



Universiteit
Leiden

The Netherlands

Towards circular and energy-efficient management of building stock: an analysis of the residential sector of the Netherlands

Zhang, C.

Citation

Zhang, C. (2021, December 21). *Towards circular and energy-efficient management of building stock: an analysis of the residential sector of the Netherlands*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3247305>

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/1887/3247305>

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

Samenvatting

Materiaalcirculariteit en energie-efficiëntie zijn zeer relevante en met elkaar verweven onderwerpen die van belang zijn voor de beoogde transitie naar een CO₂-neutrale en circulaire gebouwde omgeving in Nederland. De gebouwde omgeving is wegens zijn omvang heel belangrijk in de transitie naar een circulaire en koolstofarme samenleving. Wat betreft materiaalcirculariteit staat Nederland wereldwijd aan kop met het verwerken van bouw- en sloopafval (BSA), waarbij een percentage recycling van bijna 100% wordt gehaald. Het meeste BSA wordt echter gedowncycled als wegfundering, wat wordt beschouwd als een behandeling met een lage toegevoegde waarde. Bovendien kampt Nederland nu al met het probleem dat de wegebouw niet al het BSA niet meer kan opnemen. Er is dringend behoefte aan een manier om het enorme overschot aan afvalbeton hoogwaardig in te zetten en zo de bouwketen circulair te maken.

Om de materiaalefficiëntie binnen de bouwsector te verbeteren, lanceerde Nederland het 'Een circulaire economie in Nederland in 2050', met een tussentijdse doelstelling van 50% minder gebruik van primaire grondstoffen in 2030 en een lange termijn doel van een in 2050 volledig circulaire economie. Tegelijk is de woningvoorraad in Nederland relatief slecht geïsoleerd en verouderd; ongeveer de helft van de woningvoorraad is gebouwd tussen de jaren vijftig en zeventig voordat in 1995 een energieprestatienormering werd ingevoerd. Renovatie van dergelijke woningen in Nederland om het energieverbruik te verlagen vergt niet alleen het gebruik van grondstoffen, maar kan ook tot nieuwe problemen leiden in de afvalfase. Dit proefschrift onderzoekt mogelijke oplossingen voor deze onderling verbonden problemen rond energieneutraliteit en grondstoffefficiëntie. Het proefschrift kijkt naar nieuwe technologische systemen die deze twee problemen aanpakken. Het betreft het gebruik van geprefabriceerde betonnen elementen met gerecycled BSA als grondstof. Levenscyclusanalyse (LCA) en levenscycluskostenberekening (Life cycle costing, ofwel LCC) werden gecombineerd met dynamische materiaalstroomanalyse (MFA) om de economische en ecologische implicaties op zowel productniveau als nationaal niveau in te schatten. Daarom stelt dit proefschrift de volgende overkoepelende onderzoeksvraag: "Wat zijn de potentiële effecten van de toepassing van geselecteerde nieuwe technologische systemen om circulair materiaalgebruik, energie-efficiëntie en CO₂-neutraliteit in de gebouwde omgeving in Nederland te verbeteren?". Op basis van de hoofdonderzoeksvraag zijn in het proefschrift vijf subvragen (SV) onderzocht:

SV1. Beoordeling van betonrecycling op product- en materiaal niveau

Is het mogelijk om bij hoogwaardige betonrecycling een milieu-economische winst situatie te realiseren? of kunnen leiden nieuwe technieken mogelijk tot probleemverschuivingen tussen verschillende impactcategorieën? (Hoofdstuk 2)

SV2. Beoordeling van het Geprefabriceerde Element (Prefabricated Construction Element, PCE) systeem voor nieuwbouw op product(element)niveau

Wat zijn de ecologische en economische implicaties van het gebruik voor gevelbekleding voor nieuwe gebouwen van PCE ('PCE-nieuw') om de energie-efficiëntie Nederland te verbeteren? (Hoofdstuk 3)

SV3. Beoordeling van het PCE-systeem voor renovatie van bestaande gebouwen ('PCE refurb') op product(element)niveau

Wat zijn de ecologische en economische implicaties van het gebruik van het geprefabriceerde elementensysteem (PCE-refurb) om de gevels van bestaande gebouwen in Nederland opnieuw te bekleden zodat gebouwen energie-efficiënter worden? Hoe is hangen de ecologisch en economische voor- en nadelen af van de klimatologische omstandigheden in verschillende landen? (Hoofdstuk 4)

SV4. Analyse van de ontwikkeling van de woningvoorraad op landniveau

Hoeveel BSA komt er uit de bouw, sloop en renovatie van de Nederlandse woningvoorraad van 2015 tot 2050? In hoeverre kan het BSA worden hergebruikt als grondstof in de renovatie voor energie-neutraliteit van gebouwen in Nederland? (Hoofdstuk 5)

SV5. Analyse van de implementatie van de recycling- en prefabricagesystemen op landniveau

Wat zijn de milieu-implicaties en economische gevolgen van de implementatie van de recycling- en prefabricagesystemen in Nederland? In hoeverre kan met het voorgestelde recycling- en prefabricagesysteem Nederland de beoogde circulariteits- en CO₂-neutraliteitsdoelen bereiken? (Hoofdstuk 6)

Om de eerste subvraag te beantwoorden, beschrijft Hoofdstuk 2 een aanpak voor de analyse van eco-efficiëntie, gebaseerd op LCA en LCC. Dit raamwerk wordt gebruikt diverse technologische systemen voor hoogwaardig betonrecycling te onderzoeken en om sleutelfactoren te identificeren voor hun kosten- en milieueffectiviteit. Deze casestudy concludeert dat de meest eco-efficiënte technologische routes voor het recyclen van afvalbeton technologieën zijn die het afvalbeton ter plaatse recyclen en hoogwaardige secundaire producten produceren. We ontdekten dat de meest milieuvriendelijke en kostenbesparende manier voor betonrecycling de geïntegreerde mobiele ADR en HAS is. Wat de individuele effectcategorieën betreft, blijkt uit 10 van de 15 milieueffectindicatoren dat het geïntegreerde Advanced dry recovery (ADR) en Heating air classification system (HAS) superieur is aan andere onderzochte opties. Tegelijkertijd scoort dit systeem slechter op het gebied van fotochemische ozonvorming,

fijn stof, verzuring, terrestrische eutrofiëring en mariene eutrofiëring. Deze nadelen zijn te wijten aan het feit dat de HAS op pilotschaal nog steeds fossiele brandstof (diesel) gebruikt om het afvalbeton thermisch af te breken. Een HAS op industriële schaal zal schonere energiebronnen gebruiken, zoals hernieuwbare elektriciteit.

Met betrekking tot de tweede subvraag, gebruikte hoofdstuk 3 een monetaire methode om LCA en LCC te combineren om de te analyseren hoe een groene PCE-nieuw als gevel voor een nieuw gebouw over 120 jaar scoort in vergelijking met die van productie en het gebruik van een baseline PCE -nieuw. Het belangrijkste verschil is dat een groene PCE nieuw een aerogel gebruikt die beter isoleert als geëxpandeerd polystyreen (EPS) dat in gewone PCE nieuw wordt gebruikt. Verder gebruikt de groene PCE nieuw gerecycled BSA terwijl gewone PCE primaire materialen gebruikt. Omdat de productie van aerogel echter veel energie-intensiever is dan van EPS, is het verschil over de levenscyclus echter beperkt. Als alleen naar de directe kosten wordt gekeken valt groene PCE-nieuw iets goedkoper uit. Als ook de externe kosten van de uitstoot van broeikasgassen worden meegerekend, leidt de vermeden uitstoot tot een extra kostenvoordeel. Er moet echter rekening worden gehouden met een grote onzekerheid in de kostenraming.

Voor wat betreft de derde subvraag voerde hoofdstuk 4 een analyse uit om terugverdientijden te berekenen voor CO₂ emissies, energieverbruik, en kosten van renovatie van woningen in Nederland met PCE-refurb. De analyse werd uitgevoerd met behulp van LCC en LCA. Verder is geanalyseerd hoe product- en materiaalhergebruik van PCE-refurb de terugverdientijden beïnvloeden. Er bleek sprake te zijn van een positieve terugverdientijd van energieverbruik en CO₂ emissies (ongeveer 17 jaar). De terugverdientijd van de investering bleek heel lang (meer dan 100 jaar). Dit geeft aan dat de productie en het gebruik van een PCE in renovatie het energieverbruik en de uitstoot van broeikasgassen zal verminderen, maar dat de kosten relatief hoog zijn. De PCE-refurb kan echter herbruikbaar worden ontworpen door eenvoudig te demonteren verbindingen toe te passen. Door een dergelijk ontwerp kunnen ze na één levensduur opnieuw worden gebruikt, wat helpt om deze kostenkloof te overbruggen. Dit producthergebruik blijkt veel zinvoller dan materiaalhergebruik. Het gebruik van secundaire materialen in de PCE-refurb verkort de terugverdientijd voor energie, CO₂ emissies en kosten maar beperkt. Naast een analyse voor de Nederlandse context is ook nog een analyse voor de Zweedse en Spaanse situatie uitgevoerd. Daaruit blijkt dat het toepassen van PCE-refurb in koude landen resulteert in kortere terugverdientijden voor energiegebruik, CO₂-emissies en kosten.

Met betrekking tot de vierde subvraag, heeft hoofdstuk 5 een dynamische MFA toegepast om de balans in vraag en aanbod te onderzoeken van secundaire grondstoffen die vrijkomen uit de gebouwde omgeving (o.a. normaal gewicht en lichtgewicht beton,

glas, minerale isolatiewol, staal) en de behoefte aan secundaire materialen die nodig zijn voor de productie van PCE's voor renovatie van gebouwen voor het verhogen van energie-efficiëntie van 2015 tot 2050 in Nederland. De belangrijkste resultaten laten zien dat met het geavanceerde recyclingsysteem ADR en HAS de secundaire grondstoffen die worden teruggewonnen uit normaal gewicht betonafval, glasafval en afval van minerale isolatiewol ruim voldoende om de fabricage van PCE-nieuw te ondersteunen. Voor nieuwe typen van materialen – lichtgewicht beton – zal het in de nabije toekomst de hoeveelheid die gewonnen kan worden uit BSA nog niet voldoende zijn om te voldoen aan de grondstofvraag voor grootschalige renovatie met PCE-refurb-wanden. Nederland blijft verder nog afhankelijk voor import van diverse bouwmaterialen. Gebruik van gerecycleerde materialen beperkt die import wel. Kort gezegd helpen ADR en HAS bij een hoogwaardige verwerking van BSA in Nederland in PCE's, maar zijn er nog steeds primaire grondstoffen nodig voor gebruik in nieuwe, opkomende materialen, zoals b.v. lichtgewicht beton. Daarnaast toont deze case studie ook aan dat de verwachte hoeveelheid renovatieafval groter is dan de hoeveelheid afval die ontstaat bij nieuwbouw. Gezien de grootschalige opgave ten aanzien van energierenovatie van gebouwen in de EU, is het belangrijk om rekening te houden met het beheer van dit renovatieafval.

Voor de laatste subvraag combineert Hoofdstuk 6 de dynamische MFA met LCA en LCC. Hiermee kunnen we de prestaties van de PCE oplossingen onderzoeken op productniveau, maar ook opgeschaald naar landelijk niveau, bij toepassing in nieuwbouw en renovatie in Nederland van 2015 tot 2050. De resultaten op productniveau en opgeschaald zijn uitgedrukt via een jaarlijkse waardebenadering en een actuele waardebenadering. De actuele waarde laat per jaar zien hoeveel uitgaven, koolstofemissies en materiaalextractie in dat jaar plaats vindt als gevolg van renovatie in dat jaar en (verminderd) energiegebruik door renovatie in voorgaande jaren. De jaarlijkse waardebenadering kijkt naar de totale kosten, materiaalbehoefte en koolstofemissies over de levensduur en berekent vervolgens een gemiddelde per jaar. Deze aanpak laat zien dat het PCE-refurb systeem duidelijke voordelen heeft boven het business-as-usual (BAU) scenario, waarin geen renovatie (REN-scenario) of versnelde nieuwbouw (Rebuild of REB-scenario) plaatsvindt om doelen ten aanzien van energie-efficiëntie te halen. Deze studie evalueerde ook de mate waarin de circulariteits- en decarbonisatiedoelen kunnen worden gerealiseerd door implementatie van PCE-refurb. De resultaten laten zien dat de BAU- en REN-scenario's nauwelijks leiden tot een vermindering van extractie van grondstoffen tot 2050. Versnelde afbraak en nieuwbouw (het REB scenario) scoort echter nog veel slechter qua materiaalgebruik. Geavanceerde technologische systemen in het REN-scenario kunnen echter bewerkstelligen dat CDW voor 98% gaat worden gerecycled, in plaats van zoals nu nog grotendeels gedowncycled als wegfundering. Kort gezegd lijkt er geen mogelijkheid om voor de gebouwde omgeving, noch in het BAU als REN scenario met PCE's, de circulariteitsdoelstellingen

in 2030 en 2050 te halen. Hiernaast zijn de operationele kooldioxide-emissies van de woningvoorraad in 2030 en 2050 gekwantificeerd onder de drie verschillende scenario's. Als er zoals in het BAU scenario geen energierenovatie strategie wordt toegepast, blijken de decarbonisatie-doelstellingen voor 2030 of 2050 onhaalbaar zijn. In het renovatie (REN) scenario kan met de implementatie van PCE-systemen het tussendoel van 49 % CO₂-reductie in 2030 worden gehaald, maar niet het doel om in 2050 een energie-neutrale gebouwde omgeving te realiseren. Het versnelde herbouw (REB)-scenario kan het lange termijn doel echter wel bereiken, doordat alle nieuwbouw energie-neutraal is en verder het gebruik van gas wordt vervangen door (groene) elektriciteit. Het REB scenario brengt echter enorme kosten en materiaalbehoeftes met zich mee

Samenvattend evalueerden de hoofdstukken 2 tot en met 6 het nieuwe PCE-systeem vanuit zowel economische als milieuperspectief en zowel op productniveau als op landniveau. Bezien vanuit het perspectief van materiaal-circulariteit onderzochten we de rol van verlenging van de levensduur van gebouwen, hergebruik van elementen en materiaal-terugwinning. We vonden dat (i) het verlengen van de levensduur van gebouwen de meest wenselijke optie is vanuit het perspectief van circulariteit, (ii) hergebruik van elementen minder de voorkeur heeft, maar nog steeds aanzienlijke ecologische en economische voordelen oplevert, en (iii) de voordelen van materiaal-terugwinning bijna te verwaarlozen zijn in vergelijking met de eerste twee opties. Bezien vanuit het perspectief van energie-efficiëntie illustreerde dit proefschrift verbetering van het isolatieniveau van de gevel van de woning noodzakelijk is, terwijl elektrificatie en het gebruik van hernieuwbare elektriciteit een andere cruciale factor is voor het realiseren van een koolstofneutrale gebouwde omgeving. De resultaten dragen bij aan het inzichtelijk maken van de kansen en uitdagingen om een circulaire en CO₂-neutrale gebouwde omgeving te realiseren. Het proefschrift geeft verder aan hoe LCA en LCC en MFA kunnen worden geïntegreerd tot een analyse waarin beoordelingen op productniveau kunnen worden opgeschaald tot beoordelingen op landelijk niveau. Verder onderzoek zou zich kunnen richten op het analyseren van een bredere set van innovaties voor circulariteit en koolstofneutraliteit in de gebouwde omgeving in verschillende regio's, en verder werk ten aanzien van het wegnemen van een aantal resterende inconsistenties tussen LCA, LCA en MFA.