

DISS. ETH NO. 29824

**ENABLING CIRCULAR ECONOMY: AN EVALUATION FRAMEWORK
BASED ON ALKALI-ACTIVATED MATERIALS – FROM MATERIAL
ENVIRONMENTAL IMPACTS TO REGIONAL INTEGRATION THROUGH
SUPPLY CHAIN OPTIMIZATION AND STAKEHOLDER PERSPECTIVES**

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

Presented by

ANASTASIJA KOMKOVA

M.Sc., University of Copenhagen

born on 11.09.1991

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Guillaume Habert, examiner
Dr. Birgitte Holt Andersen, co-examiner
Prof. Dr. Ir. Stijn Matthys, co-examiner
Prof. Dr. Ben Amor, co-examiner

2023

Abstract

Global objectives to mitigate climate change, reduce dependency on raw materials, and minimize waste require transformations in multiple sectors across the global economy, including the construction and building sector. Multiple alternative binders to carbon-intensive cement are being researched, among them alkali-activated materials (AAMs). The technology of AAM production involves activating aluminosilicate precursors with soluble solutions of alkaline sources. The most widely used precursors are industrial by-products, such as ground granulated blast furnace slag (GBFS) and fly ash (FA) from the steel industry and coal power plants, respectively, as well as the primary product metakaolin (MK). Recent research shows that alternative urban, industrial, and agricultural waste streams can also be used in AAMs. Thus, AAM technology can potentially contribute to open-loop waste recycling within the circular economy framework. While AAMs are regarded as promising materials for niche applications, capable of achieving similar mechanical properties to conventional cement and thereby having lower CO₂ eq. impacts, the adaptation of AAMs at a real scale is rather limited.

Therefore, this thesis aims to assess the sustainability of AAMs at different levels, starting from the evaluation of environmental impacts at the material level, then optimizing supply chain networks for waste streams at the regional context, and finally identifying the benefits and barriers along emerging value chains based on pilot-scale mineral wool waste recycling in AAMs.

The first part of this thesis examines the environmental impacts of alkali-activated concrete mixes with proven international replicability, using conventional precursors GBFS, FA, and MK in their design. The objective is to identify the parameters that contribute the most to the uncertainty in LCA, thereby providing indications on the areas for further improvement. Results show that AAMs have lower CO₂ eq. emissions compared to Portland cement concretes, even considering the variability in production processes of mix constituents for both types of binders, as well as uncertainty in transportation. However, activators contribute up to 33%, and precursors contribute up to 54% to the total global warming potential of the mixes, while variability in the production processes of sodium silicates and precursors are the main contributors to the uncertainty in results. This highlights the need to pay attention to the sources of activators and precursors, including waste-derived constituents, where site-specific data from producers would facilitate decision-making processes.

With a vast range of AAM mix constituents, the lack of long-term durability data often prevents researchers from examining impacts beyond the 'cradle-to-gate' framework.

In this thesis, the results of the probabilistic service life time model developed within the DuRSAAM project were incorporated into LCA to determine environmental impacts of AAMs throughout the target service life time for reinforced concrete structures. Results indicate that uncertainty in service life time has the highest contribution to the total variance in LCA results and can affect the choice of the optimal mix for the targeted application, highlighting the need for further advancement of reliable and robust service life time models to cover the diversity of AAM mixes.

Within the second part of this thesis, LCA and geospatial analysis are combined with a mixed-integer linear optimization model to examine optimal supply chain network design for waste recycling in AAMs. The focus is on minimizing environmental impacts and costs associated with transportation between waste production sites, potential waste pretreatment plants, and alkali-activated concrete producers. Results show that for a distributed waste source, such as bottom ashes stemming from municipal solid waste incinerators, the optimal supply chain networks involve direct symbiosis between waste producers and concrete plants. While the total production of AAMs is associated with higher costs than cement concrete, for waste with scattered source locations, such as mineral wool insulation stemming from the renovation and demolition of building stock, centralized supply chains involving a single pre-treatment plant with subsequent production of AAMs are more cost-effective. Results indicate that by nudging open-loop recycling of available wastes, nearly 35% of the annual cement demand can be substituted in Switzerland, associated with 0.4 Mt avoided CO₂ eq. emissions.

The third part of this thesis evaluates the benefits and barriers along emerging value chains based on interviews with stakeholders involved in pilot-scale mineral wool AAM production in five European countries. The assessment, based on selected CE indicators and the analysis of strengths, weaknesses, opportunities, and threats, indicates that technological and economic barriers faced by producers of AAMs at the pilot scale can potentially be overcome at industrial up-scale, where cities and policymakers shall take actions in the proposed urban-industrial symbiosis framework to help overcome barriers associated with waste sourcing and stimulate demand for alternative construction materials.

Zusammenfassung

Die globalen Ziele zur Eindämmung des Klimawandels, zur Verringerung der Abhängigkeit von Rohstoffen und zur Minimierung des Abfallaufkommens erfordern Veränderungen in zahlreichen Sektoren der Weltwirtschaft, einschließlich des Baugewerbes und der Baubranche. Es werden mehrere alternative Bindemittel zu CO₂-intensivem Zement erforscht, darunter auch alkalisch aktivierte Materialien (AAMs). Die Technologie der AAM-Herstellung umfasst die Aktivierung von Aluminosilikat-Vorprodukte mit alkalischen Lösungen. Die am häufigsten verwendeten Ausgangsstoffe sind industrielle Nebenprodukte wie gemahlene Hochofenschlacke (GBFS) und Flugasche (FA) aus der Stahlindustrie bzw. aus Kohlekraftwerken sowie das Primärprodukt Metakaolin (MK). Jüngste Forschungsergebnisse zeigen, dass auch andere städtische, industrielle und landwirtschaftliche Abfallströme in AAMs verwendet werden können. Somit kann die AAM-Technologie potenziell zum offenen Abfallrecycling im Rahmen der Kreislaufwirtschaft beitragen. AAMs gelten als vielversprechende Materialien für Nischenanwendungen, die ähnliche mechanische Eigenschaften wie herkömmlicher Zement aufweisen jedoch weniger CO₂-Äq. verursachen, ihre Anwendung ist in der Praxis aber noch begrenzt.

Das Ziel dieser Arbeit ist, die Nachhaltigkeit von AAMs auf verschiedenen Ebenen zu bewerten. Angefangen mit der Bewertung der Umweltauswirkungen auf der Materialebene, über die Optimierung von Lieferkettennetzwerken für Abfallströme im regionalen Kontext bis hin zur Identifizierung von Vorteilen und Hindernissen entlang neu entstehender Wertschöpfungsketten am Beispiel des Recyclings von Mineralwolleabfällen in AAMs im Pilotmaßstab.

Im ersten Teil werden die Umweltauswirkungen von alkalisch aktivierten Betonmischungen mit nachgewiesener internationaler Reproduzierbarkeit unter Verwendung der konventionellen Ausgangsstoffe GBFS, FA und MK untersucht. Ziel ist es, die Parameter zu identifizieren, die am meisten zur Unsicherheit in der Ökobilanz beitragen, und dadurch Hinweise auf Bereiche zu geben, die weiter verbessert werden können. Die Ergebnisse zeigen, dass AAMs im Vergleich zu Portlandzementbetonen geringere CO₂-Emissionen aufweisen, selbst wenn die Variabilität in den Produktionsprozessen der Mischungsbestandteile für beide Arten von Bindemitteln sowie die Ungewissheiten beim Transport berücksichtigt werden. Allerdings tragen die alkalischen Lösungen mit bis zu 33% und die Aluminosilikat-Vorprodukte mit bis zu 54% zum gesamten Treibhausgaspotenzial der Mischungen bei, während die Schwankungen bei den Produktionsprozessen von Natriumsilikaten und Vorprodukten die Hauptursache für die Unsicherheit der Ergebnisse sind. Dies unterstreicht die

Notwendigkeit, den Quellen der alkalischen Lösungen und den Aluminosilikat-Vorprodukten, einschließlich der aus Abfällen stammenden Bestandteile, besondere Aufmerksamkeit zu schenken, wobei standortspezifische Daten der Hersteller den Entscheidungsprozess erleichtern würden. Die grosse Bandbreite an AAM-Bestandteilen sowie das Fehlen von Daten zur Langzeitbeständigkeit hindert die Forscher oft daran, die Auswirkungen über den "Von der Wiege bis zum Werkstor"-Rahmen hinaus zu untersuchen. In dieser Arbeit wurden die Ergebnisse des probabilistischen Lebensdauermodells, das im Rahmen des DuRSAAM-Projekts entwickelt wurde, in die Ökobilanz integriert, um die Umweltauswirkungen von AAMs während der angestrebten Lebensdauer von Stahlbetonkonstruktionen zu bestimmen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Unsicherheit bei der Lebensdauer den größten Beitrag zur Gesamtvarianz der LCA-Ergebnisse leistet und die Wahl der optimalen Mischung für die angestrebte Anwendung beeinflussen kann.

Im zweiten Teil dieser Arbeit werden Ökobilanz- und Geodatenanalysen mit einem gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsmodell kombiniert, um die optimale Gestaltung des Lieferkettennetzwerks für das Abfallrecycling in AAMs zu untersuchen. Der Schwerpunkt liegt auf der Minimierung der Umweltauswirkungen und der Kosten, die mit dem Transport zwischen Abfallproduktionsstätten, potenziellen Abfallvorbehandlungsanlagen und Herstellern von alkalisch aktiviertem Beton verbunden sind. Die Ergebnisse zeigen, dass für einen an verschiedenen Orten anfallenden Abfall(verteilten), wie z.B. Bodenasche aus kommunalen Müllverbrennungsanlagen, die optimalen Lieferkettennetzwerke eine direkte Symbiose zwischen Abfallproduzenten und Betonwerken beinhalten.

Während die Gesamtproduktion von AAMs mit höheren Kosten verbunden ist als die von Zementbeton, sind für Abfälle mit verstreuten Entstehungsorten, wie z.B. Mineralwolle-Dämmstoffe aus der Renovierung und dem Abriss von Gebäuden, zentralisierte Lieferketten mit einer einzigen Vorbehandlungsanlage und anschließender Produktion von AAMs kostengünstiger. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Förderung des offenen Recyclings verfügbarer Abfälle fast 35% des jährlichen Zementbedarfs in der Schweiz ersetzt werden könnten, womit 0,4 Mio. Tonnen CO₂-Ausstoss vermieden werden könnten.

Der dritte Teil dieser Arbeit bewertet die Vorteile und Hindernisse entlang der entstehenden Wertschöpfungsketten auf der Grundlage von Interviews mit Akteuren, die an der Pilotproduktion von AAM aus Mineralwolle in fünf europäischen Ländern beteiligt sind. Die Bewertung auf der Grundlage ausgewählter CE-Indikatoren und der Analyse von Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken deutet darauf hin, dass die

technologischen und wirtschaftlichen Hindernisse, mit denen die Hersteller von AAM im Pilotmaßstab konfrontiert sind, im industriellen Maßstab möglicherweise überwunden werden können. Dies setzt voraus, dass Städte und politische Entscheidungsträger Maßnahmen im Rahmen der vorgeschlagenen städtisch-industriellen Symbiose ergreifen, um die mit der Abfallentsorgung verbundenen Hindernisse zu überwinden und die Nachfrage nach alternativen Baumaterialien zu stimulieren.

Der in dieser Arbeit vorgestellte methodische Ablauf kann darüber hinaus als Rahmen für die Bewertung der Nachhaltigkeit offener Recyclingstrategien für verschiedene Abfallströme dienen, die in Baumaterialien recycelt werden sollen.