



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Future environmental impacts of metals: findings from integrated scenario assessment with prospective LCA

Harpprecht, C.I.

Citation

Harpprecht, C. I. (2026, January 23). *Future environmental impacts of metals: findings from integrated scenario assessment with prospective LCA*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4289633>

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/1887/4289633>

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

Samenvatting

De productie van metalen is niet alleen zeer energie-intensief en een belangrijke bron van broeikasgasemissies (BKG), maar veroorzaakt ook aanzienlijke milieueffecten in andere impact categorieën, zoals fijn stof, humane toxiciteit en landgebruik. Staalproductie is de grootste veroorzaker van metaalgerelateerde BKG-emissies, terwijl koperproductie de grootste impact heeft op de menselijke gezondheid en de ecosystemen, met name tijdens de winning van erts.

Historisch gezien zijn deze milieueffecten geleidelijk toegenomen. Met een groeiende bevolking en de behoefte aan metaalintensieve en koolstofarme technologieën zal de vraag naar metalen naar verwachting blijven stijgen. Dit levert aanzienlijke uitdagingen op voor klimaat- en milieudoelstellingen. Naast de vraaggroei zullen ook de metaalvoorziening en de daaraan verbonden milieueffecten waarschijnlijk veranderen door verschillende, deels samenhangende ontwikkelingen. Zo kan de noodzaak van een ingrijpende decarbonisatie de BKG-emissies verminderen, zowel in de staalproductie als in de elektriciteitsvoorziening, wat essentieel is om de uitstootintensiteit van toekomstige geëlektrificeerde processen te beperken. Anderzijds kan een mogelijke daling van de ertsgraad (het gehalte aan metaal in een erts) de mijnbouw gerelateerde milieueffecten, bijvoorbeeld bij koperproductie en nikkelproductie, verder verergeren.

In het licht van klimaat- en milieudoelstellingen is het van groot belang de drijvende krachten en hotspots van toekomstige effecten van de metaalvoorziening te identificeren, zodat besluitvorming voor mitigatie effectief kan worden ondersteund. Een goed overzicht van de toekomstige milieu-implicaties van metaalproductie ontbreekt echter nog.

Dit proefschrift richt zich op de beoordeling van de toekomstige milieuprofielen van de metaalvoorziening, met bijzondere aandacht voor de effecten van ertsgraden, decarbonisatieroutes in de staalproductie en ontwikkelingen in gerelateerde systemen, in het bijzonder de elektriciteitsvoorziening.

De belangrijkste toegepaste methode is levenscyclusanalyse (LCA), waarmee milieueffecten vanuit een systeemperspectief kunnen worden geëvalueerd. LCA geeft namelijk zowel de volledige productieketens als sectorale afhankelijkheden weer. Meer in het bijzonder wordt 'prospective' (toekomstgerichte) LCA (pLCA) toegepast om toekomstige systemen te analyseren door scenario's te integreren. Omdat metaalproductie nauw verbonden is met de energiesector, gaat dit proefschrift in op de methodologische uitdaging om multisectorale scenario's voor onderling verbonden sectoren consistent te integreren in één pLCA-model, in het bijzonder een Life cycle inventory (LCI)-database. Een dergelijke *geïntegreerde* aanpak maakt het mogelijk rekening te houden met onderlinge sectorale afhankelijkheden.

Hoofdstuk 2 omvat een systematisch literatuurreview van bestaand onderzoek naar de toekomstige milieueffecten van de metaalvoorziening. Hierin worden toekomstige trends qua milieupacten, de belangrijkste drijvende krachten en de toegepaste methodologische benaderingen samengevat.

De resultaten tonen aan de bestaande literatuur onvoldoende aandacht schenkt aan de toekomstige milieueffecten van metalen. De literatuurstudie leverde 40 publicaties op, maar deze richtten zich slechts op 15 metalen (koper, ijzer, aluminium, nikkel, zink, lood, kobalt, lithium, goud, mangaan, neodymium, dysprosium, praseodymium, terbium en titanium). Metalen die cruciaal zijn voor de energietransitie, zoals lithium of neodymium, komen zelden aan bod, in tegenstelling tot de bulkmetalen.

Uit deze studie blijkt dat de specifieke impact (per kilogram metaal) kan afnemen door bijvoorbeeld het gebruik van schonere elektriciteit, een groter aandeel recycling of inzet van nieuwe technologieën. Toch is deze afname waarschijnlijk onvoldoende om de stijgende vraag, een andere belangrijke drijvende kracht, te compenseren. In totaal zullen de milieueffecten van metaalgebruik in de toekomst dus waarschijnlijk blijven toenemen.

De uiteindelijke omvang van de milieueffecten blijft onduidelijk vanwege sterk uiteenlopende onderzoekopzetten, scenario-aannames en verhaallijnen, die de resultaten aanzienlijk beïnvloeden.

Deze kwalitatieve studie leverde belangrijke aanbevelingen op, waaronder de noodzaak van meer kwantitatieve effectbeoordelingen, bij voorkeur met scenario's die onderling afgestemde verhaallijnen gebruiken en rekening houden met cruciale drijvende krachten zoals de vraag naar metalen, een energietransitie en nieuwe productietechnologieën—een aanpak die in hoofdstukken 3–5 wordt gevolgd.

Hoofdstuk 3 onderzoekt de effecten van mogelijk dalende ertsgraden in samenhang met ontwikkelingen in de metaal- en elektriciteitsproductie. Er werd een prospectieve levenscyclusanalyse uitgevoerd voor koper, nikkel, zink en lood—metalen waarvoor dalende ertsgehalten zijn gedocumenteerd. De ontwikkelde scenario's voor de productie van deze metalen omvatten vijf belangrijke aspecten: ertsgraden, locaties van primaire productie, verbeteringen in energie-efficiëntie, de technologiemix voor primaire productie, en de verdeling tussen primaire en secundaire productie. Deze werden gecombineerd met scenario's voor toekomstige elektriciteitsproductie uit het 'integrated assessment model' (IAM) IMAGE, in één LCI-database om een *geïntegreerde* aanpak te realiseren, zodat de voor de toekomst gemodelleerde metaalproductieketens gebruik maken van voor de toekomst gemodelleerde elektriciteit en vice versa.

De resultaten tonen aan dat voor de onderzochte metalen de meeste milieueffecten per kilogram geleverd metaal waarschijnlijk zullen afnemen, ondanks een daling van de ertsgraden. Het effect van afnemende ertsgraad kan grotendeels worden gecompenseerd door hogere recyclingpercentages en een schonere elektriciteitsvoorziening.

De *geïntegreerde* scenarioaanpak bleek essentieel om het gezamenlijke effect van veranderingen in elektriciteits- en metaalvoorziening te evalueren. Elektriciteit wordt gebruikt in metaalproductie en omgekeerd, en deze productieprocessen dragen bij aan heel verschillende typen milieupacten. Een koolstofarme elektriciteitsvoorziening

reduceert vooral klimaateffecten, maar leidt tot een hogere impact ten aanzien van grondstofgebruik en humane toxiciteit. Verbeteringen in de metaalproductie kunnen juist helpen deze twee effecten te verminderen.

Hoofdstuk 4 beoordeelt het potentieel voor CO₂-emissiereductie van innovatieve productietechnieken voor ijzer- en staal. Dit wordt gedaan aan de hand van een casestudy over Duitsland, de grootste staalproducent van Europa. We hebben huidige en alternatieve staalproductieroutes gemodelleerd, waarbij zowel de proces- en energiegerelateerde CO₂-emissies zijn meegenomen, rekening houdend met de toekomstige Duitse elektriciteitsmixen. Drie decarbonisatieroutes werden ontwikkeld om gebruik van opkomende technologieën tegen 2050 te modelleren.

De analyse toont aan dat geëlektrificeerde technologieën—waterstof-gebaseerde directe reductie (H₂-DRI), electrowinning (EW) en elektrische boogovens die staalschroot omsmelten (scrap-EAF)—het grootste reductiepotentieel bieden, mits de elektriciteitsvoorziening is gedecarboniseerd. Zij presteren duidelijk beter dan technologieën voor koolstofafvang en -opslag (CCS) in traditionele hoogovens die cokes inzetten (Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace of BF-BOF-CCS). Hoewel alle decarbonisatieroutes vergelijkbare jaarlijkse CO₂-reducties realiseren tegen 2050 (72–83% t.o.v. 2020), verschillen hun cumulatieve emissies aanzienlijk. De laagste cumulatieve emissies zijn te realiseren wanneer bestaande BF-BOF-installaties worden uitgerust met CCS en tegelijkertijd een overgang naar geëlektrificeerde technologieën plaatsvindt. Toch overschrijden alle scenario's het koolstofbudget voor de 1,5°C- en 1,75°C-doelstelling voor de Duitse staalindustrie tot wel een factor vijf, zelfs bij een gelijkblijvend productievolume van staal.

De analyse benadrukt de urgentie van drastischer reductiestrategieën en onderstreept de noodzaak van wereldwijde, uitgebreide analyses van de toekomstige emissies van de sector, waarin rekening wordt gehouden met transitiepaden naar geëlektrificeerde en CCS-technologieën, ontwikkelingen in verwante sectoren zoals de energievoorziening, en de toekomstige vraag naar staal.

Hoofdstuk 5 breidt de aanpak van het voorgaande hoofdstuk uit en beoordeelt de milieueffecten van de toekomstige mondiale staalproductie met behulp van prospective LCA. Deze uitgebreide studie onderzocht een breed scala aan impactcategorieën in verschillende regio's in de wereld, voor drie klimaatmitigatiescenario's: een 3,5°C-baseline, een <2°C-scenario en een 1,5°C-scenario. De productiescenario's voor staal omvatten negen productieroutes, inclusief nieuwe technologieën zoals CCS, waterstofgebaseerde en geëlektrificeerde processen; efficiëntieverbeteringen; fracties gerecycled staal per regio; productiemixen; en de vraag naar staal. Een belangrijke kracht van deze studie was de *geïntegreerde* aanpak, waarbij multisectorale, intern consistente staal- en energiescenario's uit één IAM (IMAGE) werden gecombineerd.

De resultaten bevestigen dat geëlektrificeerde staalproductietechnologieën, ook vanuit een levenscyclusperspectief, het grootste potentieel voor BKG-reductie bieden. Er kunnen reducties worden gehaald tot wel 95% in 2060 ten opzichte van de huidige

cokesgebaseerde processen, op voorwaarde dat elektriciteitsproductie gedecarboniseerd is. Ze presteren daarmee duidelijk beter dan CCS-technologieën voor cokesgebaseerde processen.

Toch blijft, zelfs in het meest ambitieuze 1,5°C-scenario met een overgang naar grootschalige elektrificatie, een mondiale klimaatneutrale staalproductie onwaarschijnlijk. De gemiddelde mondiale BKG-emissies per kilogram staal neemt in 2060 maximaal met 79% af. Dit is onvoldoende om de verwachte hogere vraag naar staal te compenseren. De analyse wijst uit dat de mondiale staalproductie naar verwachting een onevenredig groot deel van de wereldwijde koolstofbudgetten zal opeisen: tot 30% van het mondiale budget tegen 2060, zelfs in het meest optimistische 1,5°C-scenario.

Daarnaast toont de analyse dat decarbonisatiemaatregelen milieubelasting kan verschuiven van klimaatverandering naar andere impactcategorieën, zoals ioniserende straling of landgebruik. Door de verwachte toename van de staalvraag (61% tegen 2060) zullen de effecten van de mondiale staalproductie in de meeste categorieën waarschijnlijk stijgen, maar de mate waarin dit relevant is, blijft onzeker en moet zowel op mondiaal als op lokaal niveau worden bepaald. Deze stijgingen hangen grotendeels af van andere sectoren in de productieketen, met name de elektriciteitsmix, maar ook van mijnbouw- en afvalverwerkingsprocessen.

Samenvattend laat dit proefschrift zien dat, hoewel de toekomstige milieueffecten van de metaalvoorziening per kilogram voor de meeste metalen waarschijnlijk zullen afnemen, deze reducties naar verwachting onvoldoende zijn om de effecten van de groeiende vraag volledig te compenseren. Daardoor zullen de totale mondiale effecten voor veel metalen in verschillende impactcategorieën waarschijnlijk blijven toenemen. Hoewel de mondiale broeikasgasemissies van de staalvoorziening aanzienlijk kunnen worden teruggedrongen door nieuwe productietechnologieën, zullen deze reducties waarschijnlijk onvoldoende zijn om de klimaatdoelstellingen te halen. Het terugdringen van zowel klimaat- als niet-klimaat effecten van de metaalvoorziening vereist daarom een brede, systeemwijde portefeuille van strategieën. Deze strategieën moeten onder andere gericht zijn op een drastische beperking van de vraag, een groter aandeel recycling, een versnelde uitfasering van emissie-intensieve technologieën, een snellere opschaling van nieuwe technologieën en hernieuwbare energiegebruik, en het stimuleren van gerichte emissiereductiemaatregelen die zich richten op specifieke processen en impactcategorieën, in alle sectoren en productieketens.

Dit proefschrift leidt kort gezegd tot de volgende kernbevindingen:

- Dalende ertsgraden kunnen de impact per kilogram verhogen, maar dit effect kan grotendeels worden gecompenseerd door andere verbeteringen, zoals schonere elektriciteit en hogere recyclingpercentages.
- Voor staal bieden geëlektrificeerde of waterstofgebaseerde technologieën het grootste reductiepotentieel voor broeikasgasemissies, mits zij gebruik maken van koolstofarme elektriciteit. Zelfs deze best presterende staalproductietechnologieën bereiken echter geen klimaatneutraliteit. Dit betekent dat een 'net zero' doelstelling

voor staalproductie in 2060 niet haalbaar lijkt, en ook dat de staalproductie een onevenredig deel van de resterende koolstofbudgetten tot 2060 nodig heeft, zelfs in de meest optimistische scenarios.

- Decarbonisatiemaatregelen leveren bijkomende voordelen op in belangrijke impactcategorieën, maar leiden ook tot afwenteling op andere impact categorieën zoals grondstofgebruik en humane toxicologie. Voor de staalproductie wordt deze afwenteling grotendeels—maar niet uitsluitend— veroorzaakt door de toekomstige elektriciteitsvoorziening. Dit geeft het belang aan van milieubeoordelingen die diverse sectoren in samenhang analyseren.

Dit proefschrift levert ook een bijdrage aan de verdere ontwikkeling van de prospective LCA-methodologie. Ten eerste biedt het de eerste uitgebreide achtergrondscenario's voor de metaalvoorziening (hoofdstukken 3 en 5). Ten tweede bouwt het een kennisbasis op over de huidige stand van zaken van milieueffectbeoordelingen van de metaalvoorziening, identificeert het methodologische tekortkomingen en doet het aanbevelingen om onderzoekspraktijken te verbeteren en te harmoniseren (hoofdstuk 2). Ten slotte ondersteunt het de ontwikkeling van instrumenten om multisectorale scenario's consistent te integreren in één LCI-database, en vergemakkelijkt het zo een stap die essentieel is, maar tot dusver vaak complex en belemmerend was. Deze *geïntegreerde* aanpak is overdraagbaar naar andere sectoren en vormt zo een fundament voor toekomstig onderzoek.

Omdat de milieueffecten van de metaalvoorziening naar verwachting steeds belangrijker zullen worden, is verder onderzoek nodig naar andere metalen, met name metalen die momenteel al grote milieueffecten veroorzaken of waarvan een sterke toename in vraag wordt verwacht. Dit zou ook onderzoek kunnen omvatten naar het reduceren van de vraag naar zulke metalen - een onderwerp dat buiten de scope van dit proefschrift valt, dat zich richtte op ontwikkelingen in de metaalproductie—alsmede het identificeren van additionele maatregelen die broeikasgasemissies binnen de beschikbare koolstofbudgetten houden en tegelijkertijd afwenteling naar andere impact categorieën minimaliseren. Om interventies beter te kunnen prioriteren, dient toekomstig onderzoek de relevantie van elke impactcategorie zowel op mondiaal als lokaal niveau te beoordelen, bijvoorbeeld via kaders zoals planetaire grenzen of regionale beoordelingen, en drempelwaarden voor effecten te definiëren en toe te wijzen.

Hoewel dit werk bijdraagt aan een beter begrip van de toekomstige milieu-implicaties van metaalproductie, vormen milieueffectbeoordelingen slechts één dimensie van de duurzaamheidsuitdaging. Het bereiken van een werkelijk duurzame metaalvoorziening—en daarmee van een duurzame samenleving—vereist meer holistische benaderingen en geïntegreerde kaders, die tevens rekening houden met sociale, economische en politieke factoren, zowel op mondiaal als lokaal niveau.

