

Inzicht in maatregelen om emissies van
bouwprojecten te verminderen

Methoderapport

Bouwemissietool

TNO 2024 R10280 – 16 februari 2024

Methoderapport Bouwemissietool

Inzicht in maatregelen om emissies van bouwprojecten te verminderen

Auteurs	A. (Annette) Rondaij, H.C. (Hannah) Onverwagt, M.F.A. (Misja) Steinmetz, S.A. (Siem) van Merriënboer, W. (Wouter) van Groesen, N.I. (Noa) te Duits, S.T. (Sylvie) Poels
Exemplaar nummer	2024-STL-RAP-100352343
Aantal pagina's	32 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	2
Opdrachtgever	Programma Emissieloos Bouwen
Projectnaam	EB doorontwikkeling bouwlogistieke tools
Projectnummer	060.53829

Alle rechten voorbehouden

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2024 TNO

Samenvatting

Binnen het programma Emissieloos Bouwen heeft TNO de Bouwemissietool (www.bouwemissies.nl) ontwikkeld: een rekentool die inzicht geeft in de CO₂, NO_x- en fijnstofemissies van wegtransport en bouwmachines (met uitzondering van rail- en vaartuigen) bij bouwprojecten. Naast het berekenen van de emissies van bouwprojecten beschikt de tool ook over de mogelijkheid om het potentiële effect van verschillende maatregelen voor emissiereductie weer te geven, zoals het toepassen van industriële bouwmethoden voor woningbouw, logistieke maatregelen (bijvoorbeeld het gebruik van een bouwhub) en de inzet van schonere en nul-emissie voertuigen en bouwmachines. De Bouwemissietool biedt de bouwsector een hulpmiddel om geïnformeerde beslissingen te nemen over het toepassen van maatregelen die de uitstoot verminderen, bijvoorbeeld in het kader van het verkrijgen van een natuurvergunning.

De tool is voor elk type bouw te gebruiken, al verschillen de functionaliteiten per bouwsector. Voor alle typen bouwsectoren kunnen de emissies op de bouwplaats worden berekend door kenmerken en inzet van de machines en voertuigen in te vullen. Specifiek voor woningbouw-laagbouw (eengezinswoningen) is de tool geavanceerder en kan een emissie-inschatting voor transport worden gedaan worden op basis van bouwprojectkenmerken (voor de emissie-inschatting van machines dienen nog wel de kenmerken en inzet te worden ingevuld). Voor alle typen bouw kan de tool het potentiële effect van het inzetten van schonere of nul-emissie voertuigen en bouwmachines berekenen. Voor woningbouw-laagbouw kan bovendien het potentiële effect van de toepassing van industriële bouwmethoden en de toepassing van een bouwhub worden berekend.

Er zijn diverse verdere ontwikkelmogelijkheden denkbaar voor de tool die zich richten op 1) het uitbreiden van de functionaliteiten, 2) het verbeteren van de bouwemissietool (gebruikersvriendelijkheid en onderliggende kengetallen) en 3) de aansluiting met andere tools die veelvuldig door de bouwsector worden gebruikt (denk aan de AERIUS Calculator, BIM en DuboCalc). Qua uitbreiding van functionaliteiten kan gedacht worden aan de mogelijkheid om emissies van een Grond-, Weg- en Waterbouwprojecten te schatten op basis van opgegeven projectkenmerken (zodat een toolgebruiker niet eerst een gedetailleerde opgave van inzet van machines en voertuigen hoeft in te voeren). Andere voorbeelden van hoe de tool verder verbeterd kan worden is door koude start emissies van het wegtransport nauwkeuriger mee te nemen (deze hebben namelijk grote invloed), de emissies van hulpfuncties van voertuigen (denk aan het gebruik van de mixer op een betonmixer) toe te voegen en de impact op ketenemissies en het gebruik van biobrandstoffen in de scope mee te nemen. Andere mogelijkheden zijn het toevoegen van een monitoringsmodule (zodat emissies van een bouwproject eenvoudiger kunnen worden gemonitord) en het toevoegen van een analysefunctie, zodat een gebruiker de resultaten zelf eenvoudig kan analyseren en visualiseren.

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
Inhoudsopgave	4
1 Inleiding	5
2 Van prototype naar Bouwemissietool	6
2.1 Prototype	6
2.2 Scope Bouwemissietool	7
2.3 Uitbreidingen Bouwemissietool.....	8
2.3.1 Uitbreiding met industriële bouwmethoden.....	9
3 Modulebeschrijvingen.....	11
3.1 Bouwmethoden	11
3.1.1 Traditionele bouw.....	11
3.1.2 Industriële bouw (hybride, 2D en 3D).....	12
3.1.3 Materiaalinschatting	13
3.2 Bouwtransport.....	14
3.2.1 Transport van materialen	14
3.2.2 Transport van materieel en personeel.....	16
3.2.3 Emissieberekeningen transport.....	17
3.3 Bouwmachines.....	18
3.3.1 Emissieberekeningen	19
3.4 Maatregelen voor emissiereductie	20
4 Aanbevelingen	22
Referenties	25
Ondertekening.....	26
Bijlagen	
Bijlage A: Materiaaldichtheden	27
Bijlage B: Uitgangspunten voor inschatting transporten	30

1 Inleiding

Nederland heeft te maken met grote maatschappelijke uitdagingen die de bouwsector raken. Er is een groot woningtekort en een grote bouwopgave voor de komende jaren: de benodigde nieuwbouw voor de periode 2022 t/m 2030 wordt door ABF Research geraamd op 981.000 woningen [1]. Dat gaat verder dan de doelstelling van 900.000 woningen uit het programma Woningbouw¹ en de 936.000 woningen die in de regionale woondeals uit 2022 en 2023 zijn afgesproken². Ook is er een grote noodzakelijke vernieuwingsopgave (vervanging en renovatie) van een groot deel van de civiele infrastructuur, zoals bruggen, sluizen, viaducten en tunnels, vanwege het einde van de technische levensduur in de komende decennia [2]. Ten slotte speelt de bouwsector een belangrijke rol in de energietransitie (denk aan aanleg van wind- en zonneparken). Kortom, de bouwopgave is enorm en het is van maatschappelijk belang dat de bouwdoor kan.

Er spelen echter meerdere uitdagingen die de uitvoering van de bouwopgave belemmeren of om een grote verandering vragen in de dagelijkse operatie. Naast schaarste van personeel en materialen heeft Nederland zich gecommitteerd aan internationale afspraken en Europese wet- en regelgeving op het gebied van natuur, klimaat en gezondheid. In onder meer het Klimaatakkoord, Schone Lucht Akkoord en in de Aanpak Stikstof heeft Nederland op nationaal niveau doelstellingen en ambities uitgesproken voor het terugdringen van de uitstoot van CO₂-, NO_x- en fijnstofemissies als gevolg van (onder andere) bouwtransport en de inzet van bouwmachines. Om de bouwsector te helpen te verduurzamen is het programma Schoon en Emissieloos Bouwen opgezet door de Ministeries van Infrastructuur en Waterstaat, Binnenlandse Zaken en Economisch Zaken. Dit programma richt zich specifiek op het verduurzamen van werk-, voer-, rail- en vaartuigen in de bouw. Als onderdeel hiervan is er een kennis- en innovatieprogramma Emissieloos Bouwen opgezet dat zich richt op industrieel bouwen, efficiëntere bouwlogistiek, digitalisering en de inzet van nul-emissie bouwmachines op de bouwplaats.

Binnen het programma Emissieloos Bouwen heeft TNO een tool ontwikkeld, de Bouwemissietool (www.bouwemissies.nl), om de bouwsector en beleidsmakers inzicht te geven in de uitstoot van een bouwproject als gevolg van de inzet van bouwmachines en bouwvoertuigen voor bouwtransport van en naar de bouwplaats (exclusief rail- en vaartuigen). De tool geeft ook inzichten in de potentiële effecten van emissiereducerende maatregelen. Dat geeft de bouwsector de mogelijkheid om geïnformeerde beslissingen te nemen over het toepassen van maatregelen die de uitstoot verminderen, bijvoorbeeld om een natuurvergunning te kunnen krijgen. De tool is het verst ontwikkeld voor woningbouw, maar is ook bruikbaar voor andere type bouwprojecten (bijvoorbeeld in de GWW³-sector). Dit rapport beschrijft de achterliggende methodiek van de rekentool.

In hoofdstuk 2 wordt de aanpak van de toolontwikkeling beschreven. Vervolgens wordt er in hoofdstuk 3 uitgebreid ingegaan op hoe emissies worden berekend in de tool. Ten slotte volgen aanbevelingen voor verdere doorontwikkeling van de tool in hoofdstuk 4.

¹ <https://www.volkshuisvestingnederland.nl/onderwerpen/programma-woningbouw>

² <https://www.volkshuisvestingnederland.nl/onderwerpen/woondeals>

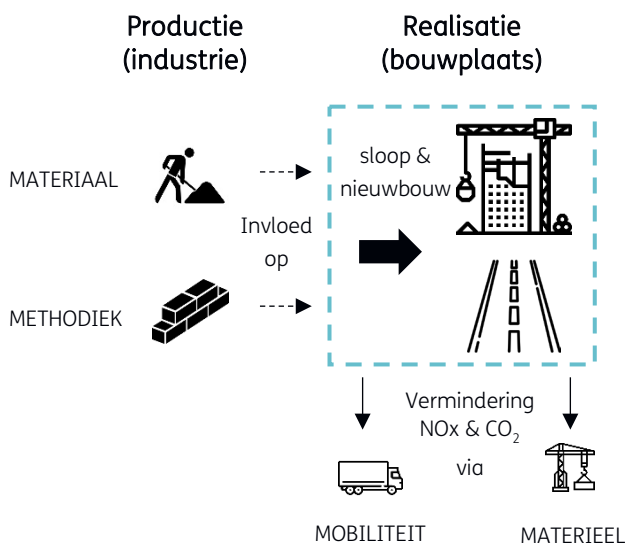
³ GWW = Grond-, Weg- en Waterbouw

2 Van prototype naar Bouwemissietool

Dit hoofdstuk gaat in op de ontwikkelingen en scope van de Bouwemissietool. De Bouwemissietool bouwt voort op een eerder door TNO ontwikkeld prototype die via www.noxestimator.nl online beschikbaar is. Paragraaf 2.1 geeft eerst een korte beschrijving van het eerder ontwikkelde prototype van de tool. Vervolgens gaat paragraaf 2.2 in op de scope van de Bouwemissietool. Paragraaf 2.3 gaat in op de uitbreidingen die hebben plaatsgevonden ten opzichte van het prototype.

2.1 Prototype

In 2021 heeft TNO al de eerste schetsen gemaakt voor een rekentool om stikstofuitstoot van bouwprojecten te schatten als onderdeel van een intern TNO-programma "Brains4Nitrogen"⁴. Het integraal benaderen van de bouwplaats was hierin een belangrijk onderdeel. De achterliggende gedachte is dat emissies die tijdens de realisatiefase op en rond de bouwplaats worden uitgestoten (door bouwmachines en bouwtransport) niet los kunnen worden gezien van de keuzes die gemaakt worden over bouwmethodieken en bouwmaterialen in de ontwerpfase (Figuur 2.1). Bij het gebruik van lichter materiaal (zoals hout in plaats van steen of beton) zijn bijvoorbeeld minder zware machines nodig op de bouwplaats.



Figuur 2.1: Interactie tussen keuzes in het ontwerp (materiaal en methodiek) van een gebouw of kunstwerk en inzet van (type) bouwmaterieel en mobiliteit (bouwtransport).

⁴ <https://www.tno.nl/nl/newsroom/insights/2021/10/tno-ers-bestrijden-stikstofcrisis/>

In het Brains4Nitrogen-project heeft dit geleid tot een prototype van een tool die de emissies van bouwtransport en bouwmachines berekend voor woningbouwprojecten met een traditionele bouwmethode. In [Figuur 2.2](#) wordt een snapshot van deze tool weergegeven. De gebruiker geeft als invoer voor de tool de m² BVO (bruto vloeroppervlakte) van het bouwproject op en het soort woningen (grondgebonden of hoogbouw). Op basis van die informatie wordt een inschatting van het totaal aantal bouwtransporten, kilometers en emissies gemaakt (volgens dezelfde methodiek zoals in paragraaf 0 zal worden toegelicht). Voor de machines kan de gebruiker zelf informatie opgeven over de eigenschappen en inzet (aantal, type, brandstof, bouwjaar, vermogen, Stageklasse, draaiuren en optioneel brandstofverbruik en AdBlue-verbruik). Op basis van deze gegevens wordt een inschatting van CO₂, NO_x en fijnstof gegeven.



Figuur 2.2: Snapshot van de tool die is ontwikkeld in het Brains4Nitrogen-project.

2.2 Scope Bouwemissietool

Voorafgaand aan de doorontwikkeling van de tool is eerst de scope vastgesteld. Deze wordt hieronder beschreven op verschillende onderdelen.

Emissies en emissiebronnen

De tool geeft de uitlaatemissies van de *bouwmachines* op de bouwplaats en het *bouwtransport* van materialen, materieel (machines) en personeel van en naar de bouwplaats voor CO₂-, NO_x- en fijnstof. De emissies zijn uitgedrukt in Tank-To-Wheel; dit zijn de directe emissies van de activiteit, bijvoorbeeld door het gebruik van brandstof in een voertuig. De emissies in de voorketen van de activiteit (zoals winning en productie van brandstoffen) zijn niet meegenomen. Dat houdt onder andere in dat de uitlaatemissies van voertuigen of machines op elektriciteit of waterstof in de tool gelijk aan nul zijn. Voor fijnstof zijn ook slijtage-emissies als gevolg van slijtage aan het wegdek, bandenslijtage en remslijtage meegenomen.

Bouwsectoren

De tool kan worden ingezet voor elk type bouw, al verschillen de functionaliteiten per bouwsector. Voor alle typen bouwsectoren kunnen de emissies op de bouwplaats worden berekend door kenmerken en inzet van de machines en voertuigen in te vullen. Specifiek voor woningbouw is de tool geavanceerder, en kan een emissie-inschatting voor transport worden gedaan op basis van bouwprojectkenmerken (voor de emissie-inschatting van machines dienen nog wel de kenmerken en inzet te worden ingevuld).

De uitbreiding met bouwmethodeken richt zich op woningbouw en dan specifiek op laagbouw (eengezinswoningen). Voor deze bouwsector en bouwstijl wordt er op basis van gegevens over het project en bouwwerk een schatting gemaakt van de benodigde materialen en het aantal transporten. Indien nodig, kan de gebruiker vervolgens transporten toevoegen, verwijderen of aanpassen. Voor bouwmaterieel moet de gebruiker zelf informatie invullen over de inzet van machines om een schatting van de emissies te krijgen.

Voor woningbouw – hoogbouw (meergezinswoningen) kunnen de inschattingen voor het materiaal en de transporten alleen voor traditionele bouw worden gemaakt – de industriële bouwmethoden voor hoogbouw zijn in deze versie van de tool nog niet uitgewerkt. Voor andere bouwsectoren, zoals utiliteitsbouw en Grond-, Weg- en Waterbouw (GWW), kunnen ook emissies worden berekend, maar moet de gebruiker zelf volledig invullen wat de transporten en inzet van bouwmachines zijn. Voor de materieelinzet moet de gebruiker in alle gevallen (ook voor woningbouw – laagbouw) zelf informatie invoeren.

Bouwfasen

De bouwfasen voor de woningbouwberekeningen zijn afgebakend tot de ruwbouw- en afbouwfase. Voor deze fasen wordt op basis van de informatie over de bouwmethodeken en het bouwproject een inschatting gegeven van de transportstromen. Voor andere bouwfasen, zoals de sloop, het grondwerk en de fundering wordt deze inschatting niet gegeven. Als de gebruiker van de tool wel zelf deze informatie heeft, kan deze informatie worden ingevuld en berekent de tool de emissies.

2.3 Uitbreidingen Bouwemissietool

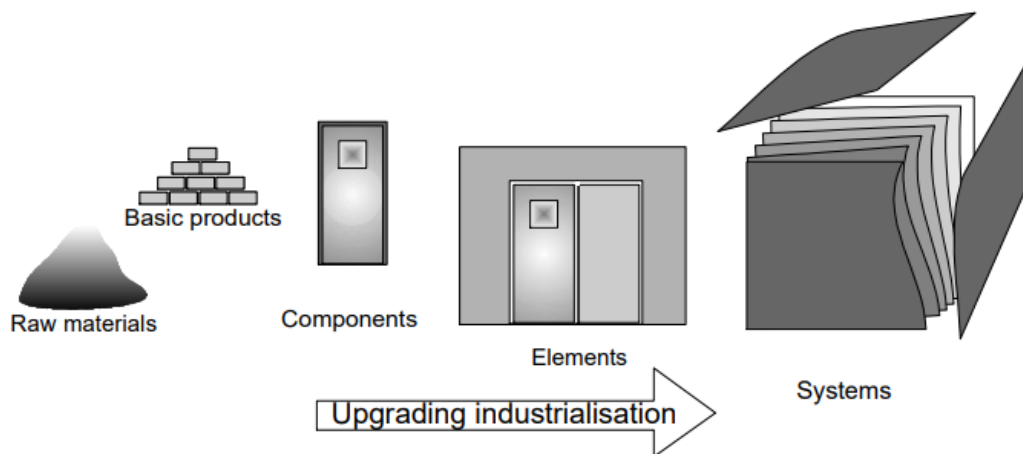
Ten opzichte van het prototype is de Bouwemissietool op verschillende aspecten verbeterd en/of uitgebreid:

1. Uitbreiding voor woningbouwprojecten met de impact van industriële bouwmethoden op de inzet van transport;
2. Toevoegen van het transport van personeel;
3. Verbetering van de rekenmethodeken van de emissies van bouwmachines;
4. Toevoegen van rekenfunctionaliteiten voor andere bouwsectoren dan woningbouw;
5. Toevoegen van een exportfunctie van de uitkomsten van de tool;
6. Verbetering van de userinterface.

De uitbreiding bij punt 1 uit bovenstaande lijst wordt in paragraaf 2.3.1 verder toegelicht. Punt 2 en 3 komen aan bod in hoofdstuk 3. Punt 4 is in paragraaf 2.2 benoemd bij de scopebeschrijving. Punt 5 en 6 worden niet apart toegelicht in deze rapportage, maar betreffen verbeteringen aan de functionaliteit, gebruikersvriendelijkheid en vormgeving van de tool.

2.3.1 Uitbreiding met industriële bouwmethoden

In het programma Emissieloos Bouwen is de tool verder uitgebreid met de impact van verschillende bouwmethodieken, waarin de mate van industrialisatie een belangrijk onderdeel is. In de klassieke definitie wordt er van industrialisatie gesproken als productieprocessen verschuiven van handarbeid naar het gebruik van machines in een fabriek. Tegenwoordig vindt industrialisatie op verschillende aspecten plaats, waaronder het gebruik van mechanische kracht, standaardisatie van producten, prefabricage, modularisatie en massaproductie. Er gaan in de literatuur dan ook tal van verschillende termen en definities rond voor industrialisatie in de bouw, waaronder prefabricage, modulair bouwen en off-site productie. Ongeacht de terminologie, is het idee van industrialisatie in de bouw hetzelfde, namelijk gestandaardiseerde montage in een fabriek met de materialenstromen geautomatiseerd en verdergaande automatisering en mechanisatie van het montageproces. Bij een verhoogde mate van industrialisatie verschuift het productieproces dan ook meer van de bouwplaats naar de fabriek, waar bouwdelen worden geprefabriceerd. Figuur 2.3 laat zien dat bij een verhoogde mate van industrialisatie, de toeleverende industrie steeds meer bouwcomponenten en complete bouwsystemen levert die op de bouwplaats alleen samengevoegd en gemonteerd te hoeven worden.



Figuur 2.3: Industrialisatie in de bouwproductieketen. Overgenomen uit [3].

Industrialisatie van de bouw verschijnt in vele vormen. Om met die variatie om te gaan, zijn er bij de ontwikkeling van de tool vier verschillende varianten van industrialisatie opgesteld, waarbij de scope zich beperkt tot woningbouw en specifiek laagbouw (eengezinswoningen).

Elk van de varianten, of bouwmethoden, kent een verschillende mate van industrialisatie (zie Figuur 2.4 voor voorbeelden):

- **Traditionele bouw** – Bouwproject waar onderdelen voornamelijk op locatie worden vervaardigd;
- **Hybride bouw** – Bouwproject waarin traditionele bouwmethodes gecombineerd worden met deels geprefabriceerde onderdelen;
- **2D bouw** – Bouwproject dat voornamelijk bestaat uit volledig geprefabriceerde 2D vloer-, wand- en gevelsystemen;
- **3D bouw** – Bouwproject dat voornamelijk bestaat uit geprefabriceerde 3D-modules en -elementen. Deze bouwmethode heeft de hoogste mate van prefabricage.



Figuur 2.4: Voorbeelden van de vier verschillende varianten van bouwmethoden. CLT = Cross Laminated Timber, HSB = Houtskeletbouw.

3 Modulebeschrijvingen

Dit hoofdstuk beschrijft de werking en rekenmethodieken van de Bouwemissietool. Paragraaf 3.1 gaat in op de verschillende bouwmethodieken voor woningbouw – laagbouw en hoe afhankelijk van de gekozen bouwmethodiek een inschatting van de materialen wordt gemaakt. In paragraaf 0 wordt de rekenmethodiek voor het aantal transporten en daarmee gepaarde emissies beschreven. Paragraaf 3.3 beschrijft de rekenmethodiek voor de emissies van bouwmachines en ten slotte beschrijft paragraaf 3.4 de mogelijke maatregelen voor emissiereductie.

3.1 Bouwmethoden

Voor elk van de bouwmethoden, die in deze paragraaf zullen worden beschreven, is een *bouwprofiel* opgesteld. Een bouwprofiel is specifiek voor een bouwmethode en type gebouw en bevat de hoeveelheden en typen bouwmaterialen die benodigd zijn voor het corresponderende bouwwerk. De hoeveelheden die nodig zijn van de bouwmaterialen worden bepaald door een aantal variabelen. De variabelen zijn afhankelijk van de bouwmethoden, deze worden in de volgende paragrafen toegelicht.

3.1.1 Traditionele bouw

In de bouwprofielen voor traditionele bouw wordt onderscheid gemaakt naar laagbouw (eengezinswoningen) en hoogbouw (meergezinswoningen). De bouwprofielen bevatten verschillende bouwelementen, zoals de binnen- en buitenmuren, dak, plafond en fundering, die ieder uit verschillende bouwmaterialen bestaat, zoals beton, zand, hout en , bakstenen. Het bouwprofiel gaat uit van een mix van verschillende traditionele bouwcategorieën, waaronder stapelbouw (kalkzandsteen (KZS)), gietbouw en prefab bouw. Voor elk van de bouwmaterialen in de verschillende elementen is aangegeven hoeveel (kg) er per m² bruto vloerooppervlak (BVO) nodig is voor het gebouw (zie Figuur 3.1).

Bouwelement	Bouw materiaal	Materiaalvolume (kg/m ² BVO)
Gebouwfundering	Baksteen	15
	Beton	30
	Staal	2
Vloeren	Staal	25
	Beton	450
	Zandcement	90

Figuur 3.1: Illustratief voorbeeld van de opzet van een bouwprofiel.

In de tool geeft de gebruiker het aantal BVO van het hele bouwproject aan in m², waarna de benodigde hoeveelheid per bouw materiaal (in kg) via een vermenigvuldiging met de materiaalvolumes in het bouwprofiel wordt berekend. Met behulp van materiaaldichtheden wordt het berekende gewicht ook nog geconverteerd naar oppervlakte en volume van de materialen. Dit is nodig voor het schatten van het aantal transporten, want afhankelijk van het type materiaal zit de beperkende factor van het transport op gewicht of volume/oppervlakte. Tabel 4.1 in Bijlage A bevat de dichtheidsfactoren, waarmee het volume en de oppervlakte vanuit het gewicht kunnen worden berekend.

3.1.2 Industriële bouw (hybride, 2D en 3D)

Voor de industriële bouwmethoden (hybride, 2D en 3D) zijn op basis van expertkennis bouwprofielen opgezet. Waar de bouwprofielen uit bestaan, is niet alleen afhankelijk van de bouwmethodiek, maar ook van de keuzes op gebied van de materialisatie en de maatvoering van de woning.

Om de hoeveelheden en type bouwmaterialen in te schatten moet de gebruiker dan ook de volgende gegevens invoeren:

- **Bruto vloeroppervlakte** (in m²);
- **Maatvoering woning** – het aantal gehele bouwlagen (exclusief eventuele zolderruimte in het geval van een schuine kap), het type dak (hellend of plat), de breedte, hoogte en diepte van de bouwlagen;
- **Materialisatie** – het type bouwelementen dat gebruikt wordt in de begane grondvloer, de verdiepingsvloer (casco), de wanden (casco), de gevel (schil) en het dak (schil). De keuzeopties staan in Tabel 3.1 weergegeven.

Tabel 3.1: Materialisatie voor verschillende bouwelementen bij industriële bouw.

Bouwelementen	Hybride bouw	2D-bouw en 3D-bouw
Begane grondvloer	Gestort beton	Kanaalplaatvloer
	Kanaalplaatvloer	Breedplaatvloer
	Breedplaatvloer	Ribcassettevloer
	Ribcassettevloer	CLT-vloer (hout)
	CLT-vloer (hout)	
Verdiepingsvloer (casco)	Gestort beton	Kanaalplaatvloer
	Kanaalplaatvloer	Breedplaatvloer
	Breedplaatvloer	CLT-vloer (hout)
	CLT-vloer (hout)	HSB-vloer (hout)
	HSB-vloer (hout)	
Wanden (casco)	Gestort beton	Prefabwand (beton)
	Prefabwand (beton)	CLT-wand (hout)
	CLT-wand (hout)	HSB-wand (hout)
	HSB-wand (hout)	
Type gevel (schil)	HSB-gevel (hybride)	HSB-gevel (2D)

	Sandwichpaneel gevel beton (hybride)	Sandwichpaneel gevel beton (2D)
	Sandwichpaneel gevel met isolatie (hybride)	Sandwichpaneel gevel met isolatie (2D)
	HSB-gevel (2D)	
	Sandwichpaneel gevel beton (2D)	
	Sandwichpaneel gevel met isolatie (2D)	
Hellend dak	Sandwichpaneel dak met isolatie	Sandwichpaneel dak met isolatie
	Dakdoos (hout) scharnierkap	Dakdoos (hout) scharnierkap
Plat dak	Gestort beton	Kanaalplaatvloer
	Kanaalplaatvloer	Breedplaatvloer
	Breedplaatvloer	CLT-vloer (hout)
	CLT-vloer (hout)	HSB-vloer (hout)
	HSB-vloer (hout)	

Specifiek voor 3D-bouw, voert de gebruiker ook nog de eigenschappen in over de 3D-modules van het te realiseren woningtype, namelijk:

- het aantal modules per woning;
- de breedte (m), diepte (m) en hoogte (m) per module;
- het gewicht per module (kg);
- of de gevel is opgenomen in de module (ja/nee);
- of het dak is opgenomen in de module (ja/nee).

3.1.2.1 Afbouwpakketten

Ten slotte kan de gebruiker kiezen welke afbouwpakketten in het systeem zitten. Er kan gekozen worden uit vijf afbouwpakketten, waarbij meerdere opties kunnen worden geselecteerd:

1. Installaties;
2. Binnenwanden met afwerking;
3. Dekvloeren met afwerking;
4. Sanitair en keukens;
5. Trappen.

Voor elk van de afbouwpakketten zijn er verschillende opties voor hoe de afbouwpakketten worden of zijn verwerkt: in situ, prefab of reeds opgenomen in het systeem. Deze informatie wordt gebruikt om de inschatting van de materiaalhoeveelheden te completeren.

3.1.3 Materiaalinschatting

Als de gebruiker van de tool alle benodigde gegevens heeft ingevuld bij de project- en bouwwerkdefinitie wordt een overzicht gegeven van de materiaalinschatting. Per materiaaltype wordt aangegeven hoeveel kg aan benodigd materiaal wordt geschat (zie Figuur 3.2). De gebruiker kan deze hoeveelheden naar eigen wens aanpassen.

TNO Bouwemissietool Type project: Woningbouw

Projectdefinitie ✓ Bouwwerkdefinitie ✓ **03** Materiaalinschatting 03 Inzet materieel 04

Materiaalinschatting

U ziet hier een inschatting van het benodigde materiaal, gebaseerd op de eigenschappen van uw project. U kunt zelf de hoeveelheid per type materiaal wijzigen.

Deze pagina geeft een inschatting van de benodigde te transporten materialen en materieel in gewicht (kg). Via de knop kan een csv worden gedownload met daarin de materiaaldichtheden per materiaal. Deze kunt u gebruiken om zelf de gewichten om te rekenen naar volume (m³).

Download csv

[Hoe komt deze inschatting tot stand?](#)

Baksteen	241150 kg
Hout	95510 kg
Kalkzandsteen	164060 kg
Polystyreen	2470 kg
HSB (hybride)	20510 kg
Keramisch	

Figuur 3.2: Voorbeeld van materiaalinschatting in de tool.

3.2 Bouwtransport

In paragraaf 3.1.3 is beschreven hoe de materiaalhoeveelheden worden ingeschat. Deze paragraaf legt uit hoe op basis van de materiaalhoeveelheden een inschatting van de emissies van het transport wordt gemaakt. Dat begint met een inschatting van het aantal en typen benodigde voertuigen, inclusief voertuigeigenschappen zoals emissieklasse en brandstoftype. Vervolgens wordt ook het aantal kilometers geschat om de emissies van het transport te berekenen. Het bouwtransport bestaat uit het transport van materialen, materieel en personeel. Paragraaf 3.2.1 en 3.2.2 gaan verder in op hoe het aantal transporten voor elk van deze categorieën wordt berekend. Paragraaf 3.2.3 legt uit hoe vervolgens de emissies worden berekend.

3.2.1 Transport van materialen

Om de emissies van het transport van materialen van en naar de bouwplaats te schatten wordt eerst bepaald hoeveel voertuigbewegingen er daarvoor nodig zijn. De eerste stap is om de materialen toe te wijzen aan de voertuigtypen waarmee deze doorgaans worden vervoerd. Om deze toewijzing te doen wordt een classificatie van *bouwstroomtypes* gebruikt. Een bouwstroom is een clustering van bouwmaterialen met overeenkomstige kenmerken van de organisatie van het transport. De verschillende bouwstroomtypes en hun beschrijvingen zijn te vinden in Tabel 3.2.

Tabel 3.2: Beschrijving van de verschillende bouwstroomtypes. Bewerking van Tabel 1 uit [4] en Tabel 3 uit [5].

Bouwstroomtype	Omschrijving
1. Beton	Aangemaakt (vloeibaar) beton dat vanuit een betonmixer wordt gestort op de bouwplaats.
2. Ruwbouw groot	Grotere en zwaardere elementen, zoals prefab, heipalen en vloerelementen.
3. Ruwbouw ladingdragers	Kleinere elementen op bokken/pallets.
4. Bulk	Bijvoorbeeld grond of grind.
5. Afbouw	Afbouw, installaties en kleinere bouwmaterialen vervoerd op pallets of in containers. In het geval van de industriële bouwmethoden (hybride, 2D en 3D) komen de losse materialen in het bouwstroomtype Afbouw te vervallen. In plaats daarvan kan optioneel uit verschillende afbouwpakketten (zie paragraaf 3.1.2.1) worden gekozen: <ul style="list-style-type: none"> - Afbouwpakket A – installaties - Afbouwpakket B – binnenwanden met afwerking - Afbouwpakket C – dekvloeren met afwerking - Afbouwpakket D – sanitair en keukens - Afbouwpakket E – trappen
6. Afval	Bouw- en sloopafval, maar ook verpakkingsmaterialen en emballage.
7. Materieel	Bijvoorbeeld bouwmachines, bouwkranen en steigers.
8. Personeel	Vervoer van personeel van en naar de bouwplaats.

In Tabel 4.1 (Bijlage A) is te vinden aan welk bouwstroomtype elk materiaal is toegewezen. Elk bouwstroomtype heeft een specifieke voertuigtoewijzing. Bijvoorbeeld, vloeibaar beton wordt uitsluitend vervoerd door een betonmixer, terwijl afval door zwaardere vrachtautotypes en trekker-opleggers wordt vervoerd. In **Tabel 4.2** (Bijlage B) wordt deze verdeling weergegeven.

Tabel 4.3 (Bijlage B) toont de laadvermogens per voertuig. Hierin staan details over het gewicht, volume en oppervlakte die de verschillende voertuigtypes maximaal kunnen vervoeren. Daarnaast wordt ook de gemiddelde beladingsgraad van de voertuigtypes weergegeven, aangezien een voertuig vaak niet volledig geladen is (bijvoorbeeld doordat er minder lading mee kan worden genomen door gebrek aan opslagruimte op de bouwplaats of vanwege verpakkingsmaterialen (zoals pallets)). De gemiddelde beladingsgraad kan verschillend zijn voor het gewicht, het volume of het oppervlak.

Een beknopt overzicht van de berekeningsmethode om het aantal transporten in te schatten is als volgt:

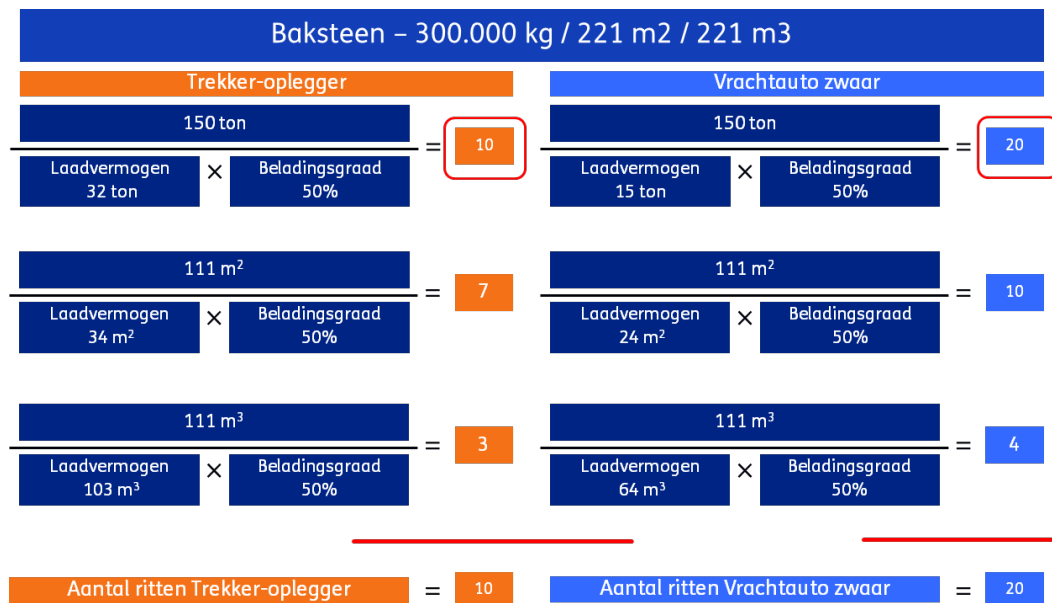
1. Eerst wordt het gewicht, het volume en de oppervlakte van elk materiaal (zie paragraaf 3.1.3) bepaald.

2. Het materiaal wordt vervolgens verdeeld over de voertuigtypes. Hoe deze verdeling eruitziet is afhankelijk van het bouwstroomtype waaraan het materiaal is toegewezen.
3. Per voertuigtype wordt vervolgens berekend hoeveel transportbewegingen er nodig zijn om het materiaal te vervoeren voor zowel volume, gewicht als oppervlakte.

Dit wordt gedaan op basis van het maximale laadvermogen en de gemiddelde beladingsgraad van de voertuigen. Van de drie eenheden, wordt degene genomen die beperkend is voor de hoeveelheid die in een voertuig kan worden vervoerd en dus resulteert tot het hoogste aantal transporten. Isolatiemateriaal is bijvoorbeeld beperkend in vloeroppervlakte of volume (en niet in gewicht). Zwaardere materialen zullen daarentegen eerder op basis van gewicht beperkt zijn bij het bepalen van de laadcapaciteit van een vrachtauto.

Deze procedure wordt toegepast voor elk type materiaal en elk type voertuig, wat resulteert in een berekening van benodigde voertuigen voor elk specifiek materiaal.

Figuur 3.3 laat met een voorbeeldberekening zien hoe de hoeveelheden van een materiaaltype worden verdeeld over verschillende voertuigtypen en vervolgens hoe het aantal benodigde ritten per voertuigtype wordt geschat op basis van laadvermogen en beladingsgraad.



Figuur 3.3: Voorbeeldberekening aantal ritten voor een materiaaltype.

3.2.2 Transport van materieel en personeel

Naast het transport van materialen, komen er ook emissies vrij bij het transport van materieel en personeel. Het transport van materieel (zoals graafmachines en verreikers) wordt op dit moment nog niet afgeleid uit het aantal en type ingezette machines, maar is een inschatting door een percentage van het transport van de materialen in bouwstroomtypes 1 t/m 4 te nemen. Dit komt neer op ongeveer 20% en is gebaseerd op monitoring in de praktijk.

In een mogelijke toekomstige uitbreiding van de tool, zou de inschatting van de transporten van materieel verbeterd kunnen worden door per machinetype te bepalen welk voertuigtype en hoeveel voertuigbewegingen er nodig zijn om de machines van en naar de bouwplaats te transporteren.

Voor de berekening van het transport van personeel wordt de gebruiker gevraagd naar gegevens, namelijk hoeveel bouwpersoneel er dagelijks gemiddeld op de bouwplaats is in iedere bouwfase. Daarnaast geeft de gebruiker eveneens de totale tijd in dagen per fase op. Op basis van deze gegevens, wordt het aantal personeelstransporten en de emissies die daarmee gemoeid gaan ingeschat. Per fase wordt eerst het totaal aantal personen berekend. Vervolgens wordt het personeel over de verschillende type voertuigen verdeeld. De tool gaat er vanuit dat bouwpersoneel deels met bestelauto's (80%) en deels met personenauto's (20%) wordt vervoerd, waarbij ervanuit wordt gegaan dat een personenauto gemiddeld één persoon vervoert en een bestelauto gemiddeld 1,6 personen. Met deze aannames kan een inschatting worden gemaakt hoeveel bestelauto's en personenauto's worden gebruikt voor het transport van het personeel. Deze inschatting wordt voor elke fase gemaakt.

3.2.3 Emissieberekeningen transport

Na het maken van een inschatting van de hoeveelheid en type transportbewegingen, wordt deze teruggekoppeld aan de gebruiker. Om de gebruiker te ondersteunen, selecteert de tool hierbij per voertuigtype technische eigenschappen, zoals brandstoftype en emissieklasse, wat later nodig is voor de emissieberekening. Op dit moment kiest de tool standaard diesel als brandstof en Euro 6/VI als emissieklasse. De gebruiker kan deze inschatting indien gewenst zelf nog aanpassen. Voor de afstanden die de voertuigen afleggen worden de waarden uit Tabel 3.3 gebruikt (kilometers van een enkele rit). In de berekeningen worden deze afstanden voor elk voertuig vermenigvuldigd met twee, omdat wordt aangenomen dat elk voertuig een retourrit maakt.

Tabel 3.3: Afstanden in kilometer per enkele rit.

Traject	Afstand over de snelweg (km)	Afstand over een buitenweg (km)	Afstand in de stad (km)
Leverancier -> bouwplaats	60	10	5
Leverancier -> bouwhub	60	10	1
Bouwhub -> bouwplaats	5	0	5
Woonplaats -> bouwplaats (voor personeel)	60	10	5

Deze details dienen als ruwe inschatting en zijn niet exact, maar vormen een nuttige basis als de gebruiker (nog) geen specifieke informatie beschikbaar heeft. De gebruiker kan de afstanden per voertuigtype zelf aanpassen in het overzicht van transporten.

Vervolgens worden er emissiefactoren (in g/kilometer) gebruikt om per voertuig de emissies te berekenen.

De emissiefactoren verschillen per combinatie van voertuigtype, brandstoftype, emissieklasse en wegtype (stad, buitenweg en snelweg). Voor stadswegen is uitgegaan van gemiddelde doorstroming en voor de snelweg zijn met betrekking tot snelheidsregime gemiddelde emissiefactoren gebruikt. De emissiefactoren zijn gebaseerd op detailemissiefactoren die door TNO voor verschillende voertuigcategorieën worden bijgehouden op basis van de nieuwste inzichten uit praktijkmetingen en literatuur [6].

3.3 Bouwmachines

In deze paragraaf wordt beschreven hoe de emissies van het gebruik van bouwmachines worden berekend in de tool. De emissies van het transport van de machines wordt hierin niet meegenomen. Het transport wordt namelijk bepaald door een percentage te nemen van het transport van materialen, zoals beschreven is in paragraaf 3.1.1.

Om een inschatting te maken van de uitstoot van bouwmachines is er informatie van de gebruiker nodig. Onder het kopje 'inzet machines' kiest de gebruiker de bouwmachines die de gebruiker inzet per bouwfase, de gebruiker heeft hierbij keuze uit een lijst met machines die voorkomen in het EMMA-model [7]. Het EMMA-model is het Emissiemodel Mobiele Machines dat bedoeld is om de nationale emissies van bouwmachines te bepalen op basis van beperkte metingen en monitoring. Het model maakt onder andere gebruik van verschillende informatiebronnen over de Nederlandse parksamenstelling. Daarbij wordt ook onderscheid gemaakt naar verschillende typen machines.

Nadat de gebruiker het machinetype heeft gekozen, dient het vermogen (kW) en het bouwjaar van de machine ingevuld te worden. Vervolgens krijgt de gebruiker een keuze voor de brandstof van de machine. De keuze voor diesel en elektriciteit zijn voor iedere machine aanwezig⁵. Voor de machines die voornamelijk als benzine-variant beschikbaar zijn (en waarvan de uitstoot bekend is in het EMMA-model), is er ook een optie voor benzine beschikbaar. Voor benzine- en dieselmachines is ook de stageklasse⁶ nodig. De tool geeft een schatting van de stageklasse op basis van de eerder ingevoerde gegevens. Indien nodig kan de gebruiker dit zelf aanpassen. Tenslotte geeft de gebruiker het gemiddeld totaal aantal draaiuren per machine. De gebruiker moet bovenstaande opties voor elke machine invullen. Indien de gebruiker meerdere machines heeft met dezelfde eigenschappen, kan dat worden ingevuld.

De gebruiker kan er daarnaast voor kiezen om het brandstofverbruik en (in het geval van de aanwezigheid van een systeem voor selectieve katalytische reductie (SCR)) het AdBlue-verbruik in te vullen. Deze velden zijn optioneel, maar zorgen ervoor dat de berekening voor NO_x in lijn is met de AUB-methode⁷ die in de AERIUS-tool wordt gebruikt om de NO_x-emissies (en NH₃-emissies) van bouwmachines te bepalen en sluit beter aan bij praktijkemissies [8] [9].

Als laatste kan gebruiker ervoor kiezen om de optie 'Aan de machine zijn geen aanpassingen gedaan die de uitstoot zouden kunnen verhogen' aan te vinken. Sommige bouwmachines zijn uitgerust met emissiereductiesystemen, zoals een roetfilter of een SCR-systeem. Een roetfilter wordt toegepast op dieselmotoren en heeft als doel de uitlaatgassen door te laten en de roetdeeltjes tegen te houden. Dit zorgt voor een reductie van fijnstof (PM).

⁵ Uitzondering: diesel is niet beschikbaar voor bandenzagen/motorslijpers.

⁶ Europese normen voor de uitstoot van non-road mobile machinery (NRMM).

⁷ AUB staat voor AdBlue-verbruik, Uren en Brandstofverbruik.

Het SCR-systeem is een geavanceerd systeem dat wordt gebruikt in dieselmotoren en de NO_x-emissie kan verlagen met tot wel 90%. Voor NO_x-reductie in het SCR-systeem is er AdBlue nodig. Door manipulatie, defecten of veroudering kan er een verminderde tot geen werking van deze emissiereductiesystemen zijn. Dit blijkt in de praktijk regelmatig het geval te zijn. Het EMMA-model gaat er daarom in de standaardberekening van uit dat 5% van de Stage V-dieselmachines een defect of verwijderd roetfilter heeft en dat 10% van de Stage IV- en Stage V-dieselmachines een niet-werkende SCR-installatie heeft [10]. Mocht de gebruiker er zeker van zijn dat de emissiereductiesystemen, mochten deze in eerste instantie aanwezig zijn, correct werken, dan kan hij dit aangeven door dit aan te vinken. Er wordt dan uitgegaan van andere data uit het EMMA-model, waarin de aanname dat een deel van de roetfilters en SCR-systemen niet werkt, niet is meegenomen.

3.3.1 Emissieberekeningen

De emissies worden op verschillende manieren berekend, afhankelijk van de informatie die de gebruiker meegeeft. Wanneer machines op elektriciteit werken, wordt ervanuit gegaan dat de uitstoot (TTW) van NO_x, CO₂ en PM nul is. Voor de overige brandstoffen wordt het EMMA-model of de AUB-methode gebruikt, afhankelijk van de stof (CO₂, NO_x of PM) en of het brandstofverbruik wordt ingevuld.

Als het brandstofverbruik niet is ingevuld door de gebruiker, wordt de uitstoot van de machine voor zowel NO_x, CO₂ als voor PM bepaald via het EMMA-model [7]. Aan de hand van het machinetype, de brandstof, de stageklasse en het vermogen wordt voor alle drie de stoffen de emissies per draaiuur uit het EMMA-model gehaald. Aangezien het EMMA-model niet alle vermogens bevat voor elke machinetype, wordt lineaire regressie toegepast om aan de hand van de wel aanwezige vermogens in EMMA voor elke mogelijke invulwaarde van het vermogen de emissies per draaiuur te bepalen. De totale emissies worden vervolgens berekend door de uitstoot per draaiuur te vermenigvuldigen met het aantal draaiuren en het aantal machines.

Indien het brandstofverbruik wel bekend is bij de gebruiker, dan kan hij deze invullen. Vervolgens worden de NO_x-emissies berekend via de AUB-methode, om zo een inschatting te maken die beter aansluit bij praktijkemissies [9]. Voor de AUB-methode is de 'AUB-categorie' van een machine nodig. Deze wordt aan de hand van de brandstof, het vermogen en de stageklasse bepaald. Voor dieselmotoren wordt de AUB-classificatie via Tabel 3.4 bepaald. Machines die op benzine of LPG draaien hebben een aparte klasse: E.

Tabel 3.4: AUB-classificatie voor bouwmachines met dieselmotoren, overgenomen uit [9].

Vermogen [kW]	Stage-I	Stage-II	Stage-IIIA	Stage-IIIB	Stage-IV	Stage-V
(...-56)	X	X	X	A	A	A
[56-75)	X	X	A	A	D	D
[75-560)	X	A	B	B/C	D	D
[560-...)	X	X	X	X	X	B/C

Een machine met AUB-categorie C of D heeft een SCR-systeem dat NO_x reduceert. Zoals te zien is in Tabel 3.4 zijn er categorieën (B/C) waaruit de aanwezigheid van een SCR niet gelijk volgt uit de brandstof, het vermogen en de stageklasse. Mocht de gebruiker een machine kiezen uit zo een groep, waar het niet duidelijk is of een SCR-systeem aanwezig is, dan krijgt de gebruiker een keuze om aan te vinken of er een SCR-systeem aanwezig is in de machine of niet.

Wanneer het brandstofverbruik is ingevuld en de machine heeft geen SCR-systeem, dan wordt de volgende formule gebruikt voor de berekening van de uitstoot van NO_x , waarbij f_1 en f_2 factoren zijn die afhankelijk zijn van de AUB-classificatie:

$$NO_x = \text{aantal machines} \times (f_1 \times \text{brandstofverbruik} + f_2 \times \text{draaiuren})$$

Het brandstofverbruik wordt ingevuld per liter en het aantal draaiuren in uren. De emissies van de andere twee stoffen worden via het EMMA-model, zoals eerder beschreven, berekend.

Is er wel een SCR-systeem aanwezig in de machine en het brandstofverbruik is ingevuld, dan moet de gebruiker ook het AdBlue-verbruik invullen. De uitstoot van NO_x wordt in dat geval op de volgende manier berekend:

$$NO_x = \text{aantal machines} \times (f_1 \times \text{brandstofverbruik} + f_2 \times \text{draaiuren} + f_3 \times \min(\text{adblueverbruik}, p \times \text{brandstofverbruik})),$$

waarbij de waarde p gelijk is aan 0,04 voor een machine in categorie C en 0,07 voor een machine in categorie D. Dit zorgt ervoor dat het AdBlue-verbruik niet meer dan 4% van het brandstofverbruik is voor categorie C en 7% voor categorie D. Ook hier geldt dat de emissies van de overige stoffen via het EMMA-model worden berekend.

3.4 Maatregelen voor emissiereductie

Als de emissies van het bouwtransport en het gebruik van bouwmachines is berekend, komt de gebruiker op de uitkomstenpagina. Daar wordt de totale uitstoot van CO_2 -, NO_x - en PM-emissies getoond in verschillende uitsplitsingen. Vervolgens heeft de gebruiker de mogelijkheid om te zien hoe verschillende reductiemaatregelen effect hebben op de emissies.

De mogelijke reductiemaatregelen zijn:

- Hoger percentage elektrisch vervoer;
- Transport via een bouwhub;
- Andere bouwmethodiek;
- Verschonen materieel.

Als de maatregelen ‘hoger percentage elektrisch vervoer’ en ‘verschonen materieel’ worden gekozen, wordt de gebruiker teruggebracht naar de pagina waar respectievelijk een overzicht van de inzet van transport of de inzet van materieel wordt gegeven. Voor elk voertuig-/machinetype kan de gebruiker het brandstoftype aanpassen naar een nul-emissie-variant. Ook kan de gebruiker door de Euro-/Stageklasse aan te passen voor een schoner(e) voertuig/machine kiezen. Als vervolgens weer wordt doorgelikt naar de uitkomstenpagina, wordt het effect op emissies van deze keuzes zichtbaar.

Vergelijkbaar, wordt de gebruiker teruggebracht naar de projectdefinitie als hij kiest voor de reductiemaatregel ‘andere bouwmethodiek’. In dit geval kan voor een andere bouwmethode worden gekozen en moeten de overige schermen opnieuw moeten worden doorlopen om een nieuwe berekening van emissies te maken. Zodra de gebruiker weer op de uitkomstenpagina landt, wordt het verschil zichtbaar ten opzichte van de emissies van de gekozen bouwmethodiek in de eerste sessie.

De gebruiker kan ten slotte aangeven dat hij gebruikmaakt van een bouwhub. Het inzetten van een bouwhub maakt het bundelen van materialen mogelijk, waardoor er minder transportbewegingen bij de bouwplaats aankomen. Niet alle materialen lenen zich goed om via een bouwhub te vervoeren, zoals vloeibaar beton of bulkstromen of reeds volledig beladen vrachtwagens. In **Tabel 4.4** (Bijlage B) wordt per bouwstroomtype weergegeven welk percentage van de materialen rechtstreeks wordt vervoerd en welk deel via een bouwhub gaat wanneer deze aanwezig is. Het toepassen van een bouwhub wordt alleen als optie aangeboden voor traditionele bouw. Voor de industriële bouwmethoden (hybride, 2D en 3D) worden materialen doorgaans al op de productielocatie gebundeld of verwerkt in de bouwsystemen of afbouwpakketten.

Voor de berekening van het transport met de aanwezigheid van een bouwhub wordt eerst het gewicht, volume en oppervlak van de materialen die rechtstreeks worden vervoerd bepaald. Deze transportberekening volgt dezelfde methode als besproken in paragraaf 0. De berekening van het aantal transporten van de materialen die via de bouwhub gaan wordt eveneens de methode uit paragraaf 0 gebruikt, maar sommige gegevens, zoals de beladingsgraad en de voertuigverdeling, zullen verschillen met het gebruik van een bouwhub. Bijvoorbeeld, bij rechtstreeks vervoer worden materialen die onder afbouw vallen verdeeld over bestelauto's, lichte vrachtauto's, middelgrote vrachtauto's, grote vrachtauto's en trekker-opleggers. Van de bouwhub naar de bouwplaats wordt dit uitsluitend gedaan door middelgrote vrachtauto's.

Het voornaamste doel van een bouwhub is het bundelen van kleinere zendingen materialen. Daarom wordt het benodigde aantal voertuigen niet langer per materiaal berekend, maar per bouwstroomtype (waarin meerdere materialen vallen). Op deze manier worden materialen van verschillende leveranciers gebundeld, wat resulteert in een efficiënter gebruik van voertuigen.

4 Aanbevelingen

De Bouwemissietool voor bouwtransport en -machines biedt momenteel een aanzienlijke mate van flexibiliteit en inzicht. Echter, het heeft ook enkele beperkingen die in dit hoofdstuk kort worden besproken en waarin mogelijke verbeteringen en uitbreidingen worden toegelicht.

Uitbreiden bouwemissietool

- **Uitbreiden woningbouw met hoogbouw voor verschillende bouwmethodieken**
Op dit moment kan er alleen voor woningbouwprojecten met laagbouw een inschatting van emissies worden gegeven voor de verschillende industriële bouwmethodieken (hybride, 2D-bouw en 3D-bouw). Voor hoogbouw (meergezinswoningen) kan dit alleen worden gegeven voor een traditionele bouwstijl. Om ook voor hoogbouwprojecten de opties voor industriële bouwmethodieken aan te kunnen bieden moeten daarvoor bouwprofielen worden opgesteld.
- **Uitbreiding naar andere type bouwprojecten**
De focus van de huidige versie van de tool ligt op woningbouwprojecten en specifiek op het type 'laagbouw'. Om voor alle type bouwprojecten met dezelfde kengetallen en rekenmethodiek te rekenen zal het gedeelte van de tool waarin uit verschillende bouwmethodieken kan worden gekozen, uitgebreid moeten worden naar grond-, weg en waterbouwprojecten en utiliteitsbouwprojecten. Dit houdt onder andere in dat er 1) standaardprofielen moeten worden opgezet voor verschillende type bouw- en kunstwerken (in verschillende type bouwmethodieken) en 2) praktijkdata moet worden opgehaald over de omvang en inzet van bouwtransport en bouwmachines van de verschillende type bouwprojecten en -methoden.
- **Uitbreiding met een monitoringsmodule**
De tool geeft op dit moment een inschatting van emissies van bouwtransport en bouwmachines voor verschillende type bouwprojecten en -methodieken. Om de verwachting vooraf en de daadwerkelijke inzet en emissies te vergelijken dient er een monitoringsmodule aan de tool te worden toegevoegd. Het idee is dat de gebruiker data uploadt over het aantal, type en de inzet van bouwtransport en bouwmachines tijdens de realisatiefase van het bouwproject, waarna de tool op basis daarvan de geschatte emissies berekend.
- **Uitbreiden woningbouw met andere bouwfasen**
Op dit moment focust de tool zich op de ruw- en afbouwfase. Er is verdere uitbreiding nodig naar de sloopfase, het bouwrijp maken en de funderingsfase om een inschatting te kunnen geven van de emissies van een bouwproject van sloop tot afbouw.
- **Uitbreiden woningbouw met renovatie**
Voor de industriële bouwmethoden kunnen op dit moment alleen inschattingen worden gemaakt voor nieuwbouwprojecten. Er is een uitbreiding nodig waarin de bouwprofielen worden aangepast op renovatiebouw om ook renovatie als optie voor woningbouwprojecten te kunnen aanbieden in de tool.
- **Toevoegen energiegebruik van emissieloos transport en materieel**
Er zal in toenemende mate gebruik gemaakt gaan worden van emissieloos transport en materieel op bouwplaatsen.

De tool kan worden uitgebreid met een module waarin ook het energiegebruik van emissievrij transport en materieel wordt ingeschat, wat bijvoorbeeld kan helpen bij het maken van keuzes over de energievoorziening op de bouwplaats.

- **Toevoegen van analyse-module van de resultaten**
Om de gebruiker zelf meer mogelijkheden te geven om de resultaten te presenteren/visualiseren kan de resultatenpagina of exportfunctie worden uitgebreid met functionaliteiten voor diepgaandere analyses.
- **Additionele emissiereducerende maatregelen toevoegen**
Meer opties voor emissiereductie toevoegen, bijvoorbeeld het gebruik van andere modaliteiten (zoals vervoer over water) en het gebruik van biobrandstoffen (met een uitbreiding van de scope naar ketenemissies).

Verbeteren bouwemissietool

- **Inschatting van het aantal en typen machines**
Voor woningbouw-laagbouw maakt de tool een inschatting van het aantal en type bouwtransporten op basis van de ingevulde gegevens door de gebruiker. Voor de machines wordt een dergelijke inschatting nog niet gemaakt. De gebruikersvriendelijkheid van de tool neemt toe als er ook een inschatting over de inzet van bouwmachines wordt gemaakt.
- **Nauwkeuriger meenemen van koudstartemissies**
De emissies van een start met koude motor verschillende van emissies met een warme motor. De inschatting van emissies kan nauwkeuriger worden gemaakt door koudstartemissies in meer detail mee te nemen.
- **Nauwkeuriger bepalen van de transporten die gemoeid gaan met het transport van machines van en naar de bouwplaats**
Op dit moment wordt verondersteld dat het transport van machines een vast aandeel is van het totaal aantal bouwtransporten. Door het aantal transporten van machines te koppelen aan het aantal en typen machines kan dit nauwkeuriger worden gemaakt.
- **Emissies van hulpfuncties van voertuigen toevoegen**
Sommige voertuigen voeren activiteiten op de bouwplaats uit, zoals een betonpomp. Deze emissies worden nu niet meegenomen. Er dient in kaart te worden gebracht om welke type voertuigen dit gaat (en welke op een aparte motor (non-road) draaien en welke op de hoofdmotor (wegtransport)) en hoeveel emissies er worden uitgestoten als gevolg van deze activiteiten op de bouwplaats.
- **Toevoegen machinetype-Stageklasse-combinaties**
Op dit moment ontbreken er combinaties van machinetypen en Stageklassen doordat deze niet in het EMMA-model voorkomen. Om deze toe te kunnen voegen, moeten de emissies per draaiuur worden benaderd op basis van de data die wel beschikbaar zijn in EMMA voor andere machinetypen-Stageklassen-combinaties.
- **Verbeteren achterliggende kengetallen**
Door meer praktijkdata te verzamelen over de inzet van bouwtransport en bouwmachines bij verschillende bouwprojecten en voor verschillende bouwmethodieken kunnen de achterliggende kengetallen in de tool nauwkeuriger worden gemaakt.
- **Analyseren gebruik van de tool door doelgroepen**
Feedback over de ervaringen met de tool ophalen bij de gebruikers/doelgroepen om beter te begrijpen wat ze anders zouden willen zien, wat er wel/niet werkt, wat er nog mist, etc., zodat verbeteringen gericht kunnen worden aangebracht.

Aansluiting met bestaande tools

Door de tool verder te automatiseren en te koppelen aan bestaande tools/software kan de kwaliteit van de input verhoogd worden en de gebruikersvriendelijkheid worden verbeterd. Dit kan onder andere door een gelijke structuur aan te houden en een directe verbinding te maken met applicaties, zoals bouwcalculators-/modellen (bijvoorbeeld DuboCalc en BIM) en de AERIUS Calculator. De output van bouwcalculators-/modellen kunnen in dat geval dienen als input voor de bouwemissietool. De output van de bouwemissietool kan bijvoorbeeld als input dienen voor de AERIUS Calculator, waarmee ook de stikstofdepositie kan worden berekend.

Referenties

- [1] ABF Research, „Primos-prognose 2023: Prognose van bevolking, huishoudens en woningbehoefte,” Delft, 2023.
- [2] TNO, „Vernieuwingsopgave infrastructuur | Landelijk prognoserapport 2023,” 2023.
- [3] C. Van den Thillart, „Consumentgerichte industrialisatie in de woningbouwsector,” Eburon, 2002.
- [4] TNO & Topsector Logistiek, „Outlook Bouwlogistiek: Scenario’s voor reductie van vervoersbewegingen en CO₂-uitstoot in de stad voor (grootschalige) nieuwbouwprojecten in 2030,” Topsector Logistiek, Delft, 2020.
- [5] TNO, „Control towers in de bouwlogistiek, een verkenning van ketenregie. TNO 2023 R10799,” TNO, Den Haag, 2023.
- [6] TNO, „Emissiefactoren wegverkeer 2023 TNO 2023 R11202,” 2023.
- [7] H. & Verbeek, „Emissiemodel Mobiele Machines gebaseerd op machineverkopen in combinatie met brandstof Afzet,” 2009.
- [8] „AERIUS, rekeninstrument voor de leefomgeving,” Rijksoverheid, [Online]. Available: <https://www.aerius.nl/>.
- [9] TNO, „AUB (AdBlue verbruik, Uren, en Brandstofverbruik): een robuuste schatting van NO_x en NH₃ uitstoot van mobiele werktuigen,” 2021.
- [10] TNO, „MaVe actie EMPK mobiele werktuigen,” 2021.
- [11] Thunderbuild, Futureproof Team, „4C in de bouw - SmartBulk,” 2022.
- [12] K. Kamar, Z. Hamid, M. Azman en M. Ahamad, „Industrialized Building System (IBS): Revisiting Issues of Definition and Classification,” *International Journal of Emerging Sciences - IJES*, vol. 1, pp. 120-132, 2011.

Ondertekening

TNO › Mobility & Built Environment › Den Haag, 16 februari 2024

Chantal Stroek
Research Manager

Annette Rondaij
Auteur

Bijlage A

Materiaaldichtheden

Tabel 4.1: Overzicht van materiaaldichtheden

Materiaalnaam	Bouwstroomtype	Materiaaldichtheid (kg/m ³)
Baksteen	3 RuwbouwLadingdragers	1700
Hout	3 RuwbouwLadingdragers	700
Kalkzandsteen	3 RuwbouwLadingdragers	1750
Vulpanelen van hout of asbest	3 RuwbouwLadingdragers	200
Polystyreen	3 RuwbouwLadingdragers	45
Stucwerk	5 Afbouw	881
HSB (hybride)	3 RuwbouwLadingdragers	200
Keramisch	3 RuwbouwLadingdragers	2500
Beton	1 Beton	2100
Glaswol	3 RuwbouwLadingdragers	20
Enkelglas	3 RuwbouwLadingdragers	2500
Dubbelglas	3 RuwbouwLadingdragers	2500
HR-glas	3 RuwbouwLadingdragers	2500
RVS	3 RuwbouwLadingdragers	8050
Schelpkalkmortel	3 RuwbouwLadingdragers	1600
Gipsplaat	3 RuwbouwLadingdragers	1000
Gasbeton	3 RuwbouwLadingdragers	580
Zink	5 Afbouw	7150
PVC	5 Afbouw	1400
Koper	5 Afbouw	7800
Kunststof	5 Afbouw	1400
ZOAB	4 Bulk	2150
Triplex	5 Afbouw	700
Betonpuin	6 Afval	1800
Metselwerkpuin	6 Afval	1800
Asfaltpuin	6 Afval	1800
Mengpuin	6 Afval	1800
Zinkrecycling	6 Afval	7150
Gipshoudend materiaal	6 Afval	1150
RVS-recycling	6 Afval	8050
A-hout (onbehandeld)	6 Afval	700

B-hout (behandeld)	6 Afval	700
C-hout (geïmpregneerd)	6 Afval	700
Non-ferromagnetische metalen	6 Afval	8050
Ferromagnetische metalen	6 Afval	8050
Glasrecycling	6 Afval	2500
Tapijtafval	6 Afval	133
Kunststoffenverwerking	6 Afval	1400
Isolatiemateriaalafval	6 Afval	125
Dakbedekkingsmateriaal bitumineus	6 Afval	1500
Plafondplatenafval	6 Afval	300
Asbesthoudend afval	6 Afval	1500
Gemengd bouw- en sloopafval	6 Afval	1800
Multiplex	5 Afbouw	700
Bitumineuze laag	3 RuwbouwLadingdragers	1500
Grind	4 Bulk	1500
Gewapend beton	2 RuwbouwGroot	2400
Aluminium	5 Afbouw	2800
Plafondplaat	5 Afbouw	300
Rubber	5 Afbouw	1400
AC Base	4 Bulk	2400
AC Surf	4 Bulk	2400
Klinkers (rood)	3 RuwbouwLadingdragers	1500
Menggranulaat	6 Afval	1800
Menggranulaat of licht gebonden fundering	6 Afval	1800
Zand	4 Bulk	1500
Zandcement	4 Bulk	1900
Stoeptegels (beton)	3 RuwbouwLadingdragers	2300
Groenbedekking	3 RuwbouwLadingdragers	222
GFT	6 Afval	222
Betonklinkers	3 RuwbouwLadingdragers	2300
Natuursteen	3 RuwbouwLadingdragers	2500
Sandwichpanelen	3 RuwbouwLadingdragers	200
Trespa	3 RuwbouwLadingdragers	1350
Isolatiemateriaal	3 RuwbouwLadingdragers	120
Tapijt	5 Afbouw	133
Steenwolplaten	3 RuwbouwLadingdragers	125
Koperrecycling	6 Afval	8050
Aluminiumrecycling	6 Afval	8050
Staalrecycling (niet roestvrij)	6 Afval	8050

Staal	2 RuwbouwGroot	8050
Betonasfalt	4 Bulk	2400
PV-monokristallijn	5 Afbouw	1500
PV polykristallijn	5 Afbouw	1500
Elektronica (voor regeleenheden)	5 Afbouw	800
Elektronisch afval (ook PV)	5 Afbouw	800
Beton prefab	2 RuwbouwGroot	2100
Afbouw	5 Afbouw	1951
Afval	6 Afval	2962
Materieel	7 Materieel	8050
Wapening (staal uit gewapend beton)	2 RuwbouwGroot	8085
Kanaalplaatvloer (prefabbeton)	2 RuwbouwGroot	1540
Breedplaatvloer (prefabbeton)	2 RuwbouwGroot	2400
CLT-vloer (hout)	2 RuwbouwGroot	470
CLT-wand (hout)	2 RuwbouwGroot	470
Prefab wand (beton)	8 RuwbouwGroot-Dieplader	2400
Ribcassettevloer	2 RuwbouwGroot	548
Steenstrips (mineraal)	3 RuwbouwLadingdragers	470
Kozijnen (inclusief glas)	3 RuwbouwLadingdragers	282,5
HSB-gevel (hybride)	3 RuwbouwLadingdragers	183,8
Sandwichpaneel gevel beton (hybride)	2 RuwbouwGroot	1308
Sandwichpaneel gevel met isolatie (hybride)	2 RuwbouwGroot	105
Houten gevelbekleding	3 RuwbouwLadingdragers	700
HSB-gevel (2D)	3 RuwbouwLadingdragers	217,5
Sandwichpaneel gevel beton (2D)	2 RuwbouwGroot	112,3
Sandwichpaneel gevel met isolatie (2D)	2 RuwbouwGroot	149,9
Sandwichpaneel dak met isolatie	2 RuwbouwGroot	105
Dakdoos scharnierkap (hout)	9 RuwbouwGroot-Vracht-auto combi	122,2
Dakpannen (keramisch)	3 RuwbouwLadingdragers	2500
HSB-wand (hout)	2 RuwbouwGroot	250
HSB-vloer (hout)	2 RuwbouwGroot	250

Bijlage B

Uitgangspunten voor inschatting transporten

Tabel 4.2: Voertuigverdeling per bouwstroomtype

	Bestelauto	Vrachtauto Licht	Vrachtauto Middelgroot	Vrachtauto Groot	Trekker-oplegger	Betonmixer	Combinatie vrachtwagen-aanhangwagen	Dieplader	Kipper
Beton	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%
RuwbouwGroot	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%
RuwbouwLadingdragers	0%	0%	0%	50%	50%	0%	0%	0%	0%
Bulk	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
Afbouw	10%	30%	30%	20%	10%	0%	0%	0%	0%
Afval	0%	0%	0%	50%	50%	0%	0%	0%	0%
Materieel	0%	0%	10%	40%	50%	0%	0%	0%	0%
RuwbouwGroot-Dieplader	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%
Ruwbouw-Vrachtauto-combi	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%
Convoi Exceptionnel	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%
Afbouwpakket - A installaties	10%	30%	30%	20%	10%	0%	0%	0%	0%
Afbouwpakket - B binnenwanden met afwerking	0%	0%	0%	50%	50%	0%	0%	0%	0%
Afbouwpakket - C dekvloeren met afwerking	0%	0%	0%	20%	0%	80%	0%	0%	0%
Afbouwpakket - D sanitair en keukens	10%	30%	30%	20%	10%	0%	0%	0%	0%
Afbouwpakket - E trappen	0%	0%	20%	80%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabel 4.3: Laadvermogens en beladingsgraden per voertuigtype.

Voertuigtype	Laadvermogen (ton)	Laadvermogen (m ³)	Laadvermogen (m ²)	Beladingsgraad					
				Van leverancier naar bouwplaats		Van leverancier naar de bouwhub		Van de bouwhub naar de bouwplaats	
				m ²	kg	m ²	kg	m ²	kg
Bestelauto	1	12	6	50%	50%	90%	90%	75%	75%
Vrachtauto licht	5	30	12	50%	50%	90%	90%	75%	75%
Vrachtauto midden	10	40	16	50%	50%	90%	90%	75%	75%
Vrachtauto groot	15	64	24	50%	50%	90%	90%	75%	75%
Trekker-oplegger	32	103	34	50%	50%	90%	90%	75%	75%
Betonmixer	30	13	13	80%	90%	80%	90%	80%	90%
Dieplader	32	140	34	80%	80%	80%	80%	80%	80%
Combinatie vrachtwagen - aanhangwagen	30	120	40	80%	80%	80%	80%	80%	80%
Kipper	30	13	13	80%	90%	80%	90%	80%	90%

Tabel 4.4: Overzicht van het aandeel materialen dat rechtstreeks van de leverancier naar de bouwplaats gaat of via de bouwhub. Dit is per bouwstroomtype weergegeven voor het traditionele scenario (scenario zonder toepassing van bouwhub) en een scenario met een bouwhub.

Bouwstroomtype	Traditioneel scenario		Hubscenario	
	Rechtstreeks	Via hub	Rechtstreeks	Via hub
Beton	100%	0%	100%	0%
RuwbouwGroot	100%	0%	75%	25%
RuwbouwLadingdragers	100%	0%	50%	50%
Bulk	100%	0%	100%	0%
Afbouw	100%	0%	20%	80%
Afval	100%	0%	50%	50%
Materieel	100%	0%	100%	0%
RuwbouwGroot-Dieplader	100%	0%	100%	0%
Ruwbouw-Vrachtauto-combi	100%	0%	100%	0%
Convoi Exceptionnel	100%	0%	100%	0%
Afbouwpakket - A installaties	100%	0%	20%	80%
Afbouwpakket - B binnenwanden met afwerking	100%	0%	20%	80%
Afbouwpakket - C dekvloeren met afwerking	100%	0%	20%	80%
Afbouwpakket - D sanitair en keukens	100%	0%	20%	80%
Afbouwpakket - E trappen	100%	0%	20%	80%

Mobility & Built Environment

Anna van Buerenplein 1
2595 DA Den Haag
www.tno.nl