

Technische Universiteit Delft (TUD)
Hogeschool van Amsterdam (HvA)
MIT Senseable City Lab (MIT)
Wageningen University (WUR)

“BIMZEC”*

Optimalisatie bouwprocessen

(**WP3** - T3.1, 3.2 en 3.5)

Project: Geïndustrialiseerde modulaire en lage emissie hoogbouw in de G4

* *Biobased Industrieel Modulair Zero-Emissie en Circulair*



Work Package 3: Optimalisatie Bouwprocessen

In WP3 (T1, 2 en 5) onderzochten we hoe we emissieloze, biobased geïndustrialiseerde modulaire hoogbouw kunnen verduurzamen vanuit het perspectief van het bouwproces; Welke procesmaatregelen kan hoogbouw verduurzamen, welke kansen er zijn met de inzet van hubs, welke impact dit heeft voor onder meer de uitstoot van CO2, stikstof en fijnstof en wat de voorwaarden zijn voor realisatie van de bouwlogistieke maatregelen en zero-emissie bouwlogistiek.

Deliverables

Main Report WP3 research incl. findings, conclusions and further research (HvA, TUD)
(in Dutch)

Literature Review Theoretical foundation and implementations for the research (TUD, HvA)

Partial Reporting WP-Activities
(incl. data collection, student research works, diverse attachments)

Task 3.1 Fieldlab construction hubs ('bouwhubs') Amsterdam (TUD, HvA, DuraVermeer, VolkerWessels, Wooden City)

Task 3.2 Strategies for efficient emission-free construction logistics (TUD,HvA)

Task 3.5 Impact analysis urban infrastructure (TUD)

Model Documentation of the BIMZEC model (TUD)

Media Interactive webapp (digital tool) and a studio recording presentations (TUD)

Authors and contributors

Name	Short	Research Team	Contact Info
Technische Universiteit Delft	TUD	Ruben Vrijhoef	r.vrijhoef@tudelft.nl
		Petar Koljensic	pkoljensic@tudelft.nl
		Tim van Binsbergen	
		Tanya Tsui	
		Jip Kuiper	
Hogeschool van Amsterdam	HvA	Walther Ploos van Amstel	w.ploos.van.amstel@hva.nl
		Michael Berden	
		Wasim Haji	
Amsterdam Institute For Advanced Metropolitan Solutions	AMS	Joke Dufourmont	joke.dufourmont@ams-institute.org

Cover Image: Created by *Petar Koljensic in Amsterdam (Project Patch 22: <https://patch22.nl/>)*

Samenvatting

In stedelijk domein is hoogbouw nodig vanwege woningnood en tevens complex door verdichting in de stedelijke omgeving. Hoogbouw zal vanwege zwaardere constructieve kenmerken en uitvoeringscomplexiteit meer dan andere typen bouw last en uitdaging ondervinden om aan noodzakelijke emissiereducties te gaan voldoen. Industrieel, modulair en biobased bouwen zijn uitwegen om de hoogbouw in steden duurzamer, sneller en efficiënter te kunnen bouwen, renoveren transformeren en optoppen.

Industrieel en modulair bouwen maakt het mogelijk om afgepaste afmetingen en gewichten van 2D en 3D bouwelementen te verwerken via snelle emissieloze en multimodale logistiek en montage. Biobased zorgt voor gewichtsreductie en daardoor voor minder emissies van fossiele logistiek en meer mogelijkheden voor inzet van emissieloze logistiek en materieel. Circulair zorgt ervoor dat meer lokaal en regionaal secundair materiaal hergebruikt wordt en zal leiden tot minder gebruik en vervoer van nieuw materiaal.

Centraal bij deze oplossingen staat de toepassing van multifunctionele bouw hubs in en rond steden. Deze hubs zullen niet slechts bundelen maar eveneens multimodale vervoersstromen van en naar de bouw hubs en bouwplaatsen coördineren, als een control tower voor lokaal en regionaal bouwtransport middels digitale tools en systemen. Tevens zullen ze elektrisch vervoer ondersteunen, productie en assemblage in huis hebben voor prefab bouw delen, en lokaal en regionaal geoogst circulair materiaal hergebruiken. De lokale bouw hubs staan in een onderling netwerk en in verbinding met leveranciers en producenten om ruimtegebruik, logistieke en productieactiviteiten, materiaalstromen en logistiek onderling te optimaliseren.

Daarvoor is nodig dat lokale overheden en marktpartijen in hun processen en beleid de parameters, effecten en emissiereductiepotentieel van logistiek en transport expliciet maken, beoordelen en waarderen. Overheden moeten hun beleidsinstrumenten richten op het stimuleren en afdwingen van deze emissiereducties en overige stedelijke effecten zoals verkeerseffecten en wegschades als gevolg van lokale bouwprojecten en transport. Overheden moeten hun lokale industriële en logistieke clusters en bedrijventerreinen in staat stellen en stimuleren om multifunctionele bouw hubs te vestigen. Opdrachtgevers en ontwikkelaars moeten gestimuleerd worden middels lokale regels en kaders zoals gronduitgifte en kavelpaspoorten, en ook zodanig aanbesteden en inkopen, zodanig dat dat leidt tot emissieloze bouwprocessen en logistiek, en reductie van overige stedelijke effecten. Ontwerpers zullen in hun ontwerpen rekening houden met materiaalgewicht, omvang, modulariteit en circulariteit en dat expliciet maken en kwantificeren. Bouwende en logistieke partijen zullen vervolgens hier invulling aan geven en daartoe de nodige digitale, fysieke en managementcapaciteiten ontwikkelen.

II Main Report

Contents

Voorwoord	Error! Bookmark not defined.
Achtergrond	6
Voordelen van BIMZEC.....	7
Opbouw BIMZEC	8
Onderzoeksaanpak.....	10
T3.1 Bouwhub Fieldlab Amsterdam.....	10
T3.2-strategieën voor efficiënte, emissievrije bouwlogistiek.....	11
T3 Stedelijke Impactanalyse.....	12
Modellering.....	13
Resultaten	17
1. De circulaire economie leidt over het geheel genomen tot lagere emissies, maar verhoogt de lokale emissies	17
2. Hogere emissies voor gedecentraliseerd hubnetwerk	17
3. Weinig emissiereductie tussen verschillende niveaus van circulariteit	17
4. Biobased gebouwen leiden tot hogere emissies, tenzij circulair.....	18
5. Transport over water verlaagt de CO2-uitstoot, maar verhoogt de NOX	18
6. Modulaire gebouwen zorgen voor 50% lagere uitstoot	18
7. Transport zonder emissies verlaagt de totale emissies niet significant	18
Limitaties en vervolg	18
Samenvatting conclusies.....	19
Literatuur.....	20

Voorwoord

De Nederlandse bouwsector staat voor een aantal uitdagingen. Om het woningtekort weg te werken moet er de komende jaren veel bijgebouwd worden. De bouwsector is verantwoordelijk voor een flink deel van de wereldwijde CO2 uitstoot, en dat moet drastisch verminderen om de klimaatdoelstellingen van het Parijs Akkoord te halen. Daarnaast kunnen we door het transport en materieel te verduurzamen de stikstof- en fijnstof uitstoot van de bouw flink verminderen, wat noodzakelijk is voor het oplossen van de stikstofcrisis.

Modulaire bouwmethoden zijn veelbelovend door hogere efficiëntie en betere inzet van schaarse middelen zoals personeel en bouwmaterialen broodnodig om sneller te kunnen bouwen. Duurzaamheid en efficiëntie kunnen hand in hand gaan door nieuwe duurzame geïndustrialiseerde bouwmethoden en duurzame logistiek toe te passen.

Het uiteindelijke doel is een optimaal materiaalgebruik en bouwproces voor alle fasen in de bouwcyclus te realiseren, waarbij zoveel mogelijk gebruik wordt gemaakt van zero emissie materialen en processen. De G4 gemeenten zullen bij gronduitgifte in de komende jaren op uniforme manier duurzaamheid gaan uitvragen bij hoogbouw. De markt wordt verwacht hierop in te spelen en te investeren.

De ingezette ontwikkeling aan publieke en private zijde moeten leiden tot de toepasbaarheid en beschikbaarheid van lage emissie bouwmaterialen uit onuitputtelijke bronnen, incl. inzet van biobased materialen en hergebruik regionale en landelijke afvalstromen en modulaire hoogbouw om lage emissie bouwprojecten te realiseren. Ook zullen strategieën voor emissievrije bouwlogistiek en bouwprocessen voor geïndustrialiseerde modulaire emissieloze hoogbouw ontwikkeld worden.

Logistiek is de belangrijkste factor bij emissies van bouwprocessen. Het totaal aan vervoerde goederen de afgelopen jaren bedraagt een substantieel volume, waarbij de bouwsector een aanzienlijk deel van dit volume voor zijn rekening nam. Deze sector werd qua tonnage de grootste, wat zijn sleutelrol in het vrachtvervoer aantoont. Het merendeel van de materialen en materieel werd over de weg vervoerd – circa 70%. De binnenvaart vertegenwoordigt ongeveer de resterende 30% (Topsector Logistiek, 2020).

Het belangrijkste doel van de bouwlogistiek is om volledig duurzaam te worden door voertuigen te gebruiken die geen verontreinigende stoffen uitstoten, ervoor te zorgen dat de leveringen volledig geladen zijn om de efficiëntie te maximaliseren en vertragingen en verstoringen tot een minimum te beperken. In dit onderzoek onderzoeken we de bouwlogistiek, het traject van de leverancier naar de bouwplaats. Een centrale rol is weggelegd voor bouw hubs, die een knooppunt in de supply chain vertegenwoordigen met verschillende functies, die bij elkaar bijdragen aan emissieloos bouwen.

Achtergrond

In stedelijk domein is hoogbouw een oplossing voor woningnood en tevens complex door verdichting in de stedelijke omgeving. Hoogbouw zal vanwege zwaardere constructieve kenmerken en uitvoeringscomplexiteit meer dan andere typen bouw last en uitdaging ondervinden om aan noodzakelijke emissiereducties te gaan voldoen. Industrieel, modulair en biobased bouwen zijn uitwegen om de hoogbouw in steden duurzamer, sneller en efficiënter te kunnen bouwen, renoveren transformeren en optoppen.

Industrieel en modulair bouwen maakt het mogelijk om afgepaste afmetingen en gewichten van 2D en 3D bouwelementen te verwerken via snelle emissieloze en multimodale logistiek en montage. Biobased zorgt voor gewichtsreductie en daardoor voor minder emissies van fossiele logistiek en meer mogelijkheden voor inzet van emissieloze logistiek en materieel. Circulair zorgt ervoor dat meer lokaal en regionaal secundair materiaal hergebruikt wordt en zal leiden tot minder gebruik en vervoer van nieuw materiaal. Het totaal aan oplossingen heeft de naam **BIMZEC** gekregen: **Biobased Industrieel Modulair Zero Emissie en Circulair bouwen**.

Bij deze procesinvulling van deze oplossingen op stedelijke schaal staat de toepassing van multifunctionele bouw hubs centraal. Deze hubs zullen niet slechts bundelen maar eveneens multimodale vervoersstromen van en naar de bouw hubs en bouwplaatsen coördineren, als een 'control tower' voor lokaal en regionaal bouwtransport middels digitale tools en systemen. Tevens zullen ze elektrisch vervoer ondersteunen, productie en assemblage in huis hebben voor prefab bouw delen, en lokaal en regionaal geoogst circulair materiaal hergebruiken. De lokale bouw hubs staan in een onderling netwerk en in verbinding met leveranciers en producenten om ruimtegebruik, logistieke en productieactiviteiten, materiaalstromen en logistiek onderling te optimaliseren.

Daarvoor is nodig dat lokale overheden en marktpartijen in hun processen en beleid de parameters, effecten en emissiereductiepotentieel van logistiek en transport expliciet maken, beoordelen en waarderen. Overheden moeten hun beleidsinstrumenten richten op het stimuleren en afdwingen van deze emissiereducties en overige stedelijke effecten zoals verkeerseffecten en wegschades als gevolg van lokale bouwprojecten en transport. Overheden moeten hun lokale industriële en logistieke clusters en bedrijventerreinen in staat stellen en stimuleren om multifunctionele bouw hubs te vestigen. Opdrachtgevers en ontwikkelaars moeten gestimuleerd worden middels lokale regels en kaders zoals gronduitgifte en kavelpaspoorten, en ook zodanig aanbesteden en inkopen (EMVI¹), zodanig dat dat leidt tot emissieloze bouwprocessen en logistiek, en reductie van overige stedelijke effecten. Ontwerpers zullen in hun ontwerpen rekening houden met materiaalgewicht, omvang, modulariteit en circulariteit en dat expliciet maken en kwantificeren. Bouwende en logistieke partijen zullen vervolgens hier invulling aan geven en daartoe de nodige digitale, fysieke en managementcapaciteiten ontwikkelen.

Voordelen van BIMZEC

Met industrieel bouwen kunnen bouwwerken sneller en efficiënter worden gebouwd. Industrieel bouwen maakt bouwprocessen en -plaatsen duurzamer. Duurzaamheid en efficiëntie kunnen hand in hand gaan door de nieuwe duurzame geïndustrialiseerde bouwmethoden, lichtere biobased materialen en circulaire principes toe te passen.

Er komen al meer biobased varianten. Ontwerpers ontwerpen inmiddels met deze materialen. De principes van industrieel bouwen zijn bekend en kunnen bouwkosten en bouw tijd sparen. Het Nieuwe Normaal² is inmiddels een gedragen standaard met haalbare en ambitieuze circulaire prestaties in de gebouwde omgeving.

Emissieloos bouwen en transporteren zijn inmiddels geaccepteerde technieken. Voor het laden van elektrische voertuigen en werktuigen zijn, ook bij netcongestie, steeds meer oplossingen. Voor het duurzaam en efficiënt regelen van de bouwlogistiek zijn er bouwlogistieke oplossingen en is bekend welke data ketenpartners moeten uitwisselen.

Logistieke optimalisaties van bouw hubs vinden inmiddels plaats door toevoegen van assemblage en circulaire functionaliteit, en laadfaciliteiten voor emissieloze voer- en vaartuigen. Inmiddels wordt bijvoorbeeld in de Amsterdamse regio gewerkt aan emissieloze bouw hubs voor infrawerken, een circulaire bouw hub, en diverse multimodale bouw hubs aan water.

Bouw hubs zijn locaties waar materialen voor gebouwen worden verzameld en tijdelijk worden opgeslagen. Van daaruit worden ze georganiseerd en naar de bouwplaats gestuurd. Deze hubs helpen bij het stroomlijnen van de materiaalbeweging tussen verschillende partijen die bij een bouwproject betrokken zijn. Bouw hubs vervullen verschillende functies die verder gaan dan hun rol bij het verzachten van de impact van vrachtvoertuigen in stedelijke gebieden en het vergroten van de effectiviteit van bouwlogistiekprocessen in termen van tijd en kosten. Aan de andere kant kan een hub ook een eenvoudige georganiseerde parkeerplaats zijn om een aanhanger te ontkoppelen om aan de gemeentelijke regelgeving te voldoen – de definities van de term variëren.

¹ Economisch Meest Voordelige Inschrijving

² <https://www.hetnieuwenormaal.nl/>

Deze functies omvatten materiaalopslag, logistieke coördinatie, bundeling van materialen of naadloze overgangen tussen verschillende transportmodi. Om tegemoet te komen aan de behoeften van de nieuwe methoden in de bouw (biobased materialen, modulaire methoden, emissievrije voertuigen, enz.) onderzoeken we de logistieke afhandeling van materialen, de capaciteit voor de assemblage van 3D-modules, het vastleggen, herfabriceren en herdistribueren van gebruikte materialen, coördinatie van de leveringen en het aanbieden van ZE laden en tanken voor de voertuigen.

Bovendien identificeert het raamwerk Stedelijke Effecten als een afzonderlijk maar gerelateerd gebied, wat suggereert dat het literatuuronderzoek zou kunnen onderzoeken hoe duurzame bouwlogistiek stedelijke omgevingen beïnvloedt. Het organiseert literatuur over duurzame bouwpraktijken gericht op het minimaliseren van de impact op het milieu binnen stedelijke omgevingen. Deze analyse richt zich op het beoordelen van de toepassing van deze mitigatiestrategieën (toekomstscenario's) op heersende stedelijke uitdagingen zoals geluidsoverlast, degradatie van stedelijke infrastructuur (bijvoorbeeld wegen, bruggen) en verkeersveiligheidsproblemen. We verwachten dat het gebruik van biobased materialen en geprefabriceerde modules, die lichter zijn en grotere transportvolumes vereisen, een impact zullen hebben op de aslasten en de operationele vereisten van transportvoertuigen, wat mogelijk zal leiden tot de adoptie van lichtere, stillere en mogelijk emissievrije (elektrische) voertuigen.) voertuigen. Ons onderzoek heeft tot doel de causale verbanden en de daaruit voortvloeiende gevolgen van deze veranderingen op de schade, de veiligheid en de verstoringen in steden in kaart te brengen

Opbouw BIMZEC

BIMZEC combineert een aantal belangrijke onderling verbonden gebieden die bijdragen aan Emissievrij bouwen. Het omvat onderwerpen als biobased gebouwen, waarbij gebruik wordt gemaakt van hernieuwbare biologische hulpbronnen; geïndustrialiseerde en modulaire bouwmethoden, die gericht zijn op het verhogen van de efficiëntie en het verminderen van afval; en een circulaire benadering van de bouw, waarbij de nadruk ligt op hergebruik en recycling van materialen.

Biobased bouwen (voornamelijk het gebruik van hout) bieden een lagere CO₂-voetafdruk, CO₂ opslag en potentieel voor herbruikbaarheid (Van der Lugt, 2020). De modules kunnen worden gemaakt van biobased materialen (bijvoorbeeld kruislaaghout – CLT). Door een lager gewicht stoot het transport van biobased materiaal ook minder uit.

Industrieel bouwen maakt massaproductie van gestandaardiseerde componenten mogelijk. Industrieel bouwen is vaak voorspelbaar georganiseerd en leidt zo tot minder transport.

Modulair bouwen maakt de assemblage mogelijk van geprefabriceerde modules, met hogere snelheid en minder bewerkingen op de bouwplaats (Economisch Instituut voor de Bouw, 2023).

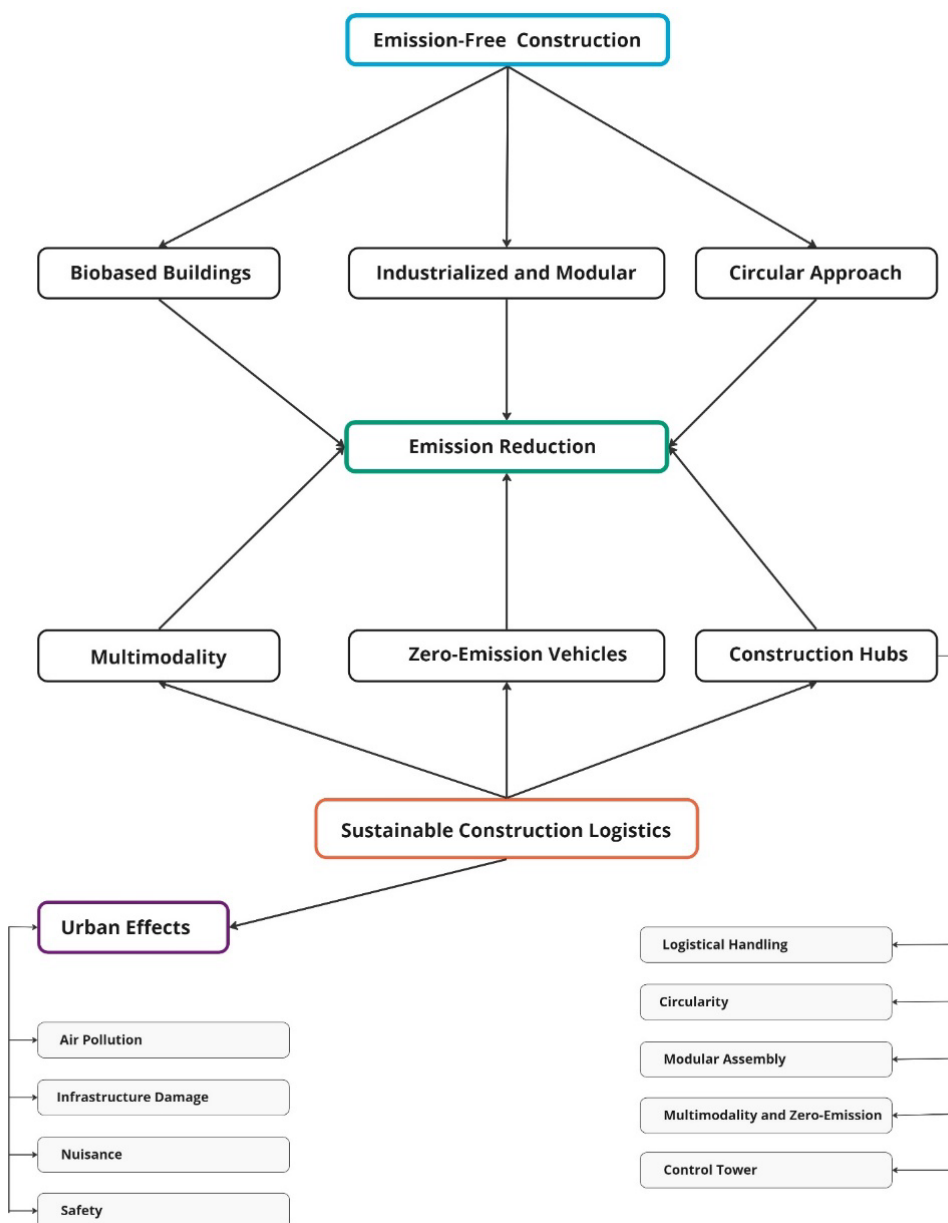
Circulair bouwen; De circulaire economie is een duurzaam economisch model dat gericht is op het minimaliseren van hulpbronnenverspilling en de impact op het milieu door de nadruk te leggen op lange levensduur, recycling en herbestemming van materialen en producten binnen een gesloten kringloopsysteem³. Circulair bouwen kan de uitstoot van materialen aanzienlijk verminderen door verlenging van de levenscyclus en het gebruik van secundaire materialen. Voor het bouwproces betekent het dat transportafstanden verminderen als materiaal lokaal wordt hergebruikt.

Duurzame bouwlogistiek omvat multimodaliteit, waarbij verschillende transportmodi worden gebruikt om de efficiëntie te optimaliseren; emissievrije voertuigen in de bouw; en de oprichting van bouw hubs, die dienen als gecentraliseerde gebieden om materialen en hulpbronnen duurzamer te beheren. Het onderdeel duurzame logistiek

³ Overzicht van de Ellen MacArthur Foundation over de circulaire economie
<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>

valt verder uiteen in logistieke bundeling, multimodaliteit, inzet van zero-emissie vaar- en voertuigen, en centrale logistieke sturing via een control toren, die voor een gebied of gemeente transporten efficiënt stuurt langs bouwhubs.

Emissiereductie: Dit is het resultaat van de voorgaande concepten en suggereert dat duurzaam bouwen en duurzame bouwlogistiekpraktijken aanzienlijk bijdragen aan de algehele vermindering van emissies in bouwprocessen. De emissies waarmee rekening wordt gehouden zijn CO₂, NO_x (stikstof) en PM (fijnstof) die schadelijke gevolgen hebben voor de lucht, de menselijke gezondheid en het milieu. De focus ligt op het verlagen van de stikstofuitstoot als gevolg van de feitelijke Nederlandse 'Stikstofcrisis'⁴. Het stijgende stikstofgehalte in Nederland dreigt bouwprojecten stop te zetten⁵.



Figuur 1 - Hoofd bestanddelen van BIMZEC (TUD)

⁴ NOS nieuwsartikel, 'Dit is wat je moet weten om de stikstofcrisis te begrijpen' (Dit is wat je moet weten om de stikstofcrisis te begrijpen.) <https://nos.nl/collectie/13901/artikel/2433131-dit-is-wat-je-moet-weten-om-de-tikstofcrisis-te-begrijpen>

⁵ MRA (Metropool Amsterdam), 'Voorlopige bouwstop dreigt voor tienduizenden woningen in MRA' <https://www.metropoolregioamsterdam.nl/voorlopige-bouwstop-dreigt-voor-tienduizenden-woningen-in-mra/>

Onderzoeksaanpak

Binnen het project 'Emissieloze Hoogbouw'⁶ hebben we in WP3 onderzoek gedaan gericht op de Optimalisatie van Bouwprocessen. Het onderzoeksteam onderzocht hoe biobased, geïndustrialiseerde, modulaire hoogbouw kan verduurzamen vanuit het perspectief van het bouwproces.

De lokale uitstoot van CO₂, stikstof en fijnstof tijdens de bouw wordt voor een groot deel veroorzaakt door transport en materieel van en naar de bouwplaats enerzijds en de bouwmethoden anderzijds. De introductie van bouw hubs aan de rand van steden voor het bundelen en optimaliseren van transport naar stadscentra heeft positieve effecten gehad, waardoor de lokale uitstoot de afgelopen jaren met ongeveer 80% is verminderd⁷.

Verdere logistieke optimalisaties van bouw hubs vinden plaats door het toevoegen van circulaire functionaliteit en laadfaciliteiten voor emissievrije voer- en vaartuigen. In de stad Amsterdam zijn de afgelopen jaren de eerste emissievrije bouw hubs voor infrastructurele projecten, een circulair bouw hub en diverse multimodale bouw hubs langs waterwegen gerealiseerd.

WP3 zal de verdere ontwikkeling van bouw hubs, logistieke controle en de effecten op emissies als gevolg van biogebaseerde, geïndustrialiseerde, modulaire ontwerpprincipes onderzoeken. Deze constructiemethode zal vooral invloed hebben op de vorm en het gewicht van de bouwcomponenten, waardoor de transportgewichten en -volumes worden beïnvloed, waardoor een andere opzet van transport en logistiek nodig is en dit resulteert in lagere emissieniveaus. Deze bouw aanpak heeft ook invloed op financiële aspecten, waaronder de herverdeling van kosten tussen de bouwplaats en de toeleveringsketen, en wordt daarom overwogen. De uitkomsten van dit werkpakket vormen de tweede basis voor beleidsformulering van andere werkpakketten van 'Emissieloze Hoogbouw'. Via kennisinstellingen worden de gemeenten in de omliggende regio's (G40) van de G4 geïnformeerd en volgt de validatie van de resultaten.

Onze werkpakketten hadden meerdere taken, waaronder: Construction Hub Field Lab Amsterdam (T1), Strategieën voor Efficiënte Emissievrije Bouwlogistiek (T2) en Impactanalyse Stedelijke Infrastructuur (T3). Andere taken hadden betrekking op industriële en modulaire bouwbarrières en een impactanalyse op de luchtkwaliteit. Deze vallen echter buiten het bestek van dit artikel.

T3.1 Bouw hub Fieldlab Amsterdam

In WP3 is met onderzoek in de praktijk de mogelijkheden verkend voor zero emissie bouw hub en de benodigde uitbreidingen van deze hubs alsmede de bouwlogistieke aansturing, specifiek voor biobased geïndustrialiseerde modulaire hoogbouw.

In dit werkpakket zetten we experimenteel onderzoek in en richten we een fieldlab op in één of meerdere bouw hubs in Amsterdam. We onderzoeken de mogelijkheden en noodzakelijke uitbreidingen van deze hubs en bouwlogistiekmanagement, specifiek toegesneden op biobased geïndustrialiseerde modulaire hoogbouw. Dit zal nauwere coördinatie tussen de hubs en moduleleveranciers met zich meebrengen, waarbij mogelijk de hubs worden aangepast om grotere modules te huisvesten en biogebaseerde materialen op te slaan.

Inzet van microhubs Er is onderzocht op welke wijze emissievrije bouwlogistiek georganiseerd kan worden voor conventionele en circulaire hoogbouwprojecten met een netwerk van ontwikkelende bouwbedrijven, leveranciers, bouw- en microhubs voor Amsterdam-Zuidoost. Het onderzoek werd gedaan met een literatuurreview en interviews

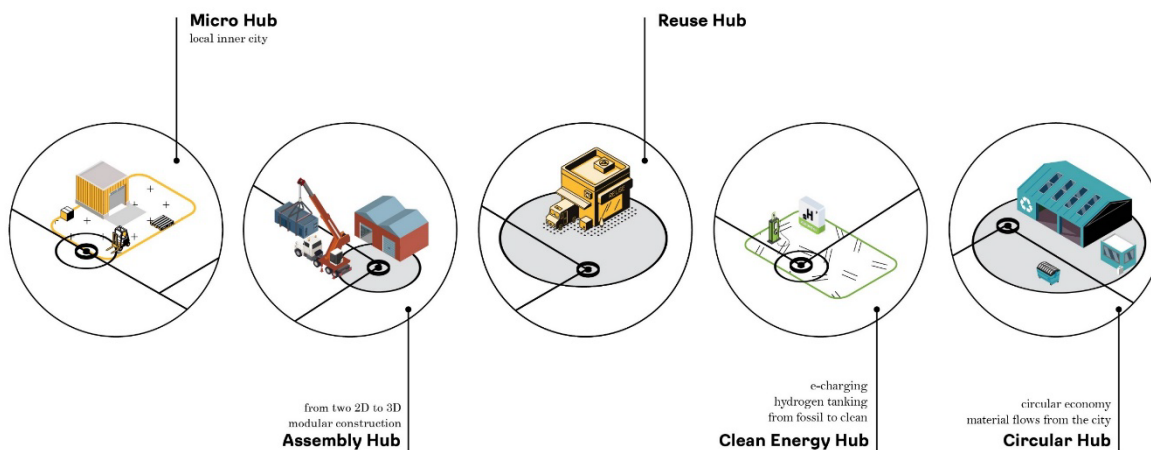
⁶ AMS Instituut, Geïndustrialiseerde, modulaire en emissiearme hoogbouw; <https://www.ams-institute.org/urban-challenges/circularity-urban-regions/industrialized-modular-and-low-emissions-highrise-buildings/>

⁷ TNO. (2018). Duurzame bouwlogistiek voor binnenstedelijke Woning- en utiliteitsbouw; https://pure.tudelft.nl/ws/portalfiles/portal/51450259/TNO_2018_bouwlogistiek.pdf

met partijen in de bouwpraktijk. Zij keken naar de theorie over bouw hubs, de ervaringen met bouw hubs in de praktijk en de uitdagingen in de afstemming van de bouw hubs in de keten.

Het onderzoek in de praktijk richtte zich vervolgens op verschillende aspecten van de bouwlogistiek, waaronder de toepassing van hergebruikte materialen in samenwerking met lokale timmerfabrieken, het gebruik van Control Towers en samenwerking in de keten. Bij het gebruik van hergebruikte materialen, bleek nog beperkte aandacht is voor het implementeren van hergebruik in de bedrijfsprocessen en de business case van bijvoorbeeld regionale timmerfabrieken. Er is echter potentieel voor een omslagpunt waarbij timmerfabrieken hergebruik van materialen zullen opnemen in hun bedrijfsvoering.

Daarnaast onderzoeken we de meerwaarde en mogelijkheden van het assembleren van 2D-componenten tot 3D-componenten in de bouw hubs (aan de stadsrand), aangevuld met micro-hubs (tussen de hub en de bouwplaats). Deze aanpak maakt het mogelijk om deelproductieactiviteiten in de hubs uit te voeren. De hubs zullen software ontwikkelen of verbeteren om de modulaire bouwlogistiek en het transport tussen hubs en bouwlocaties efficiënt te plannen. Ook zullen zij emissieprognoses en registraties uitvoeren, inclusief kenteken- en motorgegevens. T1 dient tevens als proeftuin voor de strategieën om de bouwlogistiek vanuit T2 te optimaliseren.

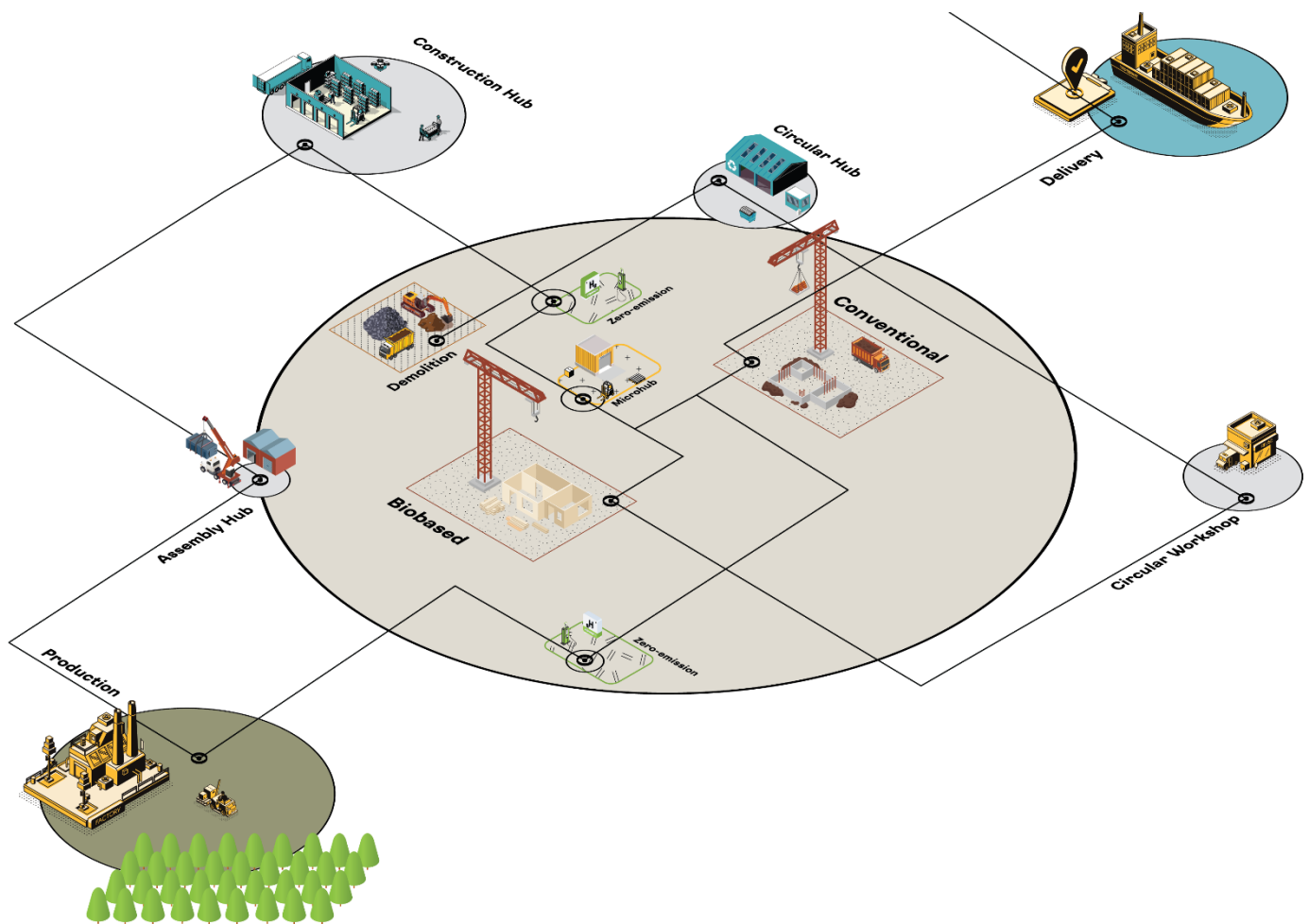


Figuur 2 - Toevoegen van functies aan de bouw hub

T3.2-strategieën voor efficiënte, emissievrije bouwlogistiek

Ontwikkel strategieën voor emissievrije bouwlogistiek voor biobased, geïndustrialiseerde modulaire hoogbouw in stedelijke omgevingen, gebaseerd op samenwerking binnen een netwerk van moduleleveranciers buiten de stad, bouw hubs aan de stadsrand en potentiële microhubs voor definitieve tussentijdse opslag en verwerking op of nabij de bouwplaats. Deze samenwerking heeft als doel het faciliteren van de efficiënte levering van modules (en andere materialen) voor de montage van biobased geïndustrialiseerde hoogbouw aan de stad enerzijds en just-in-time, emissievrije levering aan bouwplaatsen anderzijds.

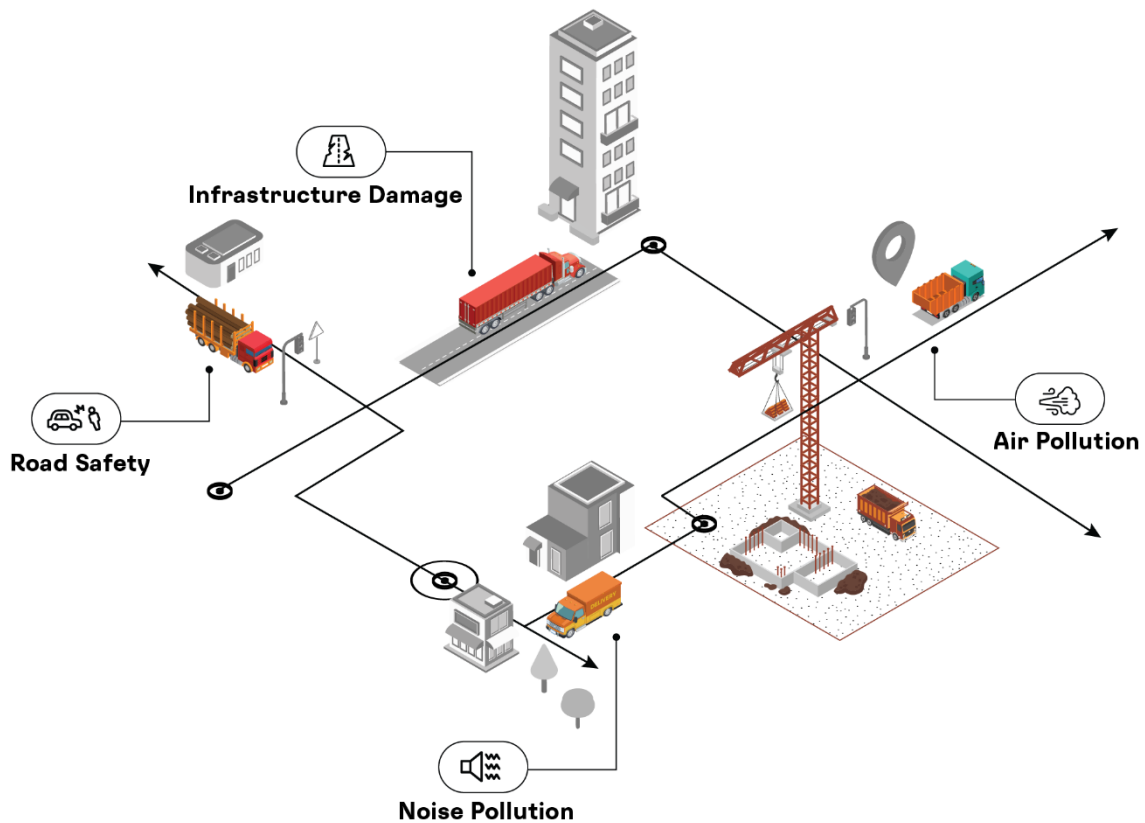
We onderzoeken de mogelijkheden om deze hubs uit te breiden voor biobased geïndustrialiseerde modulaire hoogbouw. We beschouwen de hubs als onderling verbonden en testen samenhangende strategieën voor het volledig optimaliseren van de bouwlogistiek naar de regio en de stad. Dit omvat alle noodzakelijke tussenverwerkingen op de hubs en aansluitend leveren van prefab modules aan bouwplaatsen binnen de regio en stad. Daarnaast onderzoeken we de tegenstromen van bouwplaatsen en slooppjecten in de stad, waarbij we kijken naar de terugkeer van secundaire materialen via de hub naar leveranciers en fabrikanten voor hergebruik in nieuwe bouwproducten en modules.



Figuur 3 - Grafische voorstelling van de toekomstige logistieke strategie van BIMZEC

T3 Stedelijke Impactanalyse

We analyseren de impact van efficiënte en emissievrije bouwlogistiek in combinatie met de toepassing van lokale bouwhubs voor industriële modulaire en emissiearme hoogbouw op en rond de infrastructuur in de stad. We beoordelen hoe deze veranderende bouwprocessen de huidige problemen beïnvloeden, waaronder geluidsoverlast, stedelijke infrastructuur en schade aan wegen, en verkeersveiligheid. De verwachting is dat de lichtere en grotere transportvolumes van biobased prefab modules invloed zullen hebben op de aslasten en de benodigde trekkracht van lichtere en stillere emissievrije/elektrische voertuigen. De causale relaties en effecten van deze factoren op schade, veiligheid en verstoringen rond de stedelijke infrastructuur zullen worden onderzocht en opgehelderd.



Figuur 4 Stedelijke effecten van bouwlogistiek, grafische voorstelling

Modellering

Om deze te testen en toekomstige strategieën te creëren, hebben we een kwantitatieve modelleringaanpak toegepast met behulp van Python. Het is gebaseerd op de vele verzamelde en gegenereerde ruimtelijke datasets. Dit model maakt gebruik van een agent-gebaseerde aanpak (ABM) om het gedrag van bouwplaatsen, hubs en leveranciers te simuleren om de transportemissies in verband met de bouw te schatten en de emissies in verband met de bouwlogistiek in de Metropoolregio Amsterdam¹ (MRA) voor het komende decennium te schatten.

Het model maakt gebruik van invoerparameters die afkomstig kunnen zijn uit daadwerkelijke of kunstmatig gegenereerde datasets. Het verzamelen, voorbereiden, opschonen en analyseren van gegevens is een zeer belangrijke stap bij het begrijpen van dit complexe systeem en het opbouwen van het model. De gegevens voor het model omvatten verschillende elementen: soorten en locaties van huidige en toekomstige hoogbouwprojecten, potentiële slooplocaties, locaties van materiaalleveranciers, logistieke en voertuigdetails inclusief emissiegegevens, en de ruimtelijke kenmerken van Amsterdam (zoals wegen, waterwegen spoorwegnetwerken, administratieve grenzen, zones, enz.). (Tabel 2)

Tabel 1 - Input parameters voor logistieke scenario's

Parameter	Invulling	Toelichting
Hub network	Geen	Er zijn geen hubs in de MRA, dus materialen worden rechtstreeks van materiaalleveranciers naar bouwplaatsen verzonden. Zo werkt de bouwlogistiek vandaag de dag.
	Macro	Er zijn twee grote 'macro'-hubs in de MRA, die bepaalde materialen van leveranciers verzamelen en naar bouwplaatsen sturen. Hubs zorgen voor een hogere efficiëntie in het transport – de kans is groter dat vrachtwagens volledig worden geladen.
	Micro	Er zijn twee grote 'macro'-hubs, evenals verschillende 'micro'-hubs in de MRA. Microhubs verzamelen materialen van macrohubs en leveren deze af op bouwplaatsen. Ze bevinden zich op industrieterreinen in de MRA.
Transport network	Weg	Alle vervoersbewegingen maken gebruik van het wegennet.
	Water	Transportbewegingen maken waar mogelijk gebruik van het waternetwerk. Materialen worden via water getransporteerd wanneer: (1) het bekend is dat leveranciers van dat materiaal gebruik maken van het waternetwerk, (2) wanneer zowel de hub als de bouwplaats zich binnen 100 meter van het waternetwerk bevinden.
	Spoor	Vervoersbewegingen maken waar mogelijk gebruik van het spoorweginet. Materialen worden via het spoor vervoerd wanneer ze van leveranciers naar hubs gaan, en alleen als bekend is dat leveranciers van dat materiaal gebruik maken van het spoorweginet.
Transport type	Diesel	Bij alle transportbewegingen over de weg worden dieselveertuigen gebruikt.
	Hybride	Alle wegvervoerbewegingen binnen de A10-ring van Amsterdam maken gebruik van elektrische voertuigen, terwijl alle overige bewegingen gebruik maken van dieselveertuigen.
	Electric	Alle vervoersbewegingen tussen hubs en bouw- of slooplocaties maken gebruik van elektrische voertuigen. Alle bewegingen tussen leveranciers en hubs blijven op diesel rijden.
Material	Geen	Gebouwen gebruiken conventionele materialen en hebben een betonnen structuur en fundering.
	Hout	In gebouwen wordt waar mogelijk gebruik gemaakt van biobased materialen. Denk hierbij aan een houtconstructie en biobased bouwdelen.
Modularity	None	Gebouwen hebben geen modules en worden gebouwd met behulp van conventionele methoden.
	Full	Gebouwen bestaan uit een betonnen kern en modules die vooraf worden geassembleerd op een bouwhub, naar de locatie worden getransporteerd en op de constructie worden gemonteerd.

Circularity	None	In gebouwen worden conventionele materialen gebruikt, wat betekent dat alle materialen afkomstig zijn van materiaalleveranciers.
	Semi	Alle niet-structurele materialen zijn afkomstig van slooplocaties, behalve materialen die normaal gesproken niet door hubs worden verwerkt.
	Full	Alle niet-structurele en structurele materialen zijn afkomstig van slooplocaties, behalve materialen die normaal gesproken niet door hubs worden verwerkt.
	Extreme	Alle niet-structurele, structurele en funderingsmaterialen zijn afkomstig van slooplocaties, behalve materialen die normaal gesproken niet door hubs worden verwerkt.

Deze modelleringstechniek maakt de studie van complexe systemen en opkomende verschijnselen mogelijk door het collectieve gedrag te onderzoeken dat voortkomt uit de interacties van de agenten (bijv. bouwplaatsen, bouw hubs, leveranciers).

Kort gezegd bestaat het uitvoeren van het model uit vier stappen:

1. De gebruiker definieert scenarioparameters voor het model. Zie Tabel 1 (parameteroverzicht) voor een gedetailleerde beschrijving.
2. Het model creëert agenten binnen de simulatie. Deze agenten omvatten bouw hubs, bouwplaatsen en materiaalleveranciers.
3. Het model simuleert het gedrag van agenten over een periode van 12 jaar, van 2023 tot 2035. Elke keer dat materialen binnen de simulatie worden getransporteerd, worden transportemissies geregistreerd. Telkens wanneer materialen worden getransporteerd tussen leveranciers, slooplocaties, hubs en bouwlocaties, berekent het model de bijbehorende transportemissies. Er worden vier soorten emissies berekend: CO₂, NO_x, PM_{2,5} en PM₁₀.
4. Het model geeft de resultaten van de simulatie weer. Dit omvat de totale uitstoot gedurende de twaalf jaar van de simulatie, de gebruikte bouwmaterialen, evenals een kaart met de gebruikte wegen en locaties van bouwplaatsen, hubs en leveranciers.

Om de transitie naar duurzaam bouwen (logistiek) te illustreren hebben we 6 scenario's gesimuleerd, waarbij elk scenario dichterbij de toekomstige BIMZEC-status komt. Het startscenario is gebaseerd op de huidige BAU-status (business-as-usual).

Tabel 2 - Opbouw van de 6 scenario's

Scenario	Opbouw	Toelichting
1-2	+ hubs + water network	Er worden hubs toegevoegd en waar mogelijk wordt gebruik gemaakt van het waternetwerk. Dit leidt tot een daling van de CO ₂ -uitstoot, maar een toename van de NO _x - en PM-uitstoot. Terwijl het aantal transportbewegingen met hubs afneemt, waardoor de CO ₂ -uitstoot daalt; schepen produceren meer PM en

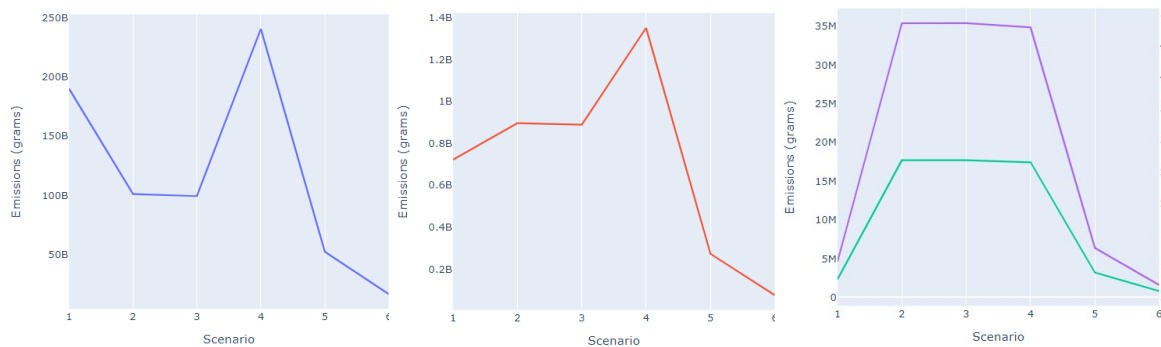
		NOX dan vrachtwagens, wat in het algemeen leidt tot hogere NOX en PM.
2-3	+ semi-electric trucks	Vrachtwagens die zich binnen de snelweg A10 in Amsterdam verplaatsen, zijn nu elektrisch. Dit leidt niet tot een significante verandering in de emissies, omdat de meeste vervoersbewegingen (van leveranciers naar hubs) buiten de A10 liggen en dus niet worden beïnvloed.
3-4	+ biobased buildings	Gebouwen worden nu gebouwd met biobased materialen. Dit leidt tot een aanzienlijke toename van de uitstoot. Dit komt omdat de leverancier voor hout ongeveer 10 keer verder weg is dan andere leveranciers. Dit is een verrassend resultaat en zal verder worden toegelicht in de paragraaf “interessante of onverwachte bevindingen” van dit rapport.
4-5	+ electric trucks + modularity	Alle transportbewegingen binnen de MRA zijn elektrisch en gebouwen zijn inmiddels zowel biobased als modulair. Dit leidt tot een grote daling van de uitstoot, vooral dankzij het feit dat de moduleleverancier veel dichterbij zit dan de houtleverancier.
5-6	+ circularity	Gebouwen zijn nu biobased, modulair en (waar mogelijk) circulair. Dit leidt tot een daling van de uitstoot, omdat slooplocaties dichterbij leveranciers liggen, wat leidt tot minder reisafstanden voor voertuigen.

Tabel 2 vat samen welke parameters veranderen als we van het ene scenario naar het andere gaan, en legt uit hoe deze gewijzigde parameters de resultaten van het model beïnvloeden. De parameters die voor zes scenario's zijn gekozen (van BAU tot BIMZEC) zijn samengevat in Tabel 3.

Tabel 3 – invulling van de 6 scenario's

	Hub network	Network type	Truck type	Biobased type	Modularity type	Circularity type
S1	none	road	diesel	conventional	conventional	conventional
S2	centralized	road + water	diesel	conventional	conventional	conventional
S3	centralized	road + water	semi	conventional	conventional	conventional
S4	centralized	road + water	semi	biobased	conventional	conventional
S5	centralized	road + water	electric	biobased	modular	conventional
S6	centralized	road + water	electric	biobased	modular	extreme

De volgende grafieken tonen de impact van de 6 scenario's, met de totale uitstoot (CO₂, NOX, PM_{2,5}, PM₁₀) en het totale aantal logistieke bewegingen in km. De effecten zijn samengevat voor drie studiegebieden voor het hele model, inclusief logistieke bewegingen buiten de MRA. We kunnen zien hoe de emissies veranderen door verschillende maatregelen te implementeren, terwijl het volledige BIMZEC-oplossingsscenario een aanzienlijke vermindering van alle emissies laat zien in vergelijking met het BAU-scenario. (Figuur 5)



Figuur 5 - alle emissies CO₂, NO_x, en PM voor alle transporten, inclusief nationale en internationale transporten

Resultaten

Tijdens het simuleren van de verschillende scenario's met het model hebben we enkele interessante en/of onverwachte bevindingen gevonden.

1. De circulaire economie leidt over het geheel genomen tot lagere emissies, maar verhoogt de lokale emissies

Het model van de circulaire economie vermindert de totale uitstoot door materialen uit lokale bronnen te gebruiken, maar leidt tot frequentere en kortere reizen, waardoor de lokale uitstoot en het weggebruik toenemen. (Figuur 6)



Figuur 6 - weggebruik met hubs voor materiaalvoer (link); en met circulair hubs tevens voor hergebruik (rechts)

2. Hogere emissies voor gedecentraliseerd hubnetwerk

Een gedecentraliseerd hubnetwerk, waarbij transport plaatsvindt van de leverancier naar de macrohub, vervolgens naar de microhub en uiteindelijk naar de bouwplaats, resulteerde verrassend genoeg in hogere totale emissies vergeleken met een gecentraliseerd netwerk zonder microhubs. Deze contra-intuïtieve uitkomst kan te wijten zijn aan de basisallocatiemethode die in het model wordt gebruikt.

3. Weinig emissiereductie tussen verschillende niveaus van circulariteit

In een modelscenario dat vier circulariteitsopties biedt (geen, semi, volledig, extreem) voor de inkoop van materialen van slooplocaties, resulteerde de verschuiving naar circulaire scenario's in kleine emissiereducties. De overstap van 'geen' naar 'semi' circulariteit verminderde de uitstoot met ongeveer 15%, terwijl de transitie van 'semi' naar 'volledige' of 'extreme' circulariteit leidde tot een verdere marginale reductie van 1-2%, wat minder was dan verwacht ondanks kortere reisafstanden voor vrachtwagens. Wat veroorzaakte deze onverwachte resultaten? Bulkmaterialen (beton,

grind, zand) worden niet door hubs verwerkt en worden dus rechtstreeks van leveranciers naar bouwplaatsen getransporteerd, zelfs als het scenario door de gebruiker als 'circulair' is gedefinieerd.

4. Biobased gebouwen leiden tot hogere emissies, tenzij circulair

Tegen de verwachtingen in resulteerde het gebruik van biobased materialen in gebouwen, zoals weergegeven in de 6 scenario's in de paragraaf 'resultaten', in een aanzienlijke toename van de uitstoot, ongeveer 250%. Hoewel biobased gebouwen inderdaad 10-50% lichter zijn, waardoor het gewicht van de getransporteerde materialen afneemt, doet de locatie van de primaire leverancier in Oostenrijk, die tien keer verder van de MRA ligt dan andere leveranciers, dit voordeel teniet. Bijgevolg zijn lagere emissies van biobased materialen alleen haalbaar als ze lokaal worden betrokken, hetzij van nabijgelegen slooplocaties of van dichtbij gelegen bossen.

5. Transport over water verlaagt de CO₂-uitstoot, maar verhoogt de NO_x

Het vervoeren van materialen via het water (met schepen in plaats van vrachtwagens) leidt tot een lagere CO₂-uitstoot, maar een hogere NO_x- en PM-uitstoot. Dit is te zien in het gedeelte 'resultaten', waar de overstap van het wegen- naar het waternetwerk (waar mogelijk) leidde tot een afname van 50% in CO₂, maar een toename van 25% in NO_x, 750% toename in PM_{2,5} en 775% stijging van PM₁₀.

6. Modulaire gebouwen zorgen voor 50% lagere uitstoot

De transitie van conventionele naar modulaire hoogbouw resulteert in een aanzienlijke vermindering van de CO₂-uitstoot door deze te halveren. Deze efficiëntie wordt toegeschreven aan het gestroomlijnde transportproces bij modulaire constructie, waarbij de meeste bouwcomponenten rechtstreeks van de moduleleverancier naar de hub en vervolgens naar de bouwplaats worden getransporteerd, waardoor de inefficiënties die gepaard gaan met het transport van diverse materialen van verschillende leveranciers tot een minimum worden beperkt.

7. Transport zonder emissies verlaagt de totale emissies niet significant

Overstappen op elektrisch vervoer leidt slechts tot een daling van de CO₂-uitstoot met ~2,5%. Dit komt omdat we ervan uitgingen dat al het langeafstandsvervoer op diesel zou blijven rijden, ongeacht of elektrisch vervoer in het scenario wordt gespecificeerd. Als gevolg hiervan wordt in het 'elektrische' scenario slechts een klein aantal logistieke bewegingen (die binnen de MRA) geëlektrificeerd. In een scenario waarin emissievrije voertuigen over langere afstanden worden gebruikt, kunnen de emissie verlagende effecten echter aanzienlijk groter zijn.

Limitaties en vervolg

Het onderzoek kent een aantal beperkingen als gevolg van de complexiteit van het vraagstuk en de modellering.

Ten eerste is de kwaliteit van de door het model gebruikte gegevens in sommige gevallen beperkt. Sommige hiervan omvatten de gegevens van het model die gebaseerd zijn op schattingen van deskundigen in plaats van literatuur over de samenstelling van biobased bouwmaterialen en logistieke details, zoals de beladingspercentages van vrachtwagens voor materialen en locaties van leveranciers. Bovendien beperken mismatches in materiaalcategorieën tussen bouw- en slooplocaties in circulaire scenario's, en mogelijk onnauwkeurige emissiecoëfficiënten voor schepen in vergelijking met vrachtwagens, de nauwkeurigheid van het model verder. Veel gegevens die nodig zijn voor het schatten van de stedelijke effecten waren niet beschikbaar.

Ten tweede zijn er beperkingen aan de manier waarop het model de impact van hubs op het milieu schat. Hoewel ons model de transportemissies schat, houdt het bijvoorbeeld geen rekening met mogelijke emissiebesparingen bij het overstappen op biobased gebouwen, het weglaten van emissies van bouwmachines, die mogelijk lager zijn bij

modulaire of biobased bouwmethoden, en stedelijke effecten zoals lawaai en geluidsoverlast. wegschade veroorzaakt door bouwlogistiek.

Ten slotte hebben we de volgende aannames gedaan voor de nodige vereenvoudiging van het model:

- Het uitsluiten van bulkmaterialen zoals beton dat een aanzienlijke invloed zou hebben op de resultaten van het model, aangezien deze materialen ongeveer 80% van het gewicht van een gebouw uitmaken.
- Bij de eenvoudige toewijzing van transportbewegingen aan de dichtstbijzijnde hubs in het model wordt voorbijgegaan aan efficiëntere logistieke strategieën, zoals multi-stop vrachtwagenroutes.
- Door de bouwlogistiek op een tienjarige schaal te modelleren, slaagt het model er niet in om fijnere details en fluctuaties in de materiaalvraag vast te leggen die zich op kleinere tijdschalen voordoen.

Gezien de hierboven genoemde beperkingen hebben wij de volgende aanbevelingen voor toekomstige modellering en onderzoek:

- De kwaliteit van de gegevens voor het model moet worden verbeterd en verder geverifieerd door experts.
- Verdere effecten die verband houden met bouwlogistiek, zoals ingebedde emissies of stedelijke effecten, kunnen in het model worden opgenomen, vooral als lokale beleidsmakers daarom vragen.
- Verschillende (hub)netwerken kunnen worden verkend en gemodelleerd. Het zou nuttig zijn om te zien of verschillende soorten (hub)netwerken tot significant verschillende effecten leiden.
- De manier waarop hubs functioneren (bijvoorbeeld of ze bulkmaterialen verwerken, of ze elektrische laadstations leveren) kan verder worden onderzocht en geverifieerd met experts.
- Er kan een alternatief model worden gemaakt met een kortere tijdschaal, maar met meer gedetailleerde modellering, waarbij rekening wordt gehouden met veranderingen van maand tot maand, in plaats van van jaar tot jaar.
- Ons bestaande model en onze webapp kunnen worden gevalideerd met experts en praktijkmensen, om het nut en de verbeterpunten ervan te begrijpen.

Samenvatting conclusies

Het onderzoek naar lage emissie bouwlogistiek in relatie tot biobased en circulaire (hoog)bouw is in zes scenario's getoetst met oplopend gehalte van centraal hubnetwerk, multimodaal transport, emissieloze aandrijving, biobased, modulair en circulair gehalte.

Het onderzoek richtte zich met name op bouw hubs, maar de bevindingen zijn niet volledig eenduidig of juist verrassend. De doorrekening van de scenario's laten oplopende reductie van emissies zien, behalve bij met name inzet van scheepvaart op internationaal transport (nog vaak oude motoren) en bij lokale circulaire toepassing waarbij transport van buiten de stedelijke omgeving plaatsmaakt voor meer lokaal transport. Dit hint op combinaties van maatregelen zowel op centrale als lokale schaal. Bij inzet van circulaire hubs nemen met name lokaal transport en emissies toe en geven aanleiding om met name op lokale schaal emissieloze voertuigen in te voeren.

Aanvullend onderzoek is nodig om de potentiële overige nadelen en voordelen te beoordelen, en ruimtelijke en functionele scenario's voor bedrijventerreinen en -clusters van hubs rond steden te verkennen.

Het is nodig om aspecten van emissieloze stedelijke ontwikkeling en bouw in praktijk te meten en te evalueren hoe ze kunnen worden gemodelleerd en beïnvloed door biobased, modulair en circulair bouwen van individuele hoogbouw als van stedelijke gebieden.

Het is belangrijk om de processen en invloed van publieke en private belanghebbenden en het lokaal bestuur beter te begrijpen en hun invloed op implementatie van oplossingen en effecten op emissie.

Aan publieke zijde zijn beleid en instrumenten nog niet zodanig ontwikkeld dat publieke en private – gemeentelijk en bedrijfsstrategieën anticiperen op uitvraag en afdwingen van emissieloos bouwen en integrale ketens die op structurele wijze emissieloos bouwen realiseren.

Literatuur

Aalbers, H., Van Capelleveen, E., & Pel, W. (2020). *Inventarisatie rapport bouw- en installatielogistiek* [Inventarisatie rapport].

Balm, S., Berden, M., Morel, M. A., Ploos Van Amstel, W. P., & CIVIC. (2018). Slimme bouwlogistiek: onderzoek naar de fundamenteën van slimme en schone bouwlogistiek in steden. *Slimme Bouwlogistiek*.

Brusselaers, N. (2023). *The impact of off-site construction transport on air quality* [Thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of PhD in Business Economics]. Vrije Universiteit Brussel.

Brusselaers, N., Mommens, K. M., & Macharis, C. (2014). Air quality and freight transport in cities: a dynamic approach to measure the real impact.

Brusselaers, N., Mommens, K., & Macharis, C. (2021). Building Bridges: A Participatory Stakeholder Framework for Sustainable Urban Construction Logistics. *Sustainability*, 13(5), 2678. <https://doi.org/10.3390/su13052678>

De Bes, J., Eckartz, S., Van Kempen, E. A., Van Merrienboer, S., Ploos van Amstel, W. P., Van Rijn, J., & Vrijhoef, R. (2018). Duurzame bouwlogistiek voor binnenstedelijke woning- en utiliteitsbouw: Ervaringen en aanbevelingen. TNO Onderzoek Duurzame Bouwlogistiek, Hoofdstuk 1.

De Jong, J., Tijhuis, R., De Bruin, D., & Aelfers, S. (2023). *Netwerkvisie logistieke hubs* (Door Provincie Flevoland en Vervoerregio Amsterdam; Nr. 30120174).

Janné, M. (2020). *Construction Logistics in a City Development Setting November 2020* [Thesis]. Linköping University.

Morel, M., Balm, S., Berden, M., & van Amstel, W. P. (2019). Governance models for sustainable urban construction logistics: barriers for collaboration - ScienceDirect. *City Logistics 2019*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146520303793>

Rothuizen, M. (2021, 2 december). *Outlook Bouwlogistiek: Scenario's voor reductie van vervoersbewegingen en CO2-uitstoot in de stad voor nieuwbouwprojecten in 2030*. Topsector Logistiek. <https://topsectorlogistiek.nl/outlook-bouwlogistiek-scenarios-voor-reductie-van-vervoersbewegingen-en-co2-uitstoot-in-de-stad-voor-nieuwbouwprojecten-in-2030/>

Silie, N., Van Eck V. (2023), Onderzoek naar zero emissie bouwlogistiek in de G4, Hogeschool van Amsterdam

SUCCESS. (z.d.). *SUCCESS Project*. SUCCESS. <http://www.success-urbanlogistics.eu/>

Tesselaar, T. & Gemeente Amsterdam. (2020). *Designing a Construction Logistics Control Tower for City Development* [Master thesis]. Technische Universiteit Delft.

Uitvoeringsprogramma Topsector Logistiek 2020-2023 [Topsector Logistiek] & Buck Consultants International. (2020). QuickScan aard & omvang bouwlogistiek. In *cdn*. Uitvoeringsprogramma Topsector Logistiek 2020-2023. Geraadpleegd op 16 februari 2023, van <https://cdn.opwegnaarseb.nl/media/Quickscan-Aard-en-Omvang-Bouwlogistiek-24042020.pdf>

Van Luik, C., Luijten, C. J. L. M., Molin, A., Ploos van Amstel, W., & Vrijhoef, R. (2019). Slimme en duurzame bouwlogistiek. *Duurzame Bouwlogistiek*.

Van der Lugt, P. (2020). TOMORROW'S TIMBER: Towards the Next Building Revolution. Material District. ISBN: 978-90-827552-3-7.

De Bes, J., Eckartz, S., Van Kempen, E. A., Van Merrienboer, S., Ploos an Amstel, W. P., Van Rijn, J., & Vrijhoef, R. (2018). Duurzame bouwlogistiek voor binnenstedelijke woning- en utiliteitsbouw: Ervaringen en aanbevelingen. TNO Onderzoek Duurzame Bouwlogistiek, Hoofdstuk 1.

EIB. (2023). Industrieel bouwen en de bouwarbeidsmarkt.

Janné, M. (2020). Construction Logistics in a City Development Setting November 2020 [Thesis]. Linköping University.

Morel, M., Balm, S., Berden, M., & van Amstel, W. P. (2019). Governance models for sustainable urban construction logistics: barriers for collaboration - ScienceDirect. City Logistics 2019. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146520303793>

Osypchuk, O. (z.d.). Analysis of Selected Solutions for Sustainable Urban Deliveries in the Construction Industry. MDPI. <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/4/3567>

Rothuizen, M. (2021, 2 december). Outlook Bouwlogistiek: Scenario's voor reductie van vervoersbewegingen en CO2-uitstoot in de stad voor nieuwbouwprojecten in 2030. Topsector Logistiek. <https://topsectorlogistiek.nl/outlook-bouwlogistiek-scenarios-voor-reductie-van-vervoersbewegingen-en-co2-uitstoot-in-de-stad-voor-nieuwbouwprojecten-in-2030/>

Ruiz, L. A. L., Ramón, X. R., & Domingo, S. G. (2020). The circular economy in the construction and demolition waste sector e A review and an integrative model approach. Elsevier.

Tesselaar, T. (2020). Designing a Construction Logistics Control Tower for City Development [Master thesis]. Technische Universiteit Delft.

Topsector Logistiek, van Luik, C., & Buck Consultants International. (2022). Verduurzaming bouwlogistiek door gemeenten. Topsector Logistiek.

Topsector Logistiek. (2020). Quickscan Aard & Omvang Bouwlogistiek.

Uitvoeringsprogramma Topsector Logistiek 2020-2023 [Topsector Logistiek] & Buck Consultants International. (2020). QuickScan aard & omvang bouwlogistiek. In cdn. Uitvoeringsprogramma Topsector Logistiek 2020-2023.