Aluminium, ongerecycled		Aluminium, gegoten, virgin	kg CO2/kg	8	3	
		geperst	Aluminium, geperst, virgin	kg CO2/kg	8,354	3	
		geperst, geanodiseerd	Aluminium, geanodiseerd, virgin	kg CO2/kg	9,359	3	
		geperst, poedercoating	Aluminium, poedercoating, virgin	kg CO2/kg	9,205	3	
	Aluminium, gerecycled		Aluminium, gerecycled, gegoten	kg CO2/kg	0,622	3	
		geperst	Aluminium, gerecycled, geperst	kg CO2/kg	0,721	3	
		geperst, geanodiseerd	Aluminium, gerecycled, geanodiseerd	kg CO2/kg	0,887	3	
		geperst, poedercoating	Aluminium, gerecycled, poedercoating	kg CO2/kg	0,731	3	
	Aluminium		Aluminium, gegoten	kg CO2/kg	2,983		berekend met be
		geperst	Aluminium, geperst	kg CO2/kg	3,164		percentages uit a
	Koper	plaat	Koperplaat	kg CO2/kg	7,738	3	
		draad	Koperdraad	kg CO2/kg	7,477	3	
		gerecycled, leiding	Koperleiding, gerecycled	kg CO2/kg	1,002	3	

Categorie	Vezels	specifiek	Gebruikte naamgeving	eenheid	Footprint/eenheid	Bron	Opmerking
	E-glass fibre	Glass fibre, at plant/RER S	Glasvezel	kg CO2/kg	0,770	3	
	Cellulose		Cellulose	kg CO2/kg	0,612	3	
	Cement fibre board		Cementvezelplaat	kg CO2/kg	0,629	3	

Categorie	Papier	specifiek	Gebruikte naamgeving	eenheid	Footprint/eenheid	Bron	Opmerking
	geprint papier		Papier, geprint	kg CO2/kg	2,668	4	
	gerecycled papier		Papier, gerecycled	kg CO2/kg	1,552	8	

Categorie	Cement en beton	specifiek	Gebruikte naamgeving	eenheid	Footprint/eenheid	Bron	Opmerking
	Cement (Portland)	Portland calcareous cement, at plant/CI	Portland cement	kg CO2/kg	0,994	3	
	Betonblok	200 afmeting	Betonblok	kg CO2/kg	0,106	3	
		vulling	Betonvulling	kg CO2/kg	0,156	3	
		gepompte vulling	betonvulling, gepompt	kg CO2/kg	0,163	3	
		prefab, double T	Betonblok, prefab	kg CO2/kg	0,214	3	
		mortel	Betonmortel	kg CO2/kg	0,209	3	
		17,5 Mpa, voor c.a. 50% bestaande uit	Betonblok, 17,5	kg CO2/kg	0,114	3	
		30 Mpa, voor c.a. 35% bestaande uit be	Betonblok, 30	kg CO2/kg	0,159	3	
		40 Mpa, voor c.a. 20% bestaande uit be	Betonblok, 40	kg CO2/kg	0,189	3	
	granulaat	rivier	Riviergranulaat	kg CO2/kg	0,002	3	
	Asfalt		Asfalt	kg CO2/kg	0,0146	3	
	Bitumen	grondstof	Bitumen	kg CO2/kg	0,171	3	
		brandstof	Bitumen, brandstof	kg CO2/kg	3,02	3	
	Cement	gemiddeld	Cement	kg CO2/kg	0,994	3	
		droog	Cement, betondroog	kg CO2/kg	0,967	3	
		nat	Cement, betonnat	kg CO2/kg	1,021	3	
	Gips	pleister	Pleistergips	kg CO2/kg	0,218	3	
		prefab plaat	Gipsplaat	kg CO2/kg	0,421	3	

Categorie	Glas	specifiek	Gebruikte naamgeving	eenheid	Footprint/eenheid	Bron	Opmerking
	Glas	float	Vlakglas	kg CO2/kg	1,735	3	
		gelamineerd	Glas, gelamineerd	kg CO2/kg	1,743	3	
		gehard	Glas, gehard	kg CO2/kg	1,918	3	

Hout				eenheid	Footprint/eenheid	Bron	Opmerking
MDF		MDF		kg CO2/kg	-0,392	3	Absorbtie tijdens de groei meegenomen
Grenen	onbewerkt, grof	Grenen, grof		kg CO2/kg	-1,665	3	""
	onbewerkt, luchtgedroogd			kg CO2/kg	-1,657	3	""
	bewerkt, luchtgedroogd	Grenen, bewerkt		kg CO2/kg	-1,662	3	""
	bewerkt, gasgedroogd			kg CO2/kg	-1,349	3	""
	bewerkt, biologisch gedroogd			kg CO2/kg	-1,644	3	""
naaldhout	laminaat	Grenen, laminaat		kg CO2/kg	-1,141	3	""
	gezaagd, gecertificeerd	Naaldhout, gezaagd		kg CO2/kg	0,017	9	Geen CO2 absorbtie meegenomen
gematigd loofhout	gezaagd, ongecertificeerd			kg CO2/kg	0,205	9	""
	gezaagd, gecertificeerd	Loofhout, gezaagd		kg CO2/kg	0,013	9	""
tropisch loofhout	gezaagd, ongecertificeerd			kg CO2/kg	0,246	9	""
	gezaagd, gecertificeerd	Loofhout, tropisch, gezaagd		kg CO2/kg	0,229	9	""
Plaatmateriaal	gecertificeerd			kg CO2/kg	0,246	9	""
	Ongecertificeerd	Plank		kg CO2/kg	0,017	9	""
				kg CO2/kg	0,205	9	""

Keramik				eenheid	Footprint/eenheid	Bron	Opmerking
Keramische steen	nieuwe techniek	Keramik		kg CO2/kg	0,138	3	

Transport				eenheid	Footprint/eenheid	Bron	Opmerking
vrachtauto	<20 ton, bulkgoederen	Vrachtauto, <20, bulk		kg CO2/tonkm	0,295	1	
	>20 ton, bulkgoederen	Vrachtauto, >20, bulk		kg CO2/tonkm	0,110	1	
Trekker + oplegger	bulkgoederen	Trekker en oplegger, bulk		kg CO2/tonkm	0,080	1	
Trein	bulkgoederen, elektrisch/diesel	Trein, bulk		kg CO2/tonkm	0,027	1	
Binnenvaart	350 ton, bulk	Binnenvaart, 350, bulk		kg CO2/tonkm	0,070	1	
	550 ton, bulk	Binnenvaart, 550, bulk		kg CO2/tonkm	0,070	1	
	1350 ton, bulk	Binnenvaart, 1350, bulk		kg CO2/tonkm	0,060	1	
	5500 ton, bulk	Binnenvaart, 5500, bulk		kg CO2/tonkm	0,030	1	
Zeevaart	1800 ton, bulk	Zeevaart, 1800, bulk		kg CO2/tonkm	0,075	1	
	8000 ton, bulk	Zeevaart, 8000, bulk		kg CO2/tonkm	0,030	1	
	30000 ton, bulk	Zeevaart, 30000, bulk		kg CO2/tonkm	0,013	1	
bestelauto	non-bulk	Bestelauto		kg CO2/tonkm	0,630	1	
vrachtauto	3,5 - 10 ton, non-bulk	Vrachtauto, <10		kg CO2/tonkm	0,480	1	
	10 - 20 ton, non-bulk	Vrachtauto, <20		kg CO2/tonkm	0,300	1	
	>20 ton, non-bulk	Vrachtauto, >20		kg CO2/tonkm	0,130	1	
Trekker + oplegger	non-bulk	Trekker en oplegger		kg CO2/tonkm	0,095	1	
Trein	non-bulk, elektrisch/diesel	Trein, non-bulk		kg CO2/tonkm	0,022	1	
Binnenvaart	32 TEU	Binnenvaart, 32 TEU		kg CO2/tonkm	0,065	1	
	96 TEU	Binnenvaart, 96 TEU		kg CO2/tonkm	0,075	1	
	200 TEU	Binnenvaart, 200 TEU		kg CO2/tonkm	0,060	1	
	470 TEU	Binnenvaart, 470 TEU		kg CO2/tonkm	0,050	1	
Zeevaart	150 TEU	Zeevaart, 150 TEU		kg CO2/tonkm	0,085	1	
	580 TEU	Zeevaart, 580 TEU		kg CO2/tonkm	0,045	1	
	4000 TEU	Zeevaart, 4000 TEU		kg CO2/tonkm	0,023	1	

Personenvervoer				eenheid	Footprint/eenheid	Bron	Opmerking
Benzineauto	<1,4 l	Auto, benzine, <1,4		kg CO2/voertuigkm	0,185	1	
	1,4 -2,0 l	Auto, benzine, 1,4-2,0		kg CO2/voertuigkm	0,220	1	
	>2,0 l	Auto, benzine, >2,0		kg CO2/voertuigkm	0,305	1	
	gemiddeld	Auto, benzine, gemiddeld		kg CO2/voertuigkm	0,215	1	
Dieselauto	<1,7 l	Auto, diesel, <1,7		kg CO2/voertuigkm	0,155	1	
	1,7 -2,0 l	Auto, diesel, 1,7-2,0		kg CO2/voertuigkm	0,195	1	
	>2,0 l	Auto, diesel, >2,0		kg CO2/voertuigkm	0,265	1	
	gemiddeld	Auto, diesel, gemiddeld		kg CO2/voertuigkm	0,205	1	
LPG auto	gemiddeld	Auto, LPG, gemiddeld		kg CO2/voertuigkm	0,175	1	
Hybride-auto	middenklasse	Auto, hybride, midden		kg CO2/voertuigkm	0,125	1	
	Hogere klasse	Auto, hybride, hoog		kg CO2/voertuigkm	0,225	1	
Minibus	benzine	Minibus, benzine		kg CO2/voertuigkm	0,255	1	
	diesel	Minibus, diesel		kg CO2/voertuigkm	0,215	1	
	LPG	Minibus, LPG		kg CO2/voertuigkm	0,200	1	
touringcar		Touringcar		kg CO2/reizigerskm	0,045	1	
Streekbus		Streekbus		kg CO2/reizigerskm	0,095	1	
Stadsbus		Stadsbus		kg CO2/reizigerskm	0,120	1	
Stoptrein		Stoptrein		kg CO2/reizigerskm	0,100	1	
Intercity		Intercity		kg CO2/reizigerskm	0,055	1	

Materieel		Gebruikte naamgeving	eenheid	Footprint/eenheid	Bron	Opmerking
Kipwagen	400 pk	Kipwagen	kg CO2/h	44,8	10	
Graafmachine	400 pk	Graafmachine	kg CO2/h	90,0	10	
Bulldozer	400 pk	Bulldozer	kg CO2/h	192,4	10	
Shovel	400 pk	Shovel	kg CO2/h	177,2	10	
Grader	213 pk	Grader	kg CO2/h	62,2	10	
Generator	500 pk	Generator	kg CO2/h	240,5	10	
Crusher	500 pk	Crusher	kg CO2/h	240,5	10	
Betoncentrale	100 m3/h	Betoncentrale	kg CO2/h	39,1	10	
Betonmixer	350 pk	Betonmixer	kg CO2/h	168,4	10	
Betonpomp	148 pk	Betonpomp	kg CO2/h	36,0	10	
Roller	174 pk	Roller	kg CO2/h	50,8	10	
Torenkraan	310 pk	Torenkraan	kg CO2/h	149,1	10	
Mobiele kraan	420 pk	Mobiele kraan	kg CO2/h	202,0	10	
Sprinkler	40 pk	Sprinkler	kg CO2/h	97,2	10	
Dompelpomp	140 pk	Dompelpomp	kg CO2/h	34,0	10	

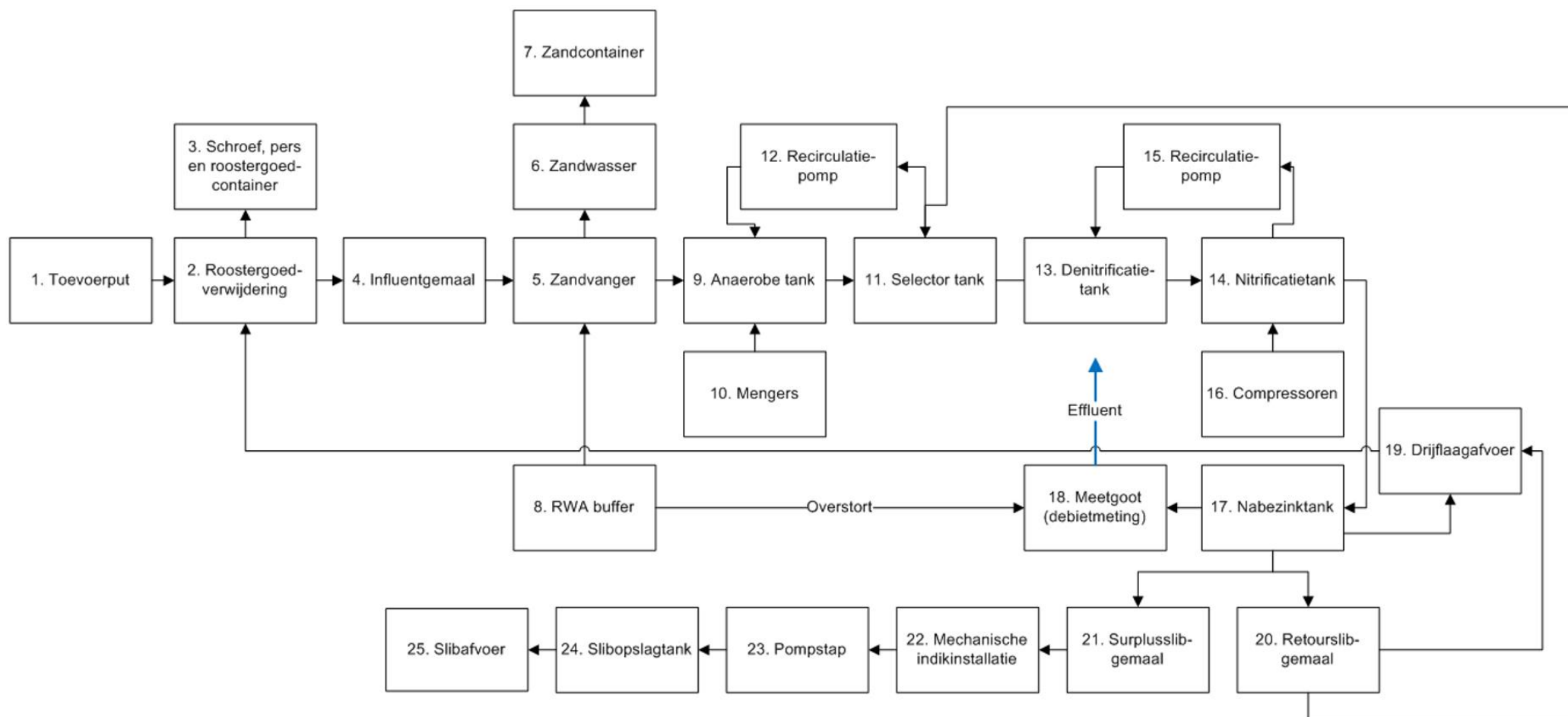
Bronnen:

- 1: SKAO (2014)
- 2: Gilbert et al. (2013)
- 3: Alcorn (2003)
- 4: Berners-Lee (2011)
- 5: Ashby (2012)
- 6: Ecofys et al. (2009)
- 7: Keoleian et al. (2012)
- 8: Ace (2011)
- 9: Bijleveld et al. (2014)
- 10: Stichting MRPI (2013)
- 11: Bouwen met Staal (2013)
- 12: Frijs et al. (2008)
- 13: Segers (2014)

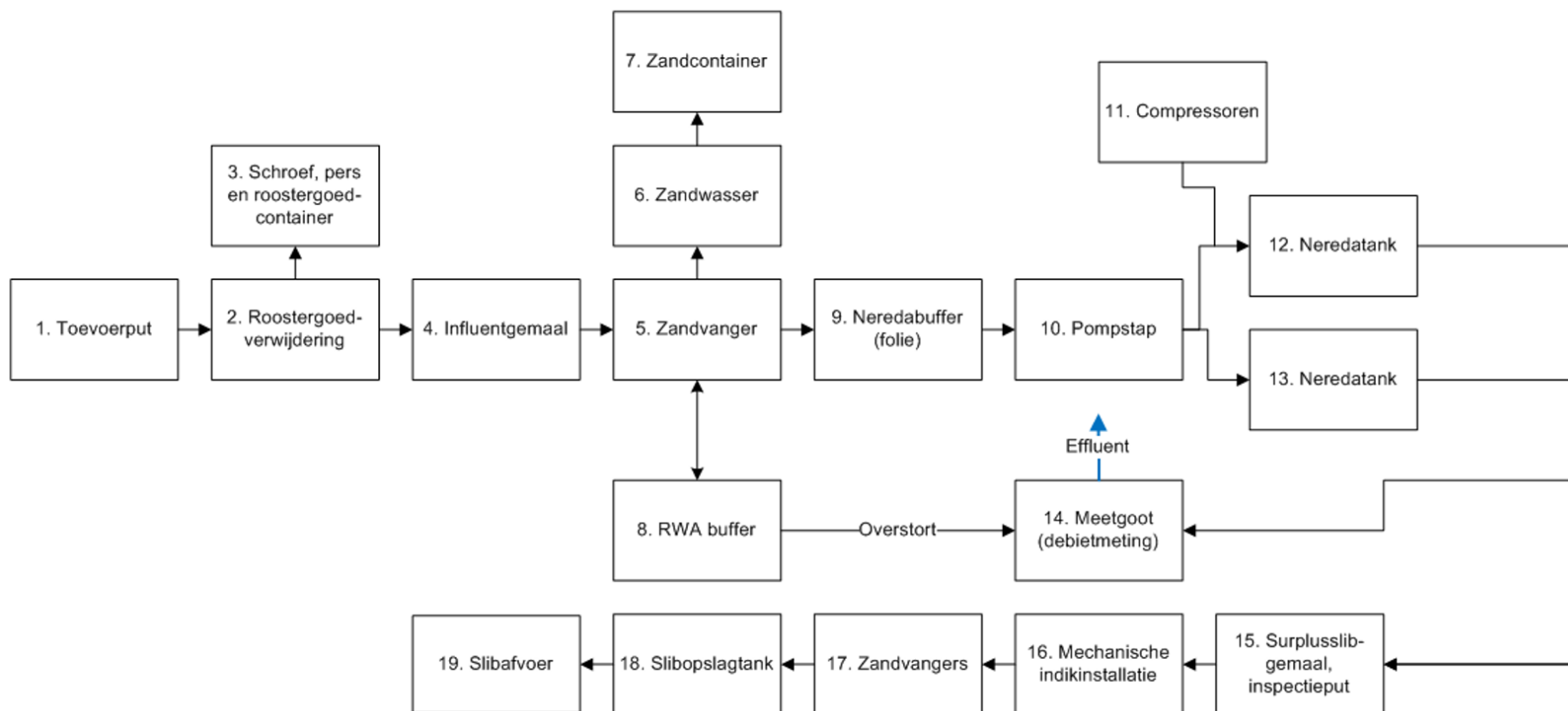
Bijlage III: Blokschema's rwzi-varianten

Deze schema's zijn voor het overzicht sterk vereenvoudigd, dus een 'blok' zal nog uit verschillende elementen, onderdelen en processtappen bestaan. Zo zal een nabezinktank bijvoorbeeld uit verschillende materialen, zoals beton en wapeningsstaal, bestaan. Naast de blokschema's is in deze bijlage ook een schematisering van de twee zuiveringsprocessen te vinden.

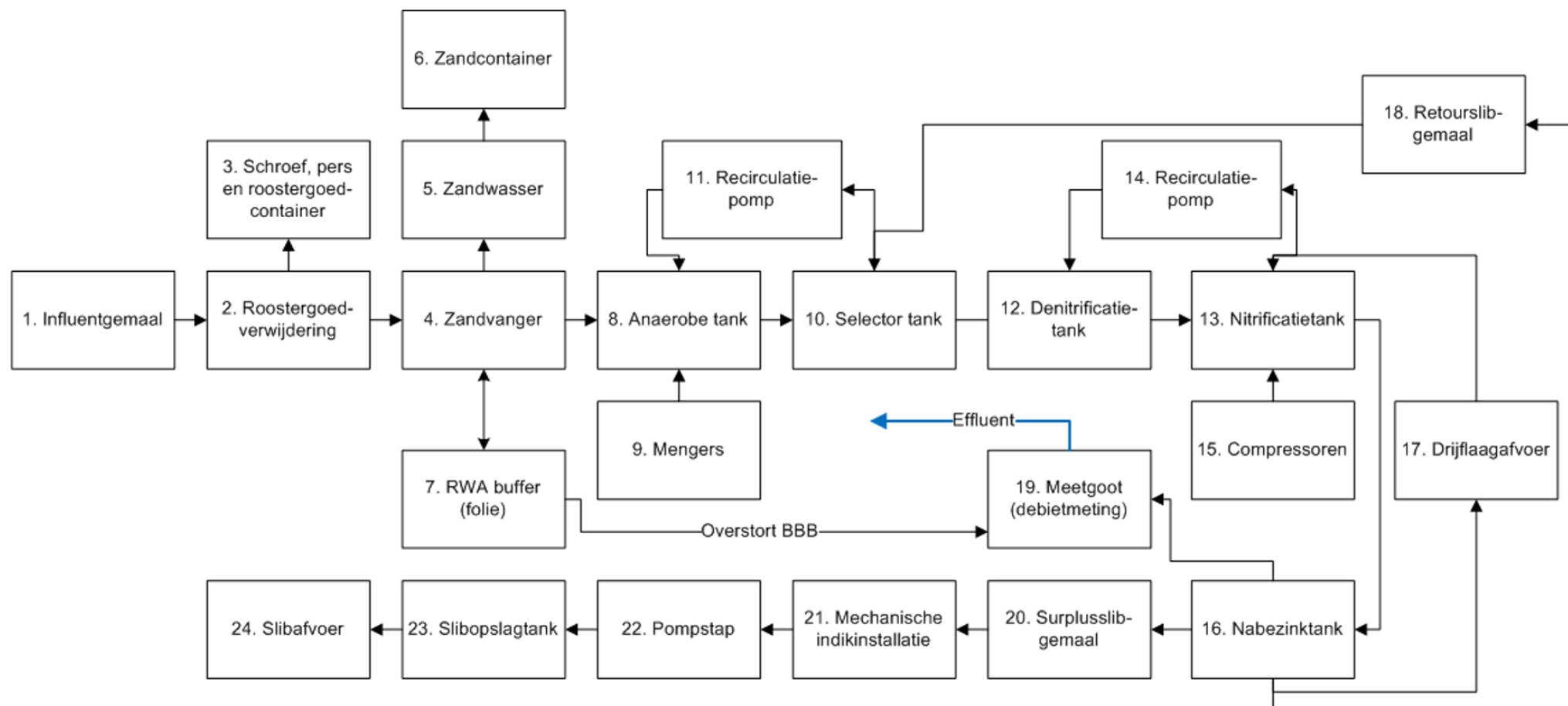
Conventionele rwzi, Ulbas-UCT



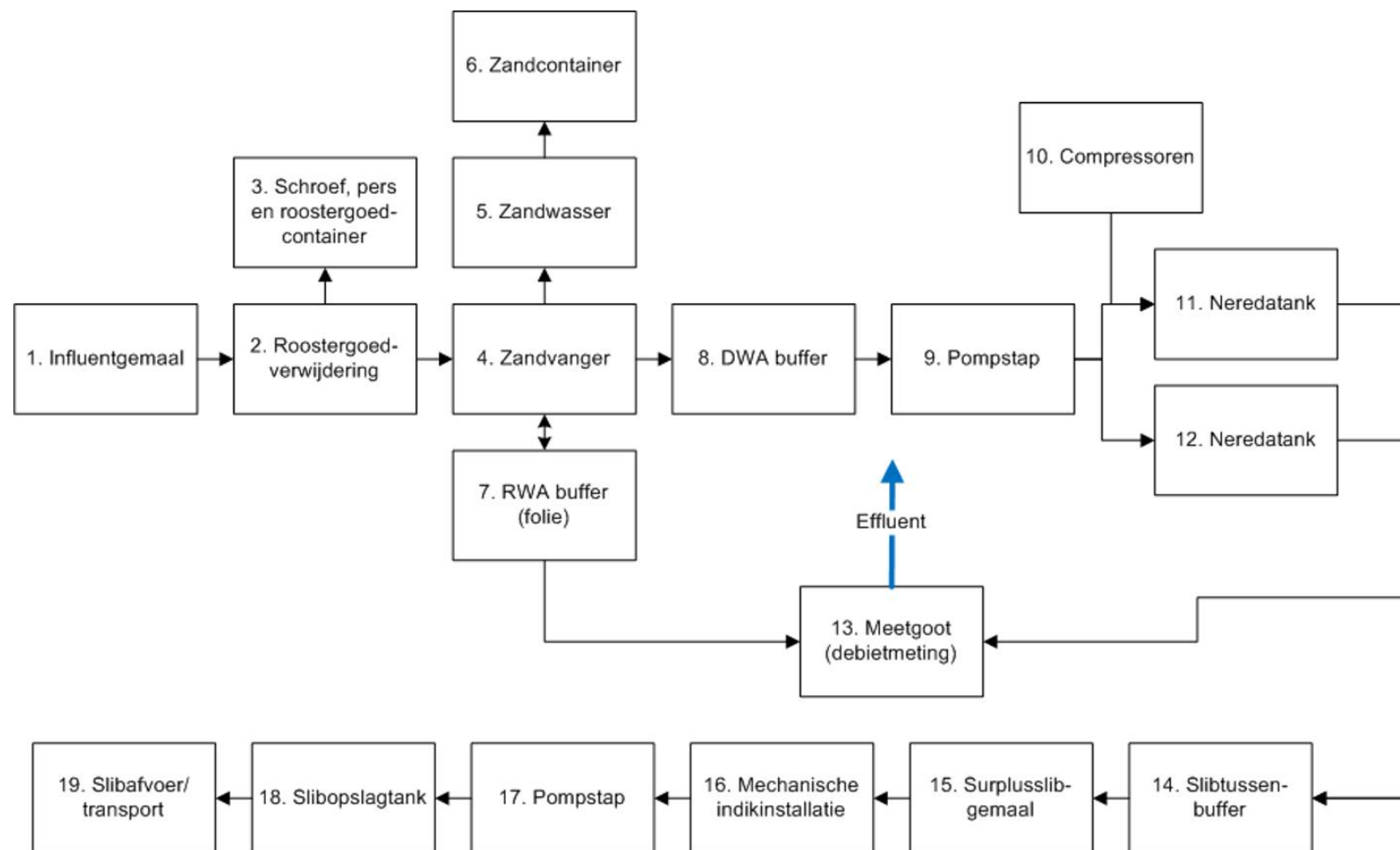
Conventionele rwzi, Nereda



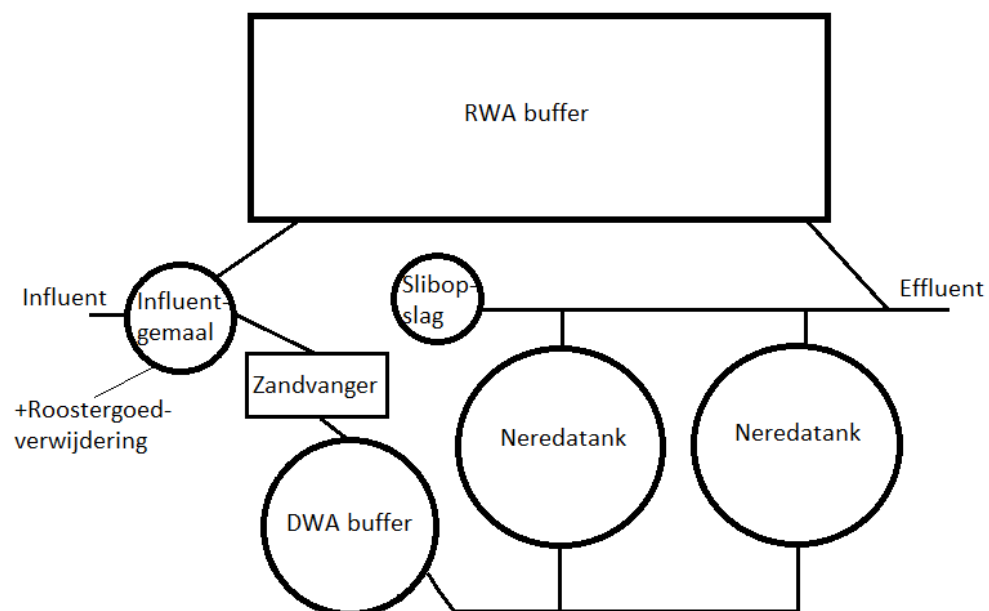
MDR, Ulbas-UCT



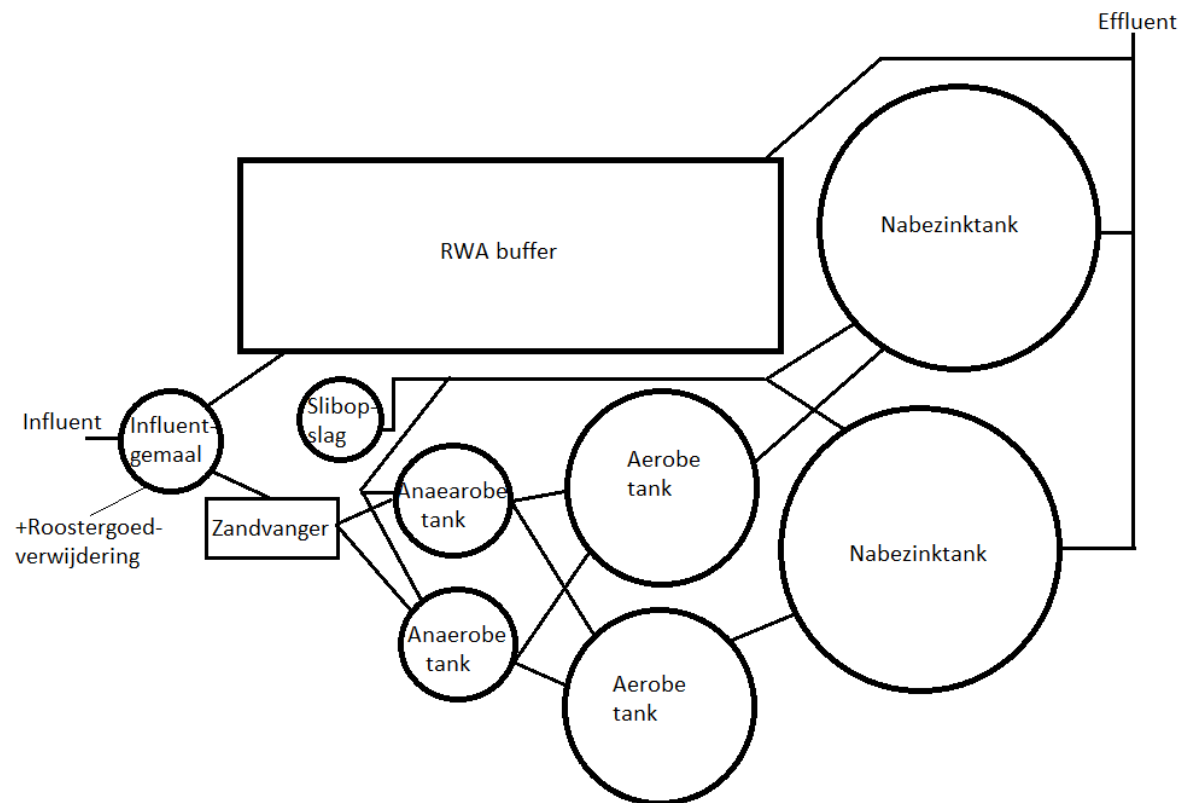
MDR, Nereda



Nereda®-zuiveringstechniek



Ulbas-UCT zuiveringstechniek



Bijlage IV: Manuren en draaiuren mobiele kraan uit investeringskosten

Aan de hand van projecten uit het verleden wordt een gemiddeld percentage arbeidsaandeel bepaald. Hierna is het arbeidsaandeel gedeeld door het gemiddelde uurloon en is het aantal arbeidsuren per variant bepaald.

Projecten uit het verleden

Project	Aanneemsom (€)	Loonkosten (€)	Aandeel loonkosten %	Opmerking
rwzi Venray	11.160.000	2.500.000	22,4	Het loon voor kraanmachinisten was in dit project €90.000.
TDH Venlo	4.400.000	976.000	22,2	
E-kast rwzi Venlo	192.000	65.000	33,9	
Slibsilo Hoensbroek	670.570	160.000	23,9	Elektrotechnische werken zijn zeer arbeidsintensief.
Gashouder Susteren	253.000	57.000	22,5	
Slibopslag Susteren	315.700	50.000	15,8	
Roostergoed-verwijdering Heugem	721.498	160.000	22,2	Zeer dure materiaalaanschaf. Renovatie van een bestaande installatie.

Hieruit volgt een gemiddelde aandeel loonkosten van 23%. Dit zal ook worden aangehouden bij de rest van de berekeningen. De sloop is door gebrek aan aanschaf van nieuw materiaal relatief arbeidsintensiever. In samenspraak met WBL is het aandeel loonkosten in de aanneemsom voor sloop gesteld op 40%. Bij zowel de bouw als de sloop is het uurloon van de kraanmachinist gesteld op 1% van de begroting. Dit volgt uit het feit dat uit de begroting van het verbouwen en uitbreiden van rwzi Venray een kostenpost van €90.000 begroot is, wat bij benadering 1% van de totale aanneemsom is. Ook dit is op basis van projecten in het verleden bepaald. Het uurloon van de kraanmachinist wordt hier dan ook niet meegenomen in het aandeel loonkosten bouwperoneel in het project. Op basis van gegevens van WBL is het gemiddelde bruto uurloon op de bouwplaats bepaald op €50. Een kraanmachinist verdient gemiddeld €60 bruto per uur³. De arbeidsuren en draaiuren van de kraan die hier uit volgen zijn cumulatief de uren van alle werknemers en aanwezige kranen.

<i>MDR ulbas-UCT</i>	Aanneemsom (€)	Arbeidskosten (€)	Kosten kraanmachinist (€)	Arbeidsuren	Uren kraanmachinist
Bouwkosten	15.900.000	3.657.000	159.000	73.100	2.650
Sloopkosten	840.000	193.200	8.400	3.900	140

<i>MDR Nereda®</i>	Aanneemsom (€)	Arbeidskosten (€)	Kosten kraanmachinist (€)	Arbeidsuren	Uren kraanmachinist
Bouwkosten	15.000.000	3.450.000	150.000	69.000	2.500
Sloopkosten	840.000	193.200	8.400	3.900	140

³ Op basis van intern overleg bij WBL vastgesteld. Dit is de prijs die de aannemer aan de opdrachtgever rekent.

<i>Conventioneel ulbas-UCT</i>	Aanneemsom (€)	Arbeidskosten (€)	Kosten kraanmachinist (€)	Arbeidsuren	Uren kraanmachinist
Bouwkosten	19.800.000	4.554.000	198.000	91.100	3.300
Sloopkosten	1.320.000	303.600	13.200	6.100	220

<i>Conventioneel Nereda®</i>	Aanneemsom (€)	Arbeidskosten (€)	Kosten kraanmachinist (€)	Arbeidsuren	Uren kraanmachinist
Bouwkosten	18.500.000	4.255.000	185.000	85.100	3.080
Sloopkosten	1.320.000	303.600	13.200	6.100	220

Bijlage V: Totale fasering rwzi

