



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Carbon footprint reduction of the operating room: tools to mitigate the environmental impact of surgical practice

Friedericy, H.J.

Citation

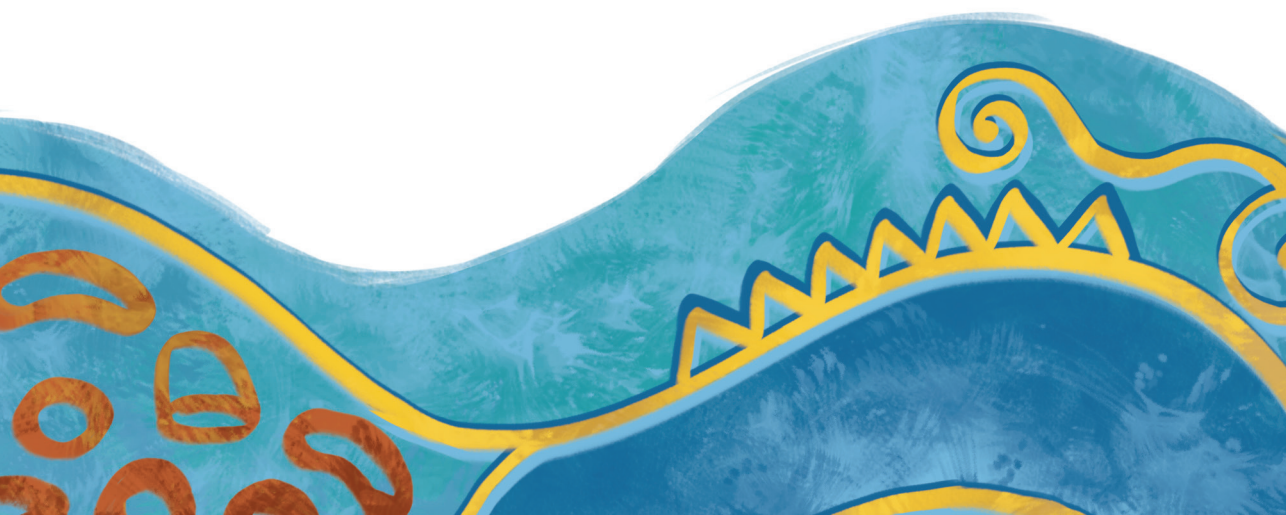
Friedericy, H. J. (2026, September 30). *Carbon footprint reduction of the operating room: tools to mitigate the environmental impact of surgical practice*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4310441>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/4310441>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).



APPENDICES



Nederlandse samenvatting

Achtergrond

Het tijdperk waarin we momenteel leven, wordt doorgaans het Antropoceen genoemd: het tijdperk dat wordt gekenmerkt door ingrijpende menselijke invloeden, zoals de uitstoot van broeikasgassen, grootschalige ontbossing en de verspreiding van microplastics.¹ Sinds de jaren vijftig is de impact van de mens op het milieu versneld, wat heeft geleid tot een dramatische toename van de hoeveelheid broeikasgassen in de atmosfeer, met als gevolg dat de mondiale temperatuur vandaag de dag bijna 1,5 °C (boven het pre-industriële niveau) is gestegen. Klimaatverandering wordt veroorzaakt door de opwarming van de aarde als gevolg van broeikasgasemissies en heeft grote gevolgen voor het welzijn van de mens. Extreme weersomstandigheden zoals hittegolven, extreme neerslag en extreme droogte hebben onmiskenbare gevolgen voor de menselijke gezondheid en eisen wereldwijd steeds meer levens en brengen de gezondheid van mensen in gevaar. Paradoxaal genoeg draagt de gezondheidszorgsector aanzienlijk bij aan de uitstoot van broeikasgassen zoals CO₂ in de atmosfeer en is daardoor medeverantwoordelijk voor de negatieve effecten van klimaatverandering op de volksgezondheid.

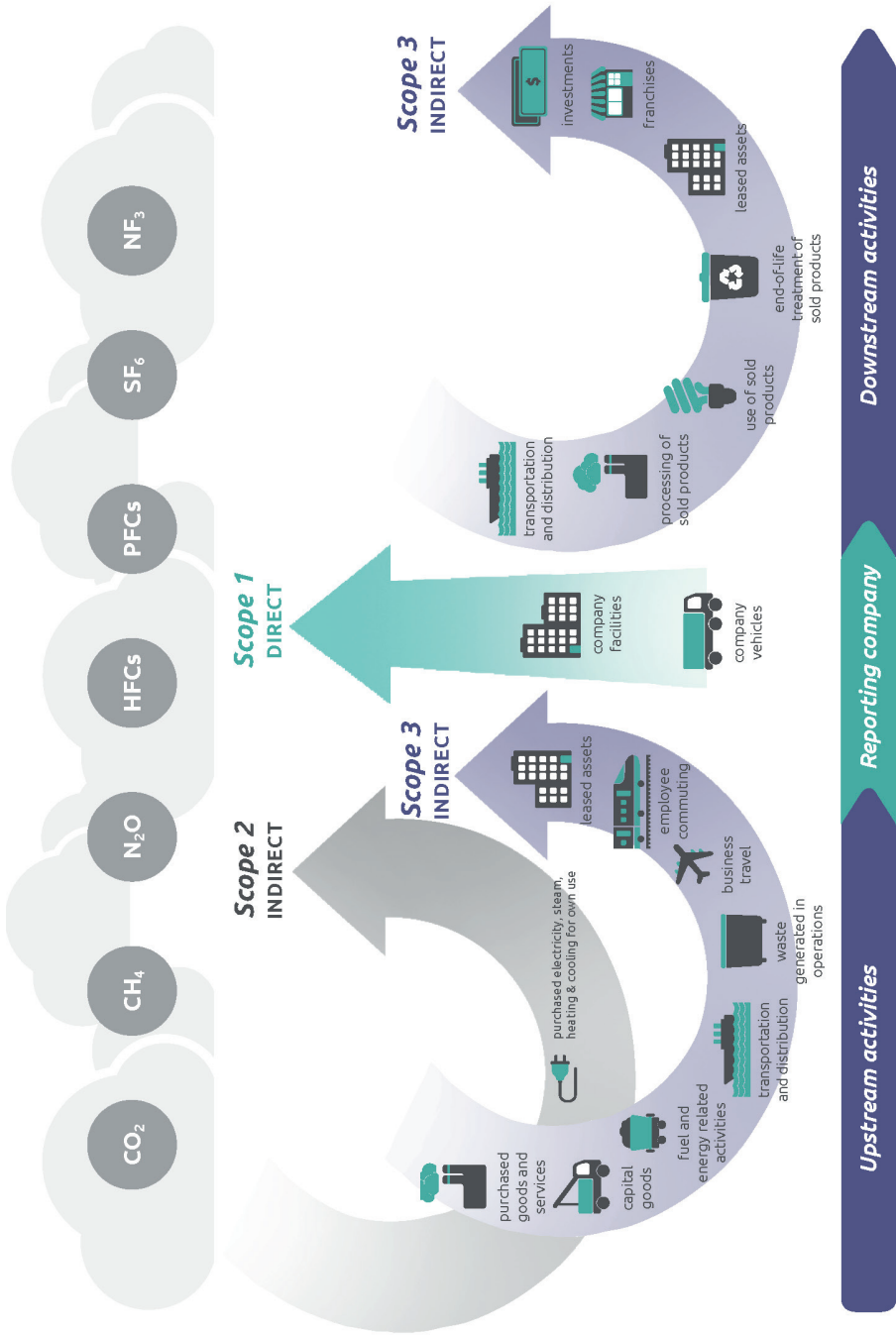
De gezondheidszorg duurzamer maken

De Wereldgezondheidsorganisatie (WHO) heeft aangegeven dat klimaatverandering een van de ernstigste wereldwijde bedreigingen voor de volksgezondheid van de 21e eeuw is en benadrukt dat het koolstofarm maken (de-carboniseren) van gezondheidszorgstelsels wereldwijd essentieel is om zowel de klimaatverandering tegen te gaan als de volksgezondheid te beschermen. Operatiekamers (OK's), die bekend staan om hun hoge energieverbruik, groot verbruik van goederen en aanzienlijke afvalproductie, bieden kansen met een grote impact voor het verminderen van uitstoot van broeikasgassen in de gezondheidszorg. Dit plaatst ze in het hart van strategieën voor het de-carboniseren van ziekenhuizen met maatregelen zoals energie-efficiëntie, vermindering van vervuiling, duurzaam afvalbeheer en efficiënt gebruik van hulpbronnen.

Het meten en berekenen van CO₂-uitstoot (CO₂-voetafdruk)

Om de CO₂-uitstoot van een product, organisatie of activiteit te kwantificeren, kan een CO₂-voetafdruk worden berekend. Een CO₂-voetafdruk wordt gedefinieerd als 'de hoeveelheid directe en indirecte CO₂-uitstoot die door een activiteit wordt veroorzaakt of die tijdens de levenscyclus van een product wordt gegenereerd'.² De berekening kan worden uitgevoerd door middel van een levenscyclusanalyse (LCA). Met deze 'van wieg tot graf'-methode ('cradle-to-grave') wordt de milieu-impact gedurende de gehele levenscyclus van een product berekend, van de winning van grondstoffen tot productie, transport, gebruik en afvalverwerking. De CO₂-voetafdruk wordt uitgedrukt in CO₂-equivalenten (CO₂-eq), een meeteenheid die wordt gebruikt om de klimaateffecten van verschillende





Figuur 1. Overzicht van de scopes van het GHG Protocol.³

broeikasgassen te standaardiseren. Het 'Greenhouse Gas Protocol' is de standaard voor het rapporteren van de CO₂-voetafdruk van bedrijven en organisaties.³ Volgens dit protocol worden broeikasgasemissies ingedeeld in drie scopes: Scope 1 omvat directe emissies van broeikasgassen; Scope 2 omvat indirecte emissies die voortvloeien uit de opwekking van ingekochte elektriciteit of warmte; en Scope 3 omvat alle andere indirecte emissies die voortvloeien uit de productie van goederen, afvalverwerking en het vervoer van personeel en patiënten (Figuur 1).

De CO₂-voetafdruk van de operatiekamer

Scope 1. Directe uitstoot als gevolg van inhalatie-anesthetica

Inhalatie-anesthetica worden al sinds de eerste etherverdoving in 1846 door William Morton gebruikt om algehele anesthesie voor operaties op te wekken. Deze middelen zijn krachtige broeikasgassen die vrijwel niet door het lichaam worden geklaard en na de operatie onveranderd via de uitgeademde lucht in de atmosfeer terechtkomen, waar ze verblijven totdat ze zijn afgebroken. Lachgas blijft bijvoorbeeld 114 jaar in de atmosfeer voordat het wordt afgebroken en is een 298 keer sterker broeikasgas dan CO₂. Het moderne inhalatie-anestheticum desfluraan is zelfs een 2540 keer sterker broeikasgas dan CO₂.

Scope 2. Indirecte emissies als gevolg van de luchtbehandeling

Om besmetting van de wond via de lucht te voorkomen, zijn operatiekamers uitgerust met verwarmings-, ventilatie- en airconditioningsystemen (HVAC). Frequentie en hoogwaardige luchtfiltering vermindert de concentratie van ziekteverwekkers in de lucht afkomstig van de huid en neus-keelholte van de aanwezigen op de OK, waardoor de kans op besmetting van de wond via de lucht wordt verminderd. Vanwege de hoge eisen die aan de luchtkwaliteit in de OK worden gesteld, is 90-99% van het energieverbruik van het OK-complex toe te schrijven aan de luchtbehandeling.⁴

Scope 3. Indirecte emissies als gevolg van de inkoop van goederen en de productie van afval

Voor het uitvoeren van medische handelingen is vaak een breed scala aan verbruiksartikelen nodig. Hieronder vallen persoonlijke beschermingsmiddelen, chirurgische instrumenten, wondverzorgingsproducten, anesthesiebenodigdheden, steriele afdekmaterialen et cetera. Het merendeel van deze chirurgische producten is momenteel bedoeld voor eenmalig gebruik (disposable), vanuit de gedachte dat wegwerpartikelen veiliger, zuiniger en handiger in het gebruik zouden zijn. Dit blijkt veelal niet het geval te zijn, maar voor wegwerpartikelen is wel een aanzienlijke



hoeveelheid grondstoffen nodig. De productie, verpakking, het transport en de afvalverwerking ervan genereren grote hoeveelheden verborgen CO₂-emissies, die zich gedurende de gehele levenscyclus van het product opstapelen. In een onderzoek in drie grote Westerse ziekenhuizen bleek het afval van verschillende operaties gemiddeld 14,5 kg per operatie te bedragen.⁴

Doel en opzet van dit proefschrift

Het doel van dit proefschrift is te onderzoeken hoe de CO₂-voetafdruk van OK's kan worden verminderd om de impact van de gezondheidszorg op het milieu te verminderen, zonder de patiëntveiligheid daarbij in gevaar te brengen. Daartoe zullen we ons richten op die gebieden die een grote impact hebben op de CO₂-voetafdruk van een OK, het zogenaamde 'laaghangend fruit'. Door deze potentiële snelle successen aan te pakken, willen we bijdragen aan de doelstelling van de WHO om tegen 2050 een klimaat neutrale gezondheidszorg te realiseren.

In deel I van dit proefschrift wordt gekeken naar het terugdringen van de belangrijkste factoren binnen Scope 1, 2 en 3 van de OK: het gebruik van inhalatie-anesthetica, het energieverbruik als gevolg van luchtbehandeling en de afvalproductie door veelgebruikt sterilisatieverpakkingsmateriaal voor chirurgische instrumenten. Daarnaast wordt onderzocht of de CO₂-voetafdruk van een hartklepvervanging – een ingrijpende operatie waarbij veel materialen en energie wordt verbruikt – kan worden verminderd.

In deel II van dit proefschrift worden twee instrumenten ontwikkeld om de CO₂-uitstoot te kwantificeren en 'hotspots' te identificeren, zodat de CO₂-uitstoot efficiënt kan worden verminderd. Het eerste instrument werkt op microniveau (specifieke operaties) en het andere op macroniveau (OK-complexen op nationale schaal).

Deel I. Onderzoek naar manieren om de CO₂-uitstoot in de operatiekamer te verminderen

In hoofdstuk 2 brengen we de omvang van de klimaatimpact van inhalatie-anesthetica in Nederland in kaart. Daarnaast inventariseren we de voorkeuren van Nederlandse anesthesiologen voor anesthesietechnieken en onderzoeken we mogelijkheden om de uitstoot van broeikasgassen als gevolg van de anesthesiepraktijk te verminderen. We stellen een relatief lage uitstoot van broeikasgassen als gevolg van inhalatie-anesthetica in de Nederlandse gezondheidszorg vast die kan worden verklaard door het beperkte gebruik van lachgas en desfluraan door Nederlandse anesthesiologen en hun sterke voorkeur voor intraveneus (via de bloedbaan) toegediend propofol als anestheticum.

In hoofdstuk 3 onderzoeken we of het risico op postoperatieve wondinfecties na openhartchirurgie is afgenomen na de overstap van een luchtbehandelingssysteem met luchtstroming o.b.v. turbulente menging (TMA) naar een systeem o.b.v. unidirectionele luchtstroming (UDAF). Van de laatste is bekend dat de lucht in de OK schoner is, maar dat dit gepaard gaat met een energieverbruik dat wel twee maal zo hoog is.^{5,6} Op basis van onze resultaten lijkt er geen aanwijzing te zijn dat UDAF wondinfecties van het borstbeen en/of de weefsels daarachter (mediastinitis) bij openhartchirurgie vermindert. Het gebruik van UDAF bij openhartoperaties moet daarom worden afgewogen tegen de lage kosteneffectiviteit ervan en de negatieve gevolgen voor het milieu als gevolg van het hoge elektriciteitsverbruik. Door gebruik te maken van TMA bij openhartchirurgie kan energieverspilling worden tegengegaan en kan de CO₂-voetafdruk van OK's worden verkleind.

Het veel voorkomende gebruik van wegwerpverpakkingen voor de sterilisatie van chirurgische instrumenten (blue wrap) is een belangrijke bron van plastic afval op een OK. Harde (aluminium) sterilisatiecontainers (RSC's) vormen qua kwaliteit en prijs een goed alternatief dat in veel landen buiten Nederland wordt gebruikt. In hoofdstuk 4 onderzoeken wij het milieuvoordeel van RSC bij grote volumes in grote ziekenhuizen, en voor kleine ziekenhuizen het break-evenpunt waarbij het milieuvoordeel optreedt. We gebruiken een LCA om de twee systemen te vergelijken. De door ons geanalyseerde RSC heeft een 85% lagere CO₂-voetafdruk dan blue wrap, er is al sprake van een milieu-break-evenpunt na 98 van de 5.000 gebruikscycli. Gezien het feit dat deze twee alternatieve verpakkingssystemen vergelijkbare kosten en kwaliteit hebben, blijkt uit onze resultaten dat de CO₂-voetafdruk van OK's significant gereduceerd kan worden wanneer RSC de voorkeur krijgt boven blue wrap als verpakkingssysteem voor steriele chirurgische instrumenten.

Openhartoperaties zijn uitgebreide ingrepen die lang duren en waarbij veel materialen worden gebruikt. Een vervanging van de aortaklep wordt meestal chirurgisch gedaan (SAVR) via het openen van het borstbeen, maar sinds een aantal jaren is het ook mogelijk om dat via de liesvaten te doen (TF-TAVI). Bij ernstige aortaklepvernauwing is gebleken dat TF-TAVI een voordeel oplevert wat betreft sterfte en kosten, en bovendien in meer kwaliteit gecorrigeerde levensjaren resulteert.^{7,8} Voor een afweging tussen de klinische en financiële voordelen enerzijds en de milieu-impact anderzijds is tot nu toe onvoldoende informatie beschikbaar. Het doel van ons onderzoek in hoofdstuk 5 is het uitvoeren van een uitgebreide vergelijkende LCA van deze twee ingrepen. In ons onderzoek heeft TF-TAVI een CO₂-voetafdruk die 38% lager is dan die van SAVR. Bij TF-TAVI wordt 51% minder materiaal, 52% minder energie en 97% minder water gebruikt.



Deel II. Het ontwikkelen van praktische hulpmiddelen om de CO₂-voetafdruk van de operatiekamer te verkleinen

Hoofdstuk 6 beschrijft een nieuwe methode waarmee de milieu-impact van operatiekamers op een systematische manier effectief kan worden verbeterd. Bij deze nieuwe methode, de zogenaamde Healthcare Sustainability Mode and Effect Analysis (HSMEA), inventariseert een multidisciplinair team aan de hand van een gestructureerde, stapsgewijze aanpak systematisch chirurgisch afval, kwantificeert het de milieueffecten ervan, brengt het knelpunten in kaart en biedt het oplossingen voor verbetering. De HSMEA is een praktisch hulpmiddel voor op de werkvloer dat helpt bij het verminderen van de milieu-impact van chirurgisch afval en dat bij alle soorten operaties kan worden toegepast.

In hoofdstuk 7 hebben we de Surgical Carbon Footprint Auditing Tool for Less Emissions (SCALE) ontwikkeld, een op onderzoek gebaseerd model dat wetenschappelijk gepubliceerde LCA's combineert met de dagelijkse chirurgische praktijk om de CO₂-uitstoot in OK's (op landelijk niveau) te kwantificeren en effectieve verbeteringsstrategieën te identificeren. De zes meest impactvolle maatregelen zijn het overstappen van grijze naar groene stroom, de uitfasering van lachgas en desfluraan, het gebruik van dampafvangtechnologie voor inhalatie-anesthetica, geautomatiseerde efficiënte toediening van inhalatie-anesthetica, het overgaan op herbruikbare steriele operatiejassen en warmteterugwinning uit uitlaatlucht van de luchtbehandeling. Tezamen waren deze zes maatregelen goed voor meer dan 95% van de door ons model berekende haalbare CO₂-emissiereductie op OK's.

Strategieën om de CO₂-voetafdruk van de OK te verminderen

In hoofdstuk 8 bespreken we strategieën voor het terugdringen van de CO₂-uitstoot van de OK. Hiervoor hebben we gebruik gemaakt van de R-ladder ('Reduce, Reuse, Recycle'), een model voor de overgang van een lineaire naar een circulaire economie op basis van hiërarchische maatregelen.⁹ Deze R-ladder heeft drie hoofddoelstellingen: afval vermijden, de levensduur van producten verlengen en afval recycleren.

Scope 1. Verminderen van uitstoot van inhalatie-anesthetica

Anesthesiologen moeten voor algehele narcose het middel propofol verkiezen boven inhalatie-anesthetica. Dit narcosemiddel, dat via de bloedbaan wordt toegediend, veroorzaakt vrijwel geen broeikasgasuitstoot.^{10,11} Indien anesthesiologen toch voor inhalatie-anesthesie kiezen, moeten ze de voorkeur geven aan het middel sevofluraan in plaats van desfluraan. Desfluraan heeft een aardopwarmingsvermogen dat 2540 keer

zo hoog is als dat van CO₂ en is verantwoordelijk voor 70% van de totale wereldwijde uitstoot van inhalatie-anesthetica.¹² Internationaal zijn er inmiddels maatregelen genomen om desfluraan uit te faseren; de EU legt vanaf 2026 strenge beperkingen op aan het gebruik ervan. Daarnaast moeten anesthesiologen het inhalatie-anestheticum sevofluraan op verantwoorde wijze gebruiken om de uitstoot van dit broeikasgas te beperken. Hiervoor zijn twee belangrijke technische ontwikkelingen beschikbaar: geautomatiseerde efficiënte toediening en dampafvangtechnologie. De eerste zorgt voor een zuinige toediening van sevofluraan, terwijl de tweede het mogelijk maakt een deel van het uitgeademde sevofluraan op te vangen voordat het in de atmosfeer terechtkomt met zelfs de mogelijkheid tot recycling voor hergebruik.^{13,14} Fabrikanten moeten deze aanpassingen standaard in hun beademingsapparaten inbouwen.

Lachgasgebruik is een belangrijke bron van aan de medische sector toe te schrijven broeikasgasemissies. Het verwijderen van lachgas uit het armamentarium van de anesthesioloog zou een doeltreffende maatregel zijn om de CO₂-uitstoot van de OK te verminderen. Verenigingen voor anesthesiologie moeten hun leden duidelijk maken dat lachgas in de moderne anesthesiologiepraktijk achterhaald is.

Scope 2. Verminderen van CO₂-uitstoot t.g.v. elektriciteitsverbruik

Ziekenhuizen moeten hun elektriciteitsvoorziening decarboniseren (groene stroom inkopen) en prioriteit geven aan energie-efficiëntie. Afdelingen Facilitair Beheer van ziekenhuizen moeten ervoor zorgen dat hun luchtbehandelingssystemen energiezuinig zijn door maatregelen te nemen zoals luchtrecirculatie, warmteterugwinning en het terugregelen van luchtbehandeling tijdens periodes dat de OK niet in gebruik is. Hiervan is aangetoond dat deze energiebesparende strategie het energieverbruik tot wel 70% kan verminderen.^{15,16}

Verenigingen van medisch specialisten moeten er via richtlijnen voor zorgen dat er geen onnodig strenge normen voor de luchtzuiverheid in OK's worden opgelegd als daar geen wetenschappelijk bewijs voor is. Voor veel operaties geldt dat ultra-zuivere luchtomstandigheden die worden gecreëerd door ventilatie met eenrichtingsluchtstroom (UDAF) het aantal gevallen van postoperatieve wondinfecties niet verminderen, en dat er bij deze operaties gekozen moet worden voor energiezuinigere instellingen of systemen zoals TMA.

Scope 3. Verminderen van indirecte CO₂-uitstoot t.g.v. producten en afval

Om de grote hoeveelheden verborgen CO₂-uitstoot en afval van verbruiksartikelen in de OK terug te dringen, moet de inkoopafdeling bij aanbestedingen naast de prijs ook de duurzaamheid van producten meewegen. Er moet de voorkeur worden gegeven



aan herbruikbare producten, zoals bijvoorbeeld steriele operatiejassen en aluminium containers, in plaats van wegwerpartikelen. Het personeel op de werkvloer moet alert zijn op verspilling van materialen, water en energie, aangezien hier de grootste winst te behalen valt wat betreft het terugdringen van de uitstoot van broeikasgassen. Ten slotte moet de afdeling infectiepreventie ervoor zorgen dat er geen onnodig strenge hygiëne-eisen worden opgelegd als er geen wetenschappelijk bewijs is om deze te ondersteunen; dit maakt aanzienlijke besparingen mogelijk in het gebruik van bijvoorbeeld persoonlijke beschermingsmiddelen.

Toekomstperspectieven & onderzoek

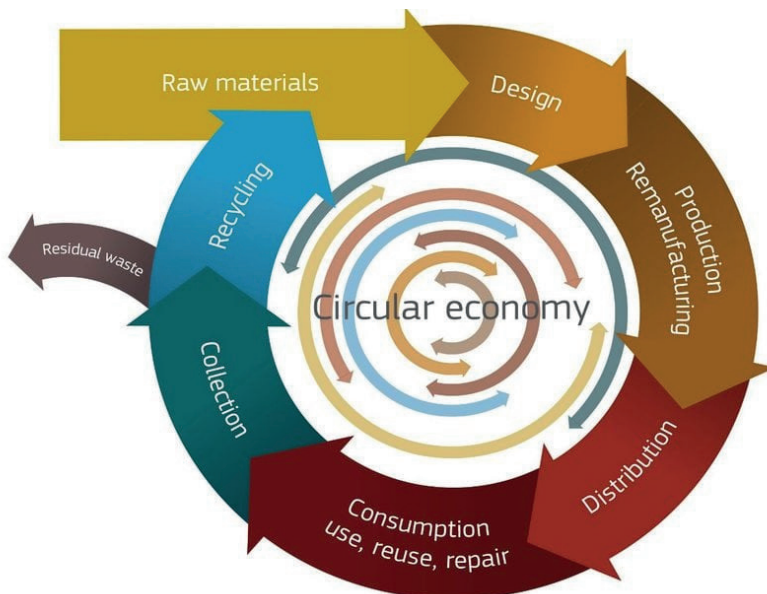
In dit proefschrift tonen we aan dat het mogelijk is de uitstoot van broeikasgassen door OK's aanzienlijk te verminderen. Zowel de Scope 1- als de Scope 2-uitstoot worden grotendeels beïnvloed door ziekenhuizen en kunnen daarom met de juiste maatregelen tot vrijwel nul worden teruggebracht. De Scope 3-uitstoot maakt naar schatting echter meer dan 71% uit van de totale uitstoot van de gezondheidszorgsector.¹⁷ Het is daarom van cruciaal belang dat toekomstig onderzoek zich richt op het terugdringen van Scope 3-emissies in de gezondheidszorg.

De belangrijkste manier om dit te bereiken is door de overgang van een lineaire naar een circulaire economie. Een circulaire economie heeft tot doel de waarde van producten, materialen en hulpbronnen zo lang mogelijk te behouden (Figuur 2). Dit leidt niet alleen tot een lager verbruik van grondstoffen, maar ook tot lagere CO₂-emissies omdat er minder materialen en producten hoeven te worden vervaardigd, wat betekent dat er minder energie wordt verbruikt voor productie en transport. Bovendien wordt er minder afval geproduceerd, wat ook resulteert in een vermindering van de broeikasgasemissies als gevolg van verbranding of vuilstorting.

Toekomstig onderzoek zou zich moeten richten op circulair productontwerp voor medische toepassingen. Productfabrikanten moeten samenwerken met technische onderzoekers en zorgprofessionals om duurzame producten te ontwerpen die eenvoudig te demonteren, te repareren en herbruikbaar zijn en die kenmerken vertonen zoals modulariteit, aanpasbaarheid en veelzijdigheid.¹⁹ Voorbeelden hiervan zijn laparoscopische instrumenten, robotinstrumenten en endoscopen.

Toekomstig onderzoek door technische onderzoekers, zorgprofessionals en financiële experts, in samenwerking met fabrikanten, zou de mogelijkheden voor het concept 'product as a service' in de OK moeten onderzoeken. Een voorbeeld hiervan is dat het

bedrijf Philips licht als dienst aanbiedt in plaats van gloeilampen als product (Circular Lighting). In dit concept blijft de leverancier eigenaar van het product en draagt het de kosten voor de elektriciteit, het onderhoud en de afvalverwerking aan het einde van de levensduur. Daartoe heeft Philips lampen en armaturen zodanig geïnnoveerd dat ze een zo lang mogelijke levensduur hebben, energiezuinig zijn en een modulair ontwerp hebben.²⁰ Dit zijn allemaal kenmerken die passen bij een circulaire economie. Onderzocht moet worden of apparaten op OK's hiervoor in aanmerking zouden kunnen komen, zoals beademingsapparaten, defibrillatoren, elektrocauterisatieapparaten en operatielampen.



Figuur 2. Eenvoudige weergave circulaire economie.¹⁸

Referenties

1. Crutzen PJ. Geology of mankind. *Nature*. 2002;415(6867):23–23.
2. Wiedmann T, Minx J. A Definition of Carbon Footprint. *CC Pertsova, Ecological Economics Research Trends*. 2008;2:55–65.
3. Greenhouse Gas Protocol. <http://ghgprotocol.org>. Accessed 16-02, 2026.
4. MacNeill AJ, Lillywhite R, Brown CJ. The impact of surgery on global climate: a carbon footprinting study of operating theatres in three health systems. *Lancet Planet Health*. 2017;1(9):e381–e388.
5. Alsved M, Civilis A, Ekolind P, et al. Temperature-controlled airflow ventilation in operating rooms compared with laminar airflow and turbulent mixed airflow. *Journal of Hospital Infection*. 2018;98(2):181–190.
6. Fan M, Cao G, Pedersen C, Lu S, Stenstad L-I, Skogås JG. Suitability evaluation on laminar airflow and mixing airflow distribution strategies in operating rooms: A case study at St. Olavs Hospital. *Building and Environment*. 2021;194:107677.
7. Fong KY, Yap JLL, Chan YH, et al. Network Meta-Analysis Comparing Transcatheter, Minimally Invasive, and Conventional Surgical Aortic Valve Replacement. *Am J Cardiol*. 2023;195:45–56.
8. Petrou P. The economics of TAVI: A systematic review. *Int J Cardiol Heart Vasc*. 2023;44:101173.
9. Kirchherr J, Reike D, Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resour Conserv Recy*. 2017;127:221–232.
10. Sherman J, Le C, Lamers V, Eckelman M. Life cycle greenhouse gas emissions of anesthetic drugs. *Anesth Analg*. 2012;114(5):1086–1090.
11. Hu X, Pierce JMT, Taylor T, Morrissey K. The carbon footprint of general anaesthetics: A case study in the UK. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021;167:105411.
12. Talbot A, Hollander HC, Bentzer P. Greenhouse gas impact from medical emissions of halogenated anaesthetic agents: a sales-based estimate. *Lancet Planet Health*. 2025;9(3):e227–e235.
13. Kalmar AF, Van Der Vekens N, De Rydt F, Allaert S, Van De Velde M, Mulier J. Minimizing sevoflurane wastage by sensible use of automated gas control technology in the flow-i workstation: an economic and ecological assessment. *J Clin Monit Comput*. 2022;36(6):1601–1610.
14. Gandhi J, Baxter I. Efficiency of inhaled anaesthetic recapture in clinical practice. *Brit J Anaesth*. 2023;130(6):E464–E465.
15. Cacabelos-Reyes A, Lopez-Gonzalez JL, Gonzalez-Gil A, Febrero-Garrido L, Eguia-Oller P, Granada-Alvarez E. Assessing the Energy Demand Reduction in a Surgical Suite by Optimizing the HVAC Operation During Off-Use Periods. *Appl Sci*. 2020;10(7):2233.
16. Tejero-González A, López-Pérez H, Espí-García F, Navas-Gracia LM, SanJosé-Alonso JF. Safety and Energy Implications of Setback Control in Operating Rooms during Unoccupied Periods. *Appl Sci-Basel*. 2022;12(9).
17. Keil M, Frehse L, Hagemester M, et al. Carbon footprint of healthcare systems: a systematic review of evidence and methods. *BMJ Open*. 2024;14(4):e078464.
18. World Health Organization: Assessing the health impacts of a circular economy. 2019; <https://iris.who.int/handle/10665/346222>.
19. MacNeill AJ, Hopf H, Khanuja A, et al. Transforming The Medical Device Industry: Road Map To A Circular Economy. *Health Affairs*. 2020;39(12):2088–2097.
20. Rau T, Oberhuber S. *Material Matters. Developing Business for a Circular Economy*. Routledge; 2022.