Handleiding voor het berekenen van de NOx-uitstoot door mobiele werktuigen

TNO Publiek ⟩ TNO 2026 R10854
18 mei 2026

Mobility & Built Environment
www.tno.nl
+31 88 866 00 00
info@tno.nl

TNO 2026 R10854 – 18 mei 2026

Handleiding voor het berekenen van de NOx-uitstoot door mobiele werktuigen

Auteurs	Pim van Mensch, Thijs Oosterbeek
Exemplaar nummer	2026-STL-RAP-100360928
Aantal pagina's	39 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	2
Opdrachtgever	Topsector Logistiek
Projectnaam	Connekt – NOx-emisies mob. werktuigen
Projectnummer	060.63965

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.

© 2026 TNO

Samenvatting

Deze handleiding beschrijft de verschillende (reken)methoden om de NO_x-uitstoot van dieselaangedreven mobiele werktuigen (zoals graafmachines) te bepalen, afhankelijk van de beschikbare invoergegevens. Door de stikstofproblematiek in Nederland is een nauwkeurige bepaling van emissies tijdens bouwactiviteiten essentieel voor vergunningverlening en het voldoen aan eventuele eisen van opdrachtgevers. De focus ligt volledig op NO_x-emissies door dieselmotoren, omdat deze in de bouwsector veruit de grootste bron van NO_x-emissies vormen.

De emissieprestaties van machines worden in belangrijke mate bepaald door de Europese Stage-normen (I t/m V). Deze stellen eisen aan de maximale uitstoot van (onder andere) NO_x. De bepaling van de exacte emissieklasse is essentieel voor rekenmethodieken. Deze kan het best worden vastgesteld aan de hand van het motorplaatje. De bepaling kan ook op een indirecte manier via het bouwjaar en het motorvermogen. Daarbij kunnen echter door overgangsregelingen onnauwkeurigheden ontstaan.

De handleiding onderscheidt een reeks rekenmethodieken, inclusief een beoordeling van de nauwkeurigheid. De methodieken zijn allemaal vergeleken en geüpdatet op basis van een grootschalig meetprogramma uitgevoerd door Topsector Logistiek, in samenwerking met TNO. Hiervoor zijn 89 machines gebruikt (waaronder ook TNO-metingen), die minimaal 30 uur zijn gemeten.

De meest nauwkeurige methoden zijn rechtstreeks gebaseerd op emissiemetingen, waarbij NO_x-concentraties worden gemeten met een sensor in de uitlaat. De methode met een aanvullende MAF-sensor (die de uitlaatmassastroom bepaalt) levert de meest gedetailleerde en betrouwbare emissieberekeningen op. Als dit niet mogelijk is, kan uitlaatstroom ook bepaald worden op basis van een 1 Hz brandstofsignaal. Wanneer de massastroom niet gemeten of bepaald kan worden, kan een eenvoudiger benadering worden gemaakt. Dit kan op basis van de NO_x/CO_2-verhouding die dezelfde sensor levert. Deze NO_x/CO_2 methode is momenteel vaak minder nauwkeurig dan de indirecte rekenmethodieken (zie volgende alinea). Een uitzondering daarop zijn machines met een defecte SCR-katalysator[1]. Hierbij kunnen buitenproportioneel hoge NO_x-emissies ontstaan. Deze verhoogde emissies kunnen goed gedetecteerd worden op basis van de NO_x/CO_2-verhouding (of een andere methode met NO_x-sensor in de uitlaat).

Wanneer geen directe NO_x-metingen beschikbaar zijn, kunnen (op een lager detailniveau) indirecte methoden worden toegepast om de NO_x-emissies te voorspellen. De benodigde gegevens voor de indirecte methoden kunnen op verschillende nauwkeurigheidsniveaus bepaald worden. Dit kan bijvoorbeeld door monitoring of een meer eenvoudige vorm van registratie.

De onzekerheid op basis van rekenmethodieken ten opzichte van metingen is het grootst bij machines met een SCR-katalysator (katalysator voor NO_x-reductie).

[1] Een SCR-katalysator wordt met name toegepast op Stage IV en V machines met een motorvermogen tussen de 56 en 560 kW, dit vanwege de strenge emissie-eisen voor deze categorieën. In de rekenmethodieken worden deze machines ook wel aangeduid als “categorie D” machines.

Een goede of minder goede werking van de SCR-katalysator heeft namelijk een grote invloed op de daadwerkelijke emissies. De meest nauwkeurige rekenmethodieken maken gebruik van input die rekening houdt met de theoretische werking van de SCR-katalysator.

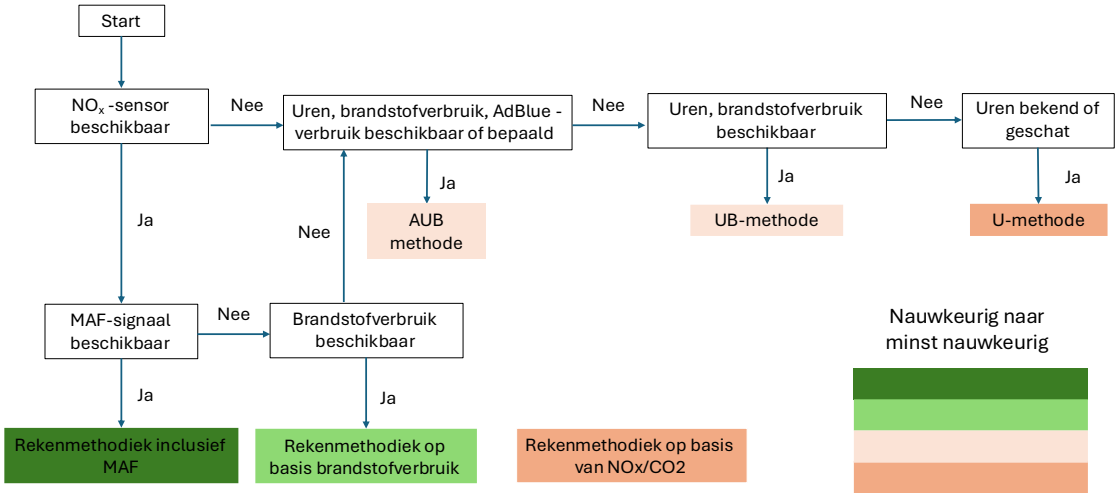
De AUB-methode (AdBlue, Uren, Brandstof) is hierbij de meest nauwkeurige indirecte methode, mits het AdBlue-verbruik betrouwbaar bekend is voor machines met een SCR-katalysator. Deze methode vormt de basis van AERIUS-berekeningen.
Het AdBlue-verbruik geeft een directe indicatie van de SCR-werking en daarmee NO_x-reductie. In de praktijk is het AdBlue-verbruik bij AERIUS-gebruikers echter vaak niet bekend omdat deze meestal niet structureel wordt bijgehouden. Hierdoor wordt er regelmatig gerekend met standaardpercentages (bijvoorbeeld 6% of 7% van het brandstofverbruik), wat een aanzienlijke onzekerheid introduceert. De handleiding geeft daarom een nieuwe aanvullende optie, naast de mogelijkheid van het bijhouden van het AdBlue-verbruik.
Bij deze methode wordt het AdBlue-verbruik ingeschat via de belastingsgraad van de motor. Een hogere belastingsgraad zorgt er in het algemeen voor dat het AdBlue-verbruik hoger is en SCR-katalysator goed werkt, met lage NO_x-emissies tot gevolg. De belastingsgraad kan berekend worden uit het gemiddelde brandstofverbruik, het bouwjaar en het maximale motorvermogen.

Daarnaast is een UB-methode (Uren en Brandstof) voor machines met een SCR-katalysator ontwikkeld. Dit is een eenvoudig alternatief voor de AUB-methode. De AUB-methode voor machines zonder SCR-katalysator is feitelijk al een UB-methode, aangezien er voor machines zonder SCR-katalysator geen AdBlue benodigd is.

Tot slot is op basis van de nieuwe data de zogenaamde U-methode geüpdatet. De U-methode maakt alleen gebruik van draaiuren en vormt daarmee de meest eenvoudige methode. De U-methode is alleen bedoeld als de andere data ontbreken. De nauwkeurigheid is beperkter dan de (A)UB-methode doordat de motorbelasting niet kan worden meegenomen in de U-methode. De U-methode is echter wel nauwkeuriger dan de UB en AUB-methode als het brandstofverbruik niet beschikbaar is vanuit monitoring of registraties.

Op basis van het grote aantal nieuwe praktijkmetingen zijn de diverse methodieken geëvalueerd. Hieruit blijkt onder meer dat zowel de AUB-methode met een aangenomen AdBlue-percentage van 6% als de huidige U-methode de NO_x-emissies gemiddeld overschatten. De AUB-methode met 7% AdBlue onderschat daarentegen de uitstoot gemiddeld. Ook voor diverse machinecategorieën zonder SCR-katalysator zijn de (A)UB- en U-methoden geüpdatet. De geüpdatete methodieken liggen dichter bij de gemeten NO_x-waarden uit de praktijk.

De handleiding bevat een beslisboom die helpt bepalen welke methode het meest geschikt is, afhankelijk van de beschikbare invoergegevens. De invoergegevens betreffen data zoals signalen uit NO_x- en MAF-sensoren, het brandstofverbruik en het AdBlue-verbruik.



Hoe meer informatie beschikbaar is, hoe nauwkeuriger de berekening. De studie concludeert dat een directe meting het meest betrouwbaar blijft. Daarnaast is de AUB-methode een robuuste indirecte methode, mits de AdBlue-data juist bepaald kunnen worden. Tot slot zijn nieuwe methoden, zoals de UB-methode en bijgestelde U-methode, goede toevoegingen als er minder data beschikbaar zijn. De toename aan praktijkdata maakt het bovendien mogelijk om rekenregels verder te verbeteren en nauwkeuriger af te stemmen op daadwerkelijke emissies van moderne bouwmachines.

Momenteel loopt het grootschalige meetprogramma vanuit Topsector Logistiek nog door, waarmee nog veel extra data verzameld wordt, mogelijk wel twee tot drie keer meer data dan nu gebruikt. Het wordt aanbevolen dat de methodieken worden vergeleken met de uitkomsten wanneer er minimaal een half jaar aan emissiedata verzameld is.

Inhoudsopgave

Samenvatting 3
1 Inleiding 7
2 Overzicht en gebruik van verschillende methodieken 9
3 Vertaling van NO_x-metingen naar totale uitstoot 18
3.1 NO_x-meting rekenmethodiek inclusief MAF 19
3.2 NO_x-metingrekenmethodiek op basis van brandstofverbruik 21
3.3 NO_x-metingrekenmethodiek op basis van NO_x/CO_2 21
4 AUB-methode 23
4.1 Bepaling van het AdBlue-verbruik op basis van belastingsgraad 24
5 UB-methode 27
6 U-methode 29
7 Vergelijking uitkomsten van rekenmethodieken en nieuwe inzichten 31
7.1 Categorie D 31
7.2 Categorie A 33
7.3 Categorie B 33
8 Conclusies 35
Referenties 36
Ondertekening 37

Bijlagen
Bijlage A: Uitleg formules rekenmethode 1 38
Bijlage B: Root mean squared error UB-methode voor categorie B machines 39

1 Inleiding

Nederland staat voor een grote uitdaging als het gaat om het beheersen van stikstofemissies. Bouwprojecten behelzen activiteiten waarbij (onder andere) stikstofemissies worden uitgestoten. Deze stikstofemissies tijdens bouwactiviteiten ontstaan door mobiele werktuigen (zoals graafmachines, walsen, laadschoppen, bronbemalingspompen en stroomaggregaten) en andere voertuigen met een verbrandingsmotor (zoals vrachtwagens en bestelwagens), met name in vorm van stikstofoxiden (NO_x). Met de huidige stikstofcrisis is het van groot belang voor bouwbedrijven en aannemers om goed te kunnen bepalen hoeveel stikstof uitgestoten wordt binnen het bouwproject. Een hoge uitstoot kan gevolgen hebben voor de mogelijkheid om vergunningen aan te vragen. Ook zijn er bepaalde klanten, waaronder de publieke opdrachtgevers, die de emissies binnen een project willen minimaliseren. Om de emissies te bepalen zijn er verschillende rekenmethodieken ontwikkeld. De methoden kunnen zowel worden toegepast om de emissies gedurende een project te bepalen als om deze voorafgaand aan een project te voorspellen. In dat laatste geval dient gebruik gemaakt te worden van historische gegevens.

In opdracht van Topsector Logistiek heeft TNO een handleiding opgesteld waarin de verschillende methoden van emissiebepaling voor NO_x-emissies van mobiele werktuigen – afhankelijk van de beschikbare data - uiteen worden gezet, inclusief de verwachte nauwkeurigheid. In dit rapport worden alleen rekenmethodieken aangehaald voor diesel-aangedreven machines, aangezien de bouwmachines met de grootste emissiebijdrage een dieselmotor hebben. De focus in deze studie is mobiele werktuigen, niet het wegvervoer of andere modaliteiten. In 2023 heeft TNO in opdracht van Topsector Logistiek verschillende niveaus voor NO_x-voorspellingen voor bouwlogistiek gerapporteerd.[2]

Doel

De handleiding dient partijen in de bouwsector inzicht te bieden in de verschillende methodieken van emissiebepaling en de verschillen in nauwkeurigheid van de uitkomsten. Het doel is hen te helpen een weloverwogen keuze te maken over de manier waarop zij emissies willen of kunnen bepalen.

Deze studie is daarom gericht op de onderstaande onderwerpen:

- Huidige rekenmethodieken bundelen;
- Handleiding bieden voor welke methode wanneer gebruikt kan worden;
- Accuraatheid van de methoden te duiden;
- Na feedback uit de klankbordgroep de optie voor een nieuwe methode te verkennen.

Aanpak

Dit rapport is bedoeld als gids langs de verschillende methodieken. Voor deze studie zijn daarom de huidige rekenmethodieken om NO_x-emissies van bouwmachines te berekenen gebundeld. Verder is er contact geweest met een klankbordgroep om te inventariseren tot in welke mate de benodigde invoerparameters aanwezig zijn of dat er nog aanvullende rekenopties nodig zouden zijn.

[2] TNO 2023 R11201v2: Handleiding bepaling milieu-impact bouwlogistieke activiteiten

Op basis van deze input is verder gekeken naar de mogelijkheden om toevoeging te doen aan de huidige methodieken. Voor elke methodiek is vervolgens een uitleg beschreven hoe een methodiek toegepast kan worden en welke methode gebruikt dient te worden op basis van beschikbare data. Daarnaast wordt ingegaan op de nauwkeurigheid per methode en de voor- en nadelen. Aan de hand van rekenvoorbeelden wordt getoond hoe de berekening gedaan wordt.

Sinds de ontwikkeling van de huidige rekenmethodieken zijn er aanzienlijk meer praktijkmetingen aan bouwmachines beschikbaar gekomen. Zowel vanuit TNO, als vanuit een gezamenlijk project tussen Topsector Logistiek en TNO. Dit geeft de mogelijkheid om de accuraatheid van de huidige rekenmethodieken verder te onderzoeken en waar nodig de methodieken bij te stellen. Deze inzichten worden ook gedeeld in deze rapportage.

Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt een overzicht van de diverse rekenmethodieken gegeven. Ook wordt aangegeven welke methode op welk moment geschikt is om te gebruiken.

Hoofdstuk 3, 4, 5 en 6 gaan dieper in op elke specifieke rekenmethodiek.
Elke rekenmethodiek wordt geïntroduceerd, de berekening wordt uitgelegd en een voorbeeldberekening wordt geleverd.

Hoofdstuk 7 geeft een vergelijking tussen de verschillende rekenmethodieken. Tot slot volgen in Hoofdstuk 8 de belangrijkste conclusies.

2 Overzicht en gebruik van verschillende methodieken

In dit hoofdstuk wordt eerst een korte toelichting gegeven van de emissiewetgeving voor mobiele machines. Vervolgens worden handvatten aangereikt om de emissieklasse van mobiele werktuigen te bepalen. Deze emissiewetgeving en de wijze van classificatie zijn relevant omdat ze als basis dienen voor de toegepaste rekenmethodieken. Daarna volgt een beknopt overzicht van de verschillende rekenmethodieken. Het hoofdstuk sluit af met een beslisboom die helpt te bepalen welke methodiek het meest geschikt is, afhankelijk van de beschikbare data.

2.1 Emissiewetgeving mobiele machines

De emissiewetgeving voor mobiele werktuigen is gebaseerd op verschillende motorcategorieën (op basis van motorvermogen). Hierdoor is er per emissieklasse (“fasenormen”, of in het Engels “Stage-normen”) een grote range in emissieprestaties, dit geldt ook voor de meest recente emissieklasse (Stage V). Praktijkemissies kunnen sterk afwijken van emissies volgens de wettelijke norm. Dit is met name het geval wanneer in de praktijk de inzetprofielen sterk afwijken van de testcyclus uit de emissiewetgeving (bijvoorbeeld veel stationair draaien). De rekenmethodieken zijn daarom per emissie- en vermogensklasse gebaseerd op praktijkdata, en niet op wettelijke limietwaarden. Echter, om een beeld te schetsen van verschillende categorieën en bijbehorende emissielimieten is in de onderstaande paragraaf een korte toelichting van emissiewetgeving voor mobiele machines gegeven.

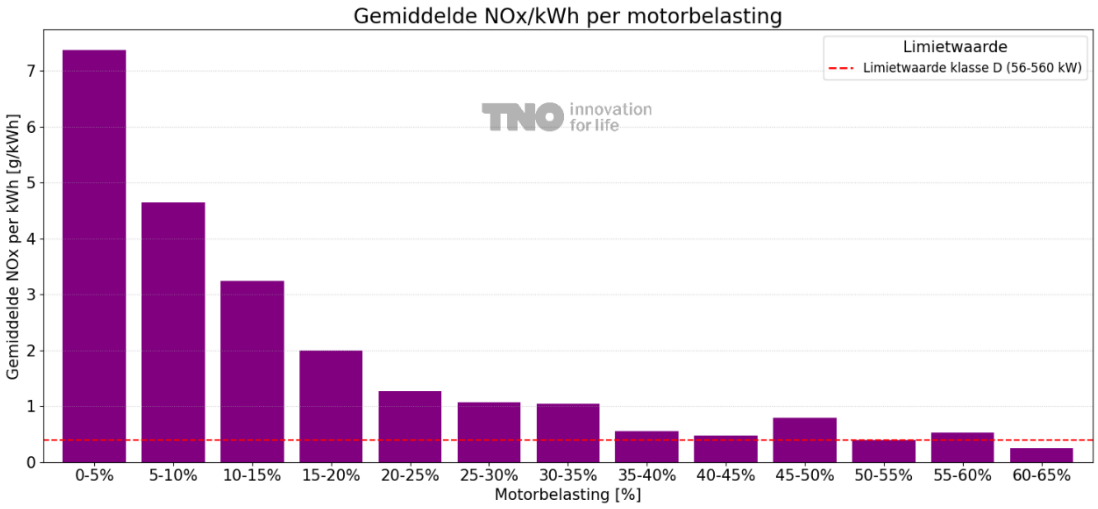
De emissienormen voor niet voor de weg bestemde mobiele machines (Non-Road Mobile Machinery) zijn volgens Europese wetgeving opgedeeld in 6 fasenormen of ‘Stages’: Stage I, II, III A, III B, IV en V. Globaal valt de wetgeving voor Stage I t/m Stage IV onder de Richtlijn 97/68/EG (en alle opvolgende aanvullende documenten) die op 16 december 1997 is geïntroduceerd en van kracht was tot 31 december 2016. Stage V-wetgeving is beschreven in Verordening (EU) 2016/1628 (en alle opvolgende aanvullende documenten) en is momenteel van kracht.

Elke fasenorm is opgedeeld in verschillende subcategorieën of vermogensklassen. In de onderstaande Tabel 2.1 staan de emissielimieten voor NO_x en fijnstof van de verschillende fasenormen en vermogensklassen samengevat. Een Selectieve Katalytische Reductie (SCR) katalysator is nodig bij 0.4 g/kWh NO_x-uitstoot en een roetfilter is noodzakelijk als er 0.015/PN (eis voor fijnstof in emissiewetgeving) staat. Een goed werkende SCR reduceert de NO_x-uitstoot effectief vanaf een bepaalde temperatuur. Bij een SCR wordt AdBlue gebruikt om stikstofoxides om te zetten naar elementair stikstof en water. Voor minder strenge emissielimieten is een SCR niet nodig maar kan een aangepaste inspuiting of uitlaatgasrecirculatie (EGR) al voor voldoende NO_x-reductie zorgen. EGR kan ook in combinatie met een SCR worden toegepast.

Voor machines met een motorvermogen onder de 56 kW en boven de 560 kW zijn er daarom geen dieselmotoren beschikbaar met een lage NO_x-uitstoot (omdat de emissielimiet niet streng is en er daardoor geen SCR-katalysator wordt toegepast). De Stage IV en Stage V eisen voor NO_x (limiet 0,4 g/kWh) voor machines met vermogens tussen de 56 en 560 kW zijn een factor tien tot twintig lager dan eerdere eisen en eisen aan andere machinecategorieën. Bij deze moderne motoren (met een SCR-katalysator) is er een risico op verhoogde NO_x-emissies bij een lage motorbelasting (zoals stationair draaien). Dit is onder andere beschreven in het TNO-rapport met referentie TNO 2025 R10466: "*Real-world NOx-emissions from various Non-Road Mobile Machinery and vehicles*". Ook is dit geïllustreerd in Figuur 2.1 hieronder. Bij lage motorlast is de temperatuur van het uitlaatgas doorgaans laag waardoor de SCR minder effectief is. Met de huidige regelgeving omtrent NO_x-uitstoot door bouwmachines is het van belang om de NO_x-uitstoot zo accuraat mogelijk te bepalen. Voor de bepaling van NO_x-uitstoot van diesel aangedreven bouwmachines zijn er verschillende methodes mogelijk. De methodieken verschillen in accuraatheid.

Tabel 2.1: Wettelijke limieten voor de verschillende Stages- en vermogensklassen, waarbij de bovenste tabel de limieten voor fijnstof bevat en het onderste deel de limieten voor NO_x. De toevoeging van "PN'" staat voor Particle Number, dat betekent dat er ook een deeltjesaantallen-eis is opgenomen, hiermee wordt een roetfilter afgedwongen.

Vermogen [kW]	<19	19-37	37-56	56-75	75-130	130-560	>560
PM [g/kWh]							
V (2019)	0.4	0.015/PN	0.015/PN	0.015/PN	0.015/PN	0.015/PN	0.045
IV (2014)	-	-	-	0.025	0.025	0.025	-
IIIB (2011)	-	-	0.025	0.025	0.025	0.025	-
IIIA (2006)	-	0.6	0.4	0.4	0.3	0.2	-
II (2002)	-	0.8	0.4	0.4	0.3	0.2	-
I (1999)	-	-	0.85	0.85	0.7	0.54	-
NO_x [g/kWh]							
V (2019)	7.5	4.7	4.7	0.4	0.4	0.4	3.5
IV (2014)	-	-	-	0.4	0.4	0.4	-
IIIB (2011)	-	-	4.7	3.3	3.3	2.0	-
IIIA (2006)	-	7.5	4.7	4.7	4.0	4.0	-
II (2002)	-	8.0	7.0	7.0	6.0	6.0	-
I (1999)	-	-	9.2	9.2	9.2	9.2	-



Figuur 2.1: NO_x-uitstoot per energieverbruik onder verschillende motorbelastingen Stage IV en Stage V (56-560 kW).

2.2 Bepaling van emissieklasse

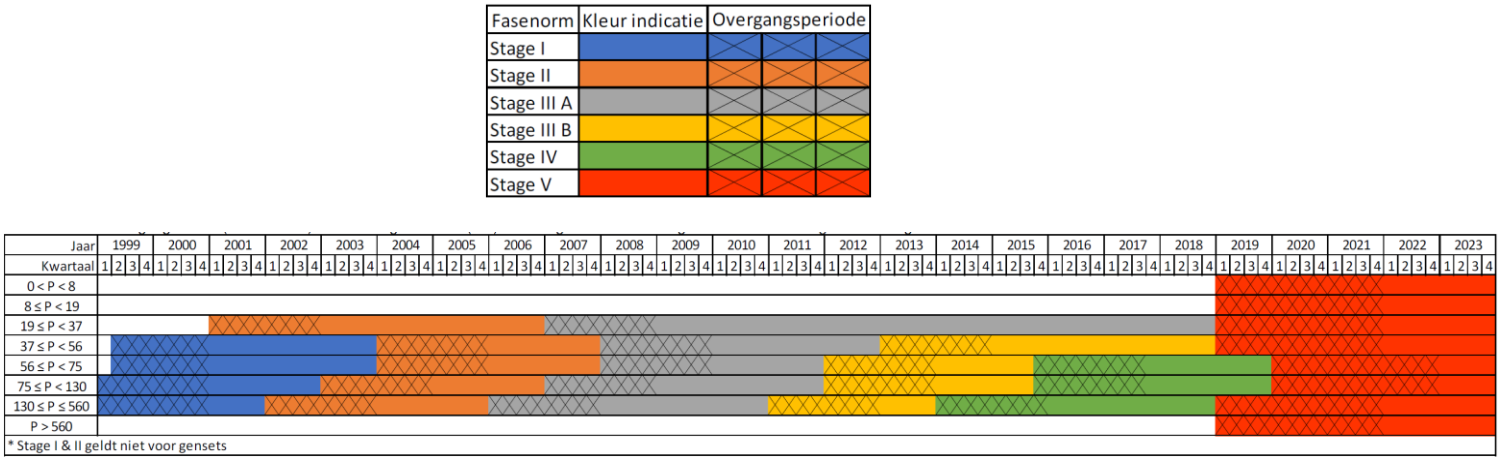
Voor de indirecte rekenmethodes (waarbij de NO_x-emissies niet direct gemeten wordt in de uitlaat) is het essentieel om te weten welke emissieklasse een machine heeft. De emissieklasse van een mobiel werktuig kan op verschillende manieren worden vastgesteld. Afhankelijk van de gekozen methode kan met meer of minder zekerheid worden bepaald onder welke fasenorm de machine op de markt is gebracht.

De meest directe manier om de fasenorm van een mobiel werktuig te achterhalen, is het aflezen van het typeplaatje op de motor. Op dit plaatje staat het typegoedkeuringsnummer of typegoedkeuringsmerk vermeld. Hieruit kan direct worden afgeleid welke fasenorm en subcategorie van toepassing is. Uit het nummer of merk kan niet alleen de fasenorm worden afgeleid, maar ook de bijbehorende vermogensklasse binnen die fasenorm.

Het typeplaatje bevindt zich doorgaans in de motorruimte, waardoor het niet altijd gemakkelijk toegankelijk is. Dit geldt bijvoorbeeld voor nieuwe machines met een krappe motorruimte, maar ook voor oudere machines waarbij het plaatje onleesbaar, onvolledig of zelfs volledig verdwenen is.

Een meer indirecte manier om emissieklasse te bepalen is via informatie omtrent het bouwjaar, motorvermogen en type brandstof. Het type brandstof zal doorgaans bekend zijn. Het motorvermogen en het bouwjaar zijn meestal te vinden op het typeplaatje van de machine (wat verschilt van het typeplaatje van de motor). Het is niet verplicht om het motorvermogen op het machineplaatje te vermelden, maar dat is in de praktijk vaak wel het geval. Indien de benodigde gegevens niet beschikbaar zijn, wordt aanbevolen om de benodigde gegevens op te vragen bij de machine-leverancier. De indirecte methode om de emissieklasse van een mobiel werktuig te bepalen is minder robuust dan de directe methode. Dit komt doordat diverse uitzonderingsregelingen niet worden herkend wanneer deze indirecte benadering wordt gebruikt. De meest voorkomende uitzondering in de praktijk is de overgangsregeling bij de invoering van een nieuwe emissieklasse. Tijdens zo'n overgangsperiode kunnen zowel machines met de oude als met de nieuwe emissieklasse op de markt worden gebracht.

Onderstaande Figuur 2.2 toont de ingangsdata (in de handel) van de verschillende emissienormen, inclusief een indicatie van de bijbehorende overgangsperioden. Deze kan toegepast worden om de emissieklasse te bepalen. In sommige gevallen beslaat zo'n overgangsperiode (meer dan) de helft van de totale looptijd van een fasenorm. Hierdoor kan in de praktijk de emissieklasse van een mobiel werktuig te gunstig worden ingeschat. Tot in welke mate de overgangsregelingen worden/zijn toegepast is niet exact bekend.



Figuur 2.2: Overzicht ingangsdatum (in de handel) naar vermogensklasse (kW) voor Stage I t/m IV en Stage V subcategorieën NRE & NRG CI-motoren met variabel toerental.

2.3 Korte toelichting en overzicht van verschillende rekenmethodieken

Momenteel zijn er diverse mogelijkheden om emissies van mobiele werktuigen in kaart te brengen. De mogelijkheden zijn afhankelijk van de beschikbare data alsook van de verschillende methoden van dataverzameling. Deze handleiding bundelt de verschillende methodieken om NO_x-uitstoot te berekenen. In het algemeen geldt: hoe minder informatie er beschikbaar is hoe meer het op berekende gemiddeldes berust. Hieronder wordt een beknopt overzicht gegeven van de rekenmethodieken, waarna deze in de komende hoofdstukken in meer detail worden toegelicht.

2.3.1 Directe NO_x-bepaling middels metingen in de uitlaat

De rekenmethodiek met het hoogste detailniveau is door emissiemonitoring toe te passen met een NO_x-sensor in de uitlaat, inclusief een bepaling van de uitlaatgasstroom. Hiermee worden de emissies in de praktijk bepaald onder diverse omstandigheden.
De uitlaatgasstroom is nodig om de NO_x-concentratie, gemeten door de NO_x-sensor, te vertalen naar NO_x-uitstoot in gewicht. Het komt er op neer dat de NO_x-sensor bepaalt welk percentage van het uitlaatgas NO_x-deeltjes zijn. Om te weten hoeveel grammen NO_x dit zijn, is een meting of inschatting nodig van de uitlaatgasstroom. Voor deze monitoringsmethodiek is de plaatsing van een NO_x-sensor nodig, en daarmee een aanpassing aan de machine.
De uitlaatgasstroom kan bepaald worden middels een geïnstalleerde MAF-sensor (Mass Air Flow), een MAF-signaal via de CAN-bus of via het brandstofverbruik uit de CAN-bus of geïnstalleerde brandstofmeter.

Een detailniveau lager is emissiemonitoring met alleen een NO_x-sensor (zonder bepaling uitlaatgasflow). Hierbij is alleen een plaatsing van de NO_x-sensor nodig, er is geen instrumentatie voor bepaling van MAF of brandstof nodig. De NO_x-bepaling gebeurt op basis van de NO_x/CO_2 ratio. De NO_x-sensor meet ook O_2-concentraties, waarmee de CO_2-concentratie van het uitlaatgas kan worden bepaald. De CO_2-concentraties zijn een maat voor motorbelasting (een hogere CO_2-concentratie betekent doorgaans een hogere motorbelasting). De rekenmethodiek is zeer eenvoudig doordat alleen de NO_x-concentraties gedeeld worden door de CO_2-concentraties en er geen aanvullende signalen nodig zijn. De NO_x/CO_2 ratio laat duidelijk het onderscheid in emissieniveaus zien, de mate van functioneren van de SCR-katalysator en de emissies bij uiteenlopende motorbelastingen. In TNO-rapport "*TNO 2025 R11083 - Ontwikkeling van meetmethoden voor emissietesten en NO_x-monitoring bij mobiele werktuigen*" geeft paragraaf 5.4 meer achtergrond voor deze methode.

Deze NO_x/CO_2 methode is vaak minder nauwkeurig dan de indirecte rekenmethodieken (zie Hoofdstuk 7). Een verdere uitwerking van deze methode is nodig om te verkennen of deze accurater kan worden. Een uitzondering daarop zijn machines met een defecte SCR-katalysator waardoor buitenproportioneel hoge NO_x-emissies ontstaan, deze kunnen goed gedetecteerd worden op basis van de NO_x/CO_2-verhouding (of een andere methode met NO_x-sensor in de uitlaat).

2.3.2 Indirecte NO_x-bepaling middels berekeningen

NO_x-monitoring met uitlaatgasstroombepaling, zoals hierboven beschreven, is de meest nauwkeurige manier van NO_x-bepaling. Niet elke machine in Nederland zal op dat detailniveau gemonitord gaan worden. Naast het daadwerkelijk meten van emissies, kan daarom ook op een lager detailniveau een inschatting van de emissies worden gedaan op basis van andere parameters. Ook hierin zijn verschillende niveaus te onderscheiden, zowel qua parameters als manier van dataverzameling. De onzekerheid op basis van rekenmethodieken ten opzichte van metingen is het grootst bij machines met een SCR-katalysator (katalysator voor NO_x-reductie). Een goede of minder goede werking van de SCR heeft namelijk een grote invloed op de daadwerkelijke emissies. De meest nauwkeurige rekenmethodieken gebruiken input die rekening houden met de theoretische werking van SCR.

De belangrijkste parameters voor het bepalen van emissies zijn het brandstofverbruik, de draaiuren en het AdBlue-verbruik. Hierbij biedt de verzameling van deze drie parameters tezamen het meest nauwkeurige beeld van de emissies. Zowel het AdBlue-verbruik als het brandstofverbruik geven informatie over de werking van de SCR-katalysator. Het AdBlue-percentage doet dat op een directe manier, en het brandstofverbruik op een indirecte manier. Een hoog AdBlue-verbruik ten opzichte van het brandstofverbruik betekent een hoge NO_x-reductie. Een hoog brandstofverbruik geeft aan dat er een hoge motorbelasting is, een SCR-katalysator werkt doorgaans goed bij een hoge motorbelasting, mits deze niet defect is. De meest robuuste manier om een defect te detecteren is door de NO_x-emissies direct te meten. Met de indirecte methoden is dit complexer om vast te stellen.

TNO-rapport "*TNO 2025 R11083 - Ontwikkeling van meetmethoden voor emissietesten en NO_x-monitoring bij mobiele werktuigen*" geeft in Hoofdstuk 3 meer informatie over de mogelijkheden voor controle van de SCR-werking.

Met zowel het brandstofverbruik, de uren en het AdBlue-verbruik kan de zogenaamde AUB-methodiek worden toegepast.

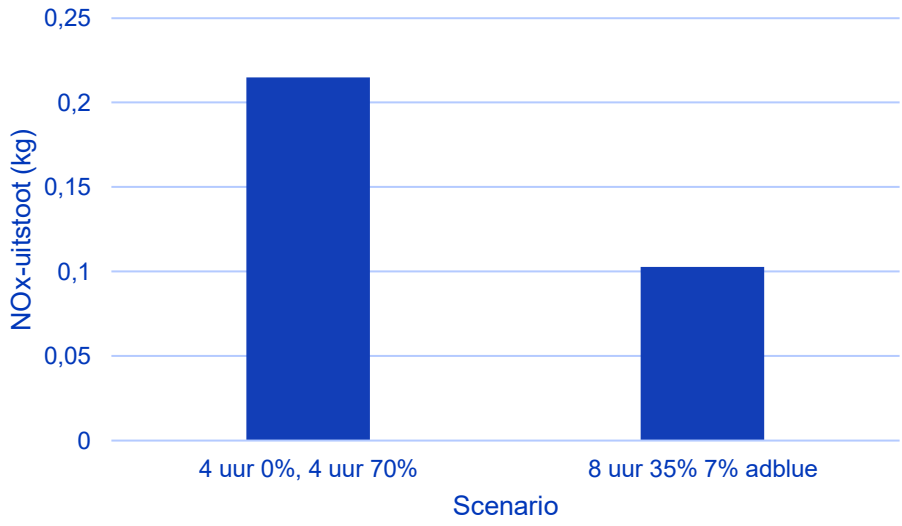
Deze gegevens zijn niet altijd beschikbaar in de praktijk, in dat geval is ook een berekening mogelijk op basis van alleen het brandstofverbruik en uren. Deze methode wordt momenteel onderzocht en is geen onderdeel van de rekenregels in AERIUS. Voor machines zonder SCR-katalysator bestaat de optie al om op basis van uren en brandstof te rekenen. Als ook het brandstofverbruik niet beschikbaar is, dan kan een berekening worden gemaakt op basis van alleen draaiuren. De nauwkeurigheid van de berekening wordt lager wanneer er minder data beschikbaar is, zie Hoofdstuk 7 voor meer detail omtrent de nauwkeurigheid van de verschillende methodieken. Met de afwezigheid van het brandstofverbruik kan geen inschatting meer gedaan worden van de motorbelasting, waarmee de nauwkeurigheid van de berekening in het algemeen lager wordt. In al deze gevallen zijn minimaal de Stage-klasse van de machine en het motorvermogen benodigd.

Naast de parameters, is ook de methode van dataverzameling relevant voor de nauwkeurigheid van het resultaat. Wanneer bijvoorbeeld het brandstofverbruik op weekniveau bepaald wordt, dan is de NO_x-berekening minder nauwkeurig dan op dagniveau, uurniveau of per seconde. Dit is gekoppeld aan de herkomst van de data, ofwel komt de data vanuit een datalogger of een telematica-systeem (seconde, uur of dagniveau) of is het handmatig geregistreerd, bijvoorbeeld op basis van tankbonnen (week / projectniveau).

Figuur 2.3 illustreert het effect van verschillende aggregatieniveaus op basis van twee scenario's, namelijk:

- vier uur stationair (geen motorlast, geen AdBlue), vier uur hoge motorlast van 70% (7% AdBlue);
- acht uur gemiddelde motorlast van 35% met 7% AdBlue.

Het eerste scenario geeft, ondanks een gemiddeld gelijke motorbelasting, hogere emissies dan het tweede scenario, waarbij er alleen wordt gerekend met een gemiddelde motorbelasting. Dit is het gevolg van een inactieve SCR bij stationair draaien. Dergelijke effecten zijn alleen zichtbaar als minimaal op uur-niveau data wordt verzameld. De manier van dataverzameling kan daarom variëren ten gevolge van de gewenste nauwkeurigheid. Ten behoeve van de controleerbaarheid van de berekeningen is het wenselijk om kenbaar te maken welke tijdresolutie de verzamelde data heeft.



Figuur 2.3: Doorrekening scenario's met verschillende aggregatie niveaus.

2.3.3 Overzicht rekenmethodieken en voor- en nadelen per methode

De methoden zoals opgenomen in Tabel 2.2 voor emissiebepaling zijn onderdeel van deze studie. De methoden zijn gegroepeerd in “meten” en “berekenen”” en vervolgens gerangschikt van hoge nauwkeurigheid naar minst hoge nauwkeurigheid. In Tabel 2.3 zijn vervolgens de voor- en nadelen per methodiek samengevat. In hoofdstuk 7 wordt een meer gedetailleerde kwantitatieve vergelijking van de nauwkeurigheid van de verschillende rekenmethoden gegeven. Hiervoor is de root mean squared error (RMSE) berekend van de methodes. De RMSE is een maat voor de gemiddelde afwijking (in kg NO_x per dag) tussen de berekende en gemeten waarden. De gemeten waarden dienen hierbij als referentie. De RMSE is berekend voor machinecategorieën D, A en B (deze machines komen veel voor in de vloot). Zie Hoofdstuk 4 voor een toelichting van de machinecategorieën. Voor deze machinecategorieën was voldoende monitoringsdata beschikbaar om de RMSE-analyse te kunnen uitvoeren. De analyse is alleen gedaan voor de methoden waarbij de data verzameld is via monitoring. Deze RMSE’s zijn toegevoegd in Tabel 2.3, zie Hoofdstuk 7 voor een verdere beschrijving van deze analyse.

Tabel 2.2: Overzicht rekenmethodieken.

Meten/berekenen	Methode	NO_x bepaling obv	Benodigd systeem	Benodigde data	Toegelicht in hoofdstuk
Emissiemeting + berekening	NO_x meten_detail	Geïnstalleerde NO_x sensor in combinatie met uitlaatgasstroom door MAF sensor of CAN-bus signalen	NO_x-sensor MAF-sensor of CAN-bus connectie Datalogger	Concentraties van NO_x en O_2 Uitlaatgasstroom	3
	NO_x meten_beperkt	NO_x/CO_2 door geïnstalleerde sensor	NO_x-sensor Datalogger	Concentraties van NO_x en O_2	3
Berekenen	AUB_monitoring	AdBlue, draaiuren en brandstof	Datalogger in combinatie met CAN-bus Telematica[3]	Uren, brandstof en AdBlue uit datalogger of fleetexports	4
	AUB_registratie	AdBlue, draaiuren en brandstof	Registratie / administratie	AdBlue, uren, brandstof uit registraties	4
	UB_monitoring_SCR	Draaiuren en brandstof	Datalogger CAN-bus Telematica	Uren en brandstof uit datalogger of fleetexports	5
	UB_registratie_SCR	Draaiuren en brandstof	Registratie / administratie	Uren en brandstof uit registraties	5
	U_monitoring	Draaiuren	Datalogger CAN-bus of sensor Telematica	Uren uit datalogger of fleetexports	6
	U_registratie	Draaiuren	Registratie / administratie	Uren uit registraties	6

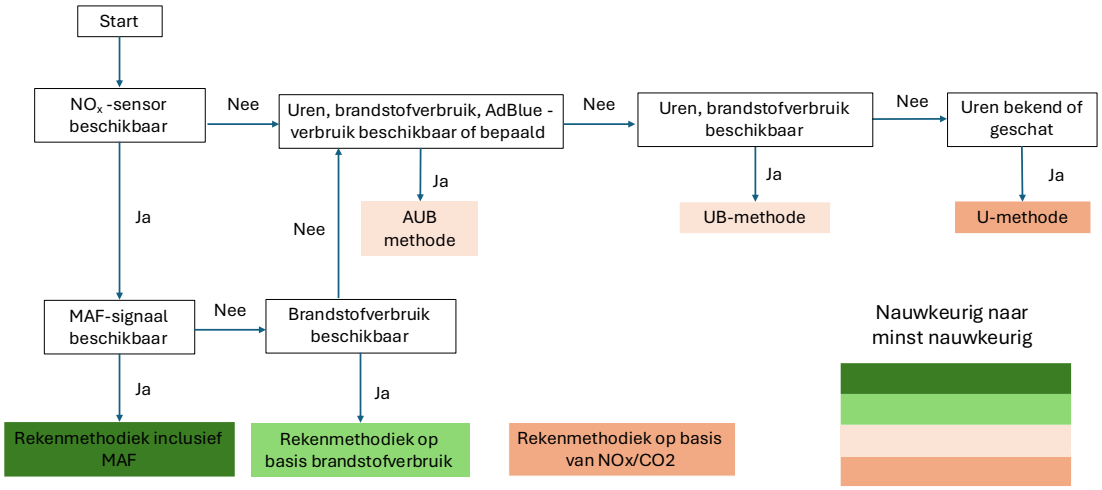
[3] Met telematica-data worden data bedoeld die fabrikanten beschikbaar stellen voor machine-eigenaren, data van de machines (zoals brandstofverbruik) zijn dan beschikbaar in een online-omgeving. Data vanuit de datalogger in combinatie met CAN-bus zijn vaak ook beschikbaar in een online omgeving.

Tabel 2.3: Voor- en nadelen per methode.

Meten/berekenen	Methode	Voordelen	Nadelen / beperkingen	Praktische toepasbaarheid	Nauwkeurigheid [RMSE: kg NO_x per dag]
Emissiemeting + berekening	NO_x meten_detail	Zeer hoge nauwkeurigheid	Beperkte schaal mogelijk vanwege benodigde installatie	Installatie vraagt aanpassing aan machine en kost ca. 1 dag	Hoogste nauwkeurigheid RMSE: referentie
	NO_x meten_beperkt	Minder installatie dan optie met uitlaatgasstroom bepaling	Aannames nodig om tot NO_x in kg te komen	Installatie vraagt aanpassing aan machine en kost ca. een halve dag	Globale inschatting RMSE cat D: 0,46 RMSE cat A: 0,11 RMSE cat B: 0,74
Berekenen	AUB_monitoring	Eenvoudiger dan meten Nauwkeurigste optie als indirecte methode	Beperkte opties voor nauwkeurige AdBlue monitoring en daarmee vaak onbekend	AdBlue is lastig nauwkeurig te bepalen. Telematica of datalogger in combinatie met CAN-bus nodig	Zeer gedetailleerde inschatting RMSE cat D: 0,18 RMSE cat A: 0,05 RMSE cat B: 0,36
	AUB_registratie	Bij goede registratie redelijk nauwkeurig	Meetinterval is laag, alleen tijdens bijvullen van AdBlue en brandstof. Adblue in praktijk vaak onbekend.	Registraties per individuele machine vaak niet beschikbaar	Gedetailleerde inschatting
	UB_monitoring_SCR	Eenvoudiger dan meten. Nauwkeurige optie als indirecte methode	Werking SCR minder direct te bepalen dan bij AUB.	Telematica of datalogger in combinatie met CAN-bus nodig Enkel nieuw voor categorie D	Zeer gedetailleerde inschatting RMSE cat D: 0,17
	UB_registratie_SCR	Bij goede registratie redelijk nauwkeurig	Meetinterval is laag, alleen tijdens bijvullen van brandstof	Registraties per individuele machine vaak niet beschikbaar Enkel nieuw voor categorie D	Gedetailleerde inschatting
	U_monitoring	Eenvoudig	NO_x emissies alleen op basis van gemiddelden mogelijk. Hierdoor beperkt onderscheid tussen machines of type inzet (motorbelasting kan niet ingeschat worden).	Telematica of datalogger in combinatie met CAN-bus of sensor nodig	Globale maar robuuste inschatting RMSE cat D: 0,20 RMSE cat A: 0,12 RMSE cat B: 0,46
	U_registratie	Heel eenvoudig	Niet accuraat	Makkelijk toepasbaar	Globale inschatting

2.4 Beslisboom

Onderstaande beslisboom laat zien welke rekenmethodiek gebruikt dient te worden aan de hand van de beschikbare informatie, zie Figuur 2.4. Een negatief antwoord op een vraag leidt tot een minder accurate rekenmethodiek. Indien er niet uitgekomen wordt met de onderstaande beslisboom dient er meer informatie te worden verzameld om NO_x-uitstoot te berekenen. Elk van de methodieken, inclusief rekenvoorbeelden komt aan bod in de volgende hoofdstukken.



Figuur 2.4: Beslisboom rekenmethodieken.

3 Vertaling van NO_x-metingen naar totale uitstoot

In dit hoofdstuk komen de verschillende rekenmethodieken aan bod op basis van meetgegevens. Er worden drie verschillende methoden beschreven om NO_x-concentraties vanuit de sensor om te rekenen naar emissies in kilogrammen.

NO_x-metingen worden beschouwd als de meest accurate benadering van de werkelijkheid. Tijdens praktijkmetingen komen allerlei verschillende condities voor, waarvan de bijbehorende emissies bepaald kunnen worden. Waar rekenmethodieken gebaseerd moeten worden op gemiddelden, kan op basis van metingen het emissieniveau van de specifieke machine bepaald worden, welke hoger of lager kan zijn dan het gemiddelde. Deze afwijking kan komen door een bepaald type inzet, maar kan ook het gevolg zijn van een beter of slechter presterende motor en emissienabehandeling.

Voor NO_x-metingen worden NO_x-sensoren geplaatst in het uitlaatsysteem van de bouwmachine. Een NO_x-sensor is een zirconia katalysator die ook de zuurstofconcentratie meet in het uitlaatgas. De stikstofoxiden worden gekatalyseerd tot elementair zuurstof en stikstof. De zuurstof die hierbij vrijkomt wordt gemeten, en aan de hand van de gestegen zuurstofconcentratie wordt de NO_x-concentratie bepaald in parts per million (ppm). Voor de plaatsing van NO_x-sensoren en mogelijke toevoegingen is een handleiding opgesteld[4].

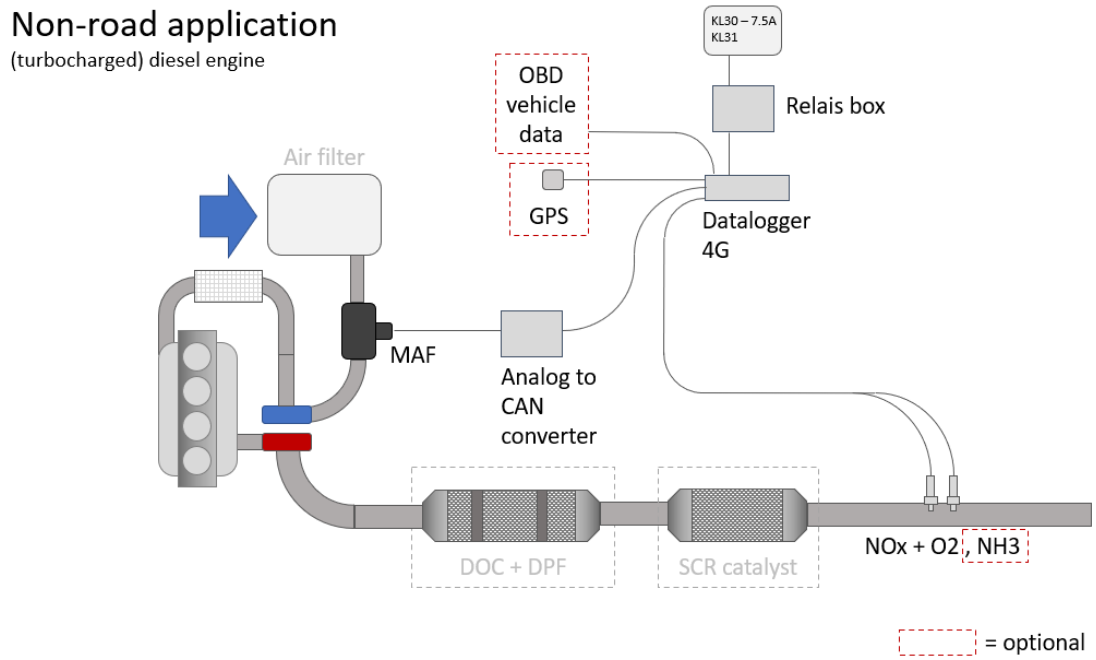
Voor de vertaling van de ruwe NO_x-concentratie die de sensor weergeeft naar totale NO_x-uitstoot zijn verschillende rekenmethodieken beschikbaar. De meest robuuste is gebaseerd op NO_x-metingen in combinatie met een Mass Air Flow (MAF) sensor in de luchttoevoer van de motor. Hiermee kan bepaald worden wat de stroomsnelheid is door de uitlaat. Samen met de NO_x-concentratie kan de totale uitstoot bepaald worden. De data worden per seconde (1Hz) verzameld op een datalogger. Dit systeem is geïllustreerd in Figuur 3.1 en Figuur 3.2.

De tweede methode berust op de beschikbaarheid van het brandstofverbruik op 1 Hz frequentie. Met het brandstofverbruik wordt de stroomsnelheid door de uitlaat ingeschat en kan de totale uitstoot berekend worden.

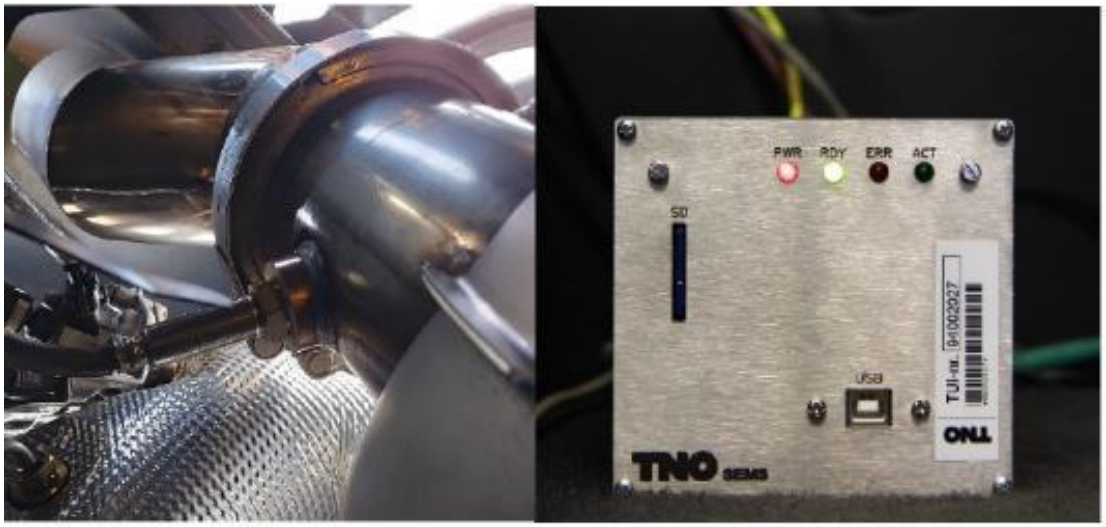
Een alternatieve mogelijkheid is om de totale uitstoot van NO_x te bepalen op basis van alleen de NO_x-sensor. Door de afwezigheid van MAF- en/of machinesignalen kan de luchtstroom door de motor niet worden berekend om zo tot emissietotalen te komen. Met een NO_x-sensor kunnen ook CO_2-concentraties worden bepaald (afgeleid uit het O_2-signaal). Op basis van de NO_x/CO_2 ratio kan een inschatting worden gemaakt van NO_x-emissies in g/kWh. Deze inschatting is theoretisch van aard, maar is bij diverse machines geverifieerd aan de hand van metingen met een MAF-sensor. Daarnaast kunnen gemeten CO_2-concentraties worden gebruikt om van gNO_x/kWh tot absolute NO_x-emissiewaarden te komen. Al met al geeft deze optie een eenvoudiger (maar minder nauwkeurig, zie Hoofdstuk 7) alternatief om met alleen een NO_x-sensor de NO_x-emissies in g/kWh of in gram per uur te berekenen.

[4] TNO 2025 P11961 Installatiehandleiding NOx monitoring

De komende drie paragrafen beschrijven de drie verschillende mogelijkheden om de NO_x-uitstoot in kilogrammen te berekenen op basis van metingen.



Figuur 3.1: Schematisch overzicht van de meetopstelling met NO_x-sensor, MAF en datalogger.



Figuur 3.2: Foto van ingebouwde NO_x-sensor en de TNO-datalogger.

3.1 NO_x-meting rekenmethodiek inclusief MAF

Om de NO_x-concentratie om te rekenen naar totale NO_x-uitstoot is de stroomsnelheid door de uitlaat nodig. Voor het bepalen van de stroomsnelheid door de uitlaat wordt een MAF-sensor van de motor gebruikt of, indien niet aanwezig, erbij geplaatst bij de luchtinlaat van de motor.

De stroomsnelheid door de inlaat wordt opgeteld bij de grammen brandstof die verbruikt worden. Samen vormen deze de totale massastroom door de uitlaat. Formule 1 wordt gebruikt om de massastroom door de uitlaat te bepalen:

Formule 1:

$$Uitlaat\ massastroom\ (EMF)\left[\frac{g}{s}\right] = MAF\left[\frac{g}{s}\right] + Brandstofverbruik\left[\frac{g}{s}\right]$$

De massastroom van de brandstof wordt, indien beschikbaar, bepaald door signalen uit de CAN-bus. Als dit niet het geval is kan het brandstofverbruik worden bepaald aan de hand van het zuurstofpercentage in de uitlaat in combinatie met de metingen van de MAF-sensor. In formule 2 wordt het brandstofverbruik berekend.

Formule 2:[5]

$$Brandstofverbruik\ \left[\frac{g}{s}\right] = MAF\left[\frac{g}{s}\right] * \frac{20{,}9476 - O_2[\%vol]}{304{,}557}$$

Nadat de massastroom door de uitlaat berekend is kan de NO_x-massa berekend worden aan de hand van formule 3. Hierbij worden de NO_x-concentratie vermenigvuldigd met de uitlaat massastroom en een constante. In bijlage A wordt de formule ontleed.

Formule 3:[6]

$$NOx\ mass\ flow\left[\frac{mg}{s}\right] = (1.5878 * NOx[ppm] * EMF[g/s])/1000$$

Voorbeeldberekening:

- Een bouwmachine met een gemiddelde lucht inlaatstroom van: **52,3 g/s**
- Een gemiddeld zuurstof concentratie in de uitlaat van **11%**
- De NO_x-concentratie in de uitlaat is gemiddeld **22 ppm**
- De meetcampagne duurt **100 uur**

De uitlaat massastroom (EMF) is daarmee: 52,3*(1+(20,9476-11)/304,557) = **54 g/s**

De berekende NO_x-massastroom is: 1,5878*22*54/10^3 = **1,9 mg/s**

Om de NO_x-uitstoot per seconde om te rekenen naar de totale uitstoot in kilogrammen, kan de volgende formule worden gebruikt:

NO_x-massastroom [mg/s] *3600*tijd [uur] /10^6 = NO_x-uitstoot [kg].

De totale NO_x-uitstoot [kg] kan daarmee als volgt berekend worden = 1,9*3600*100/10^6 = **0,68 kg.**

[5] 304.557 is een constante berekend met formule: ambient O_2[%]*air to fuel ratio=20,9476*14,539.
[6] 1.5878 is de constante verhouding tussen molaire massa van NO_x en molaire massa van uitlaatgas.

3.2 NO_x-metingrekenmethodiek op basis van brandstofverbruik

Indien er geen stroomsnelheid door de inlaat bepaald kan worden, kan de totale massastroom door de uitlaat worden afgeleid door het brandstofverbruik en het zuurstof gehalte in de uitlaat. Formule 4 berekent de uitlaat-massastroom op basis van het brandstofverbruik. Formule 4 is afgeleid van Formule 1 en Formule 2

Formule 4:

$$Uitlaat\ massastroom\ (EMF)\left[\frac{g}{s}\right] = Brandstofverbruik\left[\frac{g}{s}\right] * \left(1 + \frac{304{,}557}{20{,}9476 - O_2[\%vol]}\right)$$

De NO_x-uitstoot wordt bepaald door middel van formule 3.

Wanneer er enkel liters diesel beschikbaar zijn kan met de dichtheid van 840 g/l het brandstofverbruik omgerekend worden naar grammen.

Voorbeeldberekening:

- Een bouwmachine wordt gebruikt voor 100 uur waarbij het totale brandstofverbruik 730 liter diesel is.
- De gemiddelde zuurstof concentratie in de uitlaat = **11%**
- De gemiddelde NO_x-concentratie in het uitlaatgas = **22 ppm**

Het brandstofverbruik is 730 [l]*840[g/l] = **613 200 gram** gedurende 100*3 600 = **360 000 seconden**. Deze twee op elkaar delen geeft 613 200/360 000 = **1,70 g/s diesel**

De berekende uitlaat-massastroom met formule 4 is: 1,70*(1+(304,557/(20,9476-11)))=**53,7 g/s.**

De NO_x-massastroom berekend met formule 3 is 1,5878*22*53,7/1000= **1,9 mg/s.**

De totale NO_x-uitstoot [kg] is berekend aan de hand van de massastroom en de tijd is:

NO_x-uitstoot [kg]= 1,9*3600*100/10^6=**0,68 kg.**

3.3 NO_x-metingrekenmethodiek op basis van NO_x/CO_2

Indien ook het brandstofverbruik niet beschikbaar is kan de totale NO_x-uitstoot bepaald worden aan de hand van een geschat motorrendement en de metingen van de NO_x-sensor. Aan de hand van motorrendement wordt de NO_x-uitstoot per kWh bepaald. Formule 5 biedt de mogelijkheid om NO_x / CO_2 [ppm/%] om te rekenen naar NO_x per energie eenheid [g/kWh] aan de hand van het motorrendement:

Formule 5:

$$\frac{NO_x}{E}\left[\frac{gNO_x}{kWh}\right] = Motorrendement\left[\frac{gCO_2}{kWh}\right] * \frac{46\left[\frac{g}{mol}\right]}{44\left[\frac{g}{mol}\right]} * \frac{NO_x/CO_2[\frac{ppm}{\%}]}{10^4}$$

E staat voor de geleverde energie door de motor [kWh].

De CO_2 concentratie wordt bepaald met de zuurstof concentratie volgens formule 6:

Formule 6:[7],[8]

$$CO_2[\%] = 13{,}4 * \left(1 - \left(\frac{O_2[\%]}{20{,}9476}\right)\right)$$

Aan de hand van een eerdere data-analyse van NO_x-metingen aan bouwmachines is formule 7 bepaald. Dit biedt een mogelijkheid om het benodigde vermogen te bepalen aan de hand van het CO_2 percentage [1]:

Formule 7:

$$P[kW] = \frac{10{,}9 * CO_2[\%] - 21.6}{100} * Pmax[kW]$$

Voor de totaal uitgestoten NO_x worden deze formules gecombineerd met de tijd.

Formule 8:

$$NO_x[kg] = \bar{P}[kW] * t[h] * \frac{\frac{NO_x}{E}\left[\frac{gNO_x}{kWh}\right]}{1000}$$

$\bar{P}$ staat voor het gemiddelde vermogen dat de motor heeft geleverd.

Aanname: Indien het motorrendement niet beschikbaar is kan aangenomen worden dat dit 751 gram CO_2/kWh is [1].

Voorbeeld berekening:

- Motorrendement[g/kWh] =**751 g CO_2 /kWh**
- NO_x / CO_2 [ppm/%] = **6**
- Gemiddelde zuurstof concentratie = **13,9%**
- Gemiddelde CO_2 concentratie: 13.4*(1-(13.9/20.9476)) = **4,5%**
- Maximaal vermogen [kW] = **250 kW**
- Aantal draaiuren: **8**

De NO_x-uitstoot per energie-eenheid kan bepaald worden aan de hand van formule 5:
NO_x [g/kWh] =751*46*6/(44*10^4)=**0,47g NO_x /kWh.**

Het gemiddeld vermogen wordt berekend aan de hand van de gemiddelde CO_2-concentratie en Formule 7:

Gemiddeld vermogen [kW] = (10.9*4.5-21.6)*250/100=**68,6kW.**

Met het bovenstaande rekenvoorbeeld geeft dit:
NO_x-uitstoot [kg]= 68.6*8*0.47/1000=**0,26 kg.**

[7] Maximale CO_2-percentage in uitlaatgas=13,4%
[8] Zuurstofconcentratie buitenlucht=20,9476%

4 AUB-methode

Wanneer er geen mogelijkheid is om de NO_x-concentratie te meten is het mogelijk om de uitstoot relatief accuraat in te schatten naar aanleiding van het AdBlue-verbruik, de draaiuren en het brandstofverbruik. De methode die hiervoor ontwikkeld is de AUB-methode genoemd, deze methode is de basis voor AERIUS-berekeningen [2]. In deze methode zijn de verschillende emissieklasse en vermogensklasse combinaties gereduceerd tot zes categorieën: X, A, B, C, D en E, zie Tabel 4.1. Hierbij is de categorie X het meest vervuilend en categorie D (Stage IV en V tussen de 56 en 560 kW) het minst vervuilend voor dieselmachines. Categorie C en D zijn de machine-categorieën waarbij de machine een SCR-katalysator heeft, welke werken in combinatie met AdBlue. Voor deze categorieën dient dan ook het AdBlue-verbruik ingevuld te worden. Categorie E betreft benzine-machines.

De invoergegevens uit de onderstaande tabellen zijn benodigd voor de emissieberekening. De emissieklasse kan bepaald worden op basis van de instructie in paragraaf 2.2.

Tabel 4.1:Tabel voor classificatie van mobiele machines.

	[…-2001]	[2002-2005]	[2006-2010]	[2011-2013]	[2014-2018]	[2019-…]
Vermogen [kW]	Stage-I	Stage-II	Stage-IIIA	Stage-IIIB	Stage-IV	Stage-V
(…-56)	X	X	X	A	-	A
[56-75)	X	X	A	A	D	D
[75-130)	X	A	B	B	D	D
[130-560)	X	A	B	C	D	D
[560-…	X	X	X	X	X	B
genset [560-…]	X	X	X	X	X	C[9]

Tabel 4.2: Huidige (AERIUS 2025) invoergegevens voor berekening van stikstofuitstoot, bruikbaar in AERIUS.[10]

Coëfficiënten	X	A	B	C	D	E	
Qb	0,03	0,02	0,015	0,025	0,033	0,004	per liter (diesel)
Qu	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005		per uur
Qa				-0,46	-0,46		per liter (AdBlue)

Voor de categorieën A en B zijn de coëfficiënten bijgesteld aan de hand van data van meer machines (18 in totaal). De bijgestelde coëfficiënten staan weergegeven in Tabel 4.3. De coëfficiënten zijn op het moment van schrijven van deze rapportage aangeleverd als

[9] Volgens de Stage V-standaarden (vanaf 2019) hebben generatorsets / stationaire werktuigen met een motor van >560 kW andere emissielimieten dan andere machines met een motor van >560 kW en zijn zodoende apart opgenomen onder de benaming ‘genset [560-…]’.

[10] Coëfficiënten voor NH_3-uitstoot en de uitstoot van utiliteitsvoertuigen zijn te vinden in TNO 2021 R12305

onderdeel van de actualisatie van AERIUS 2026. Na de release van AERIUS 2026 zullen de relevante cijfers ook via de TNO website beschikbaar komen.[11]

Tabel 4.3: Aangeleverde bijstelling van coëfficiënten voor klasse A en klasse B machines.

Coëfficiënten	A	B	
Qb	**0,010**	**0,011**	**per liter (diesel)**
Qu	**0,018**	**0,028**	**per uur**

De bedoeling van de AUB-methode is dat het AdBlue-verbruik (in het geval van SCR-machines), het brandstofverbruik en draaiuren door de gebruiker zelf bepaald wordt. Het wordt aanbevolen dat de gebruikers van de rekentool contact zoeken met de machine-eigenaren om deze gegevens te bepalen. Aanvullend wordt aanbevolen dat de gebruikers van de rekentool contact zoeken met de machine-eigenaren wanneer het AdBlue-verbruik zeer laag uitkomt. Dit is nodig om te achterhalen waar het lage AdBlue-verbruik vandaan komt, mogelijk is er een defect aan het nabehandelingssysteem waardoor de NO_x-emissies in de praktijk te hoog zijn, of zijn er in sterkere mate andere emissiereductiesystemen (zoals uitlaatgasrecirculatie) toegepast.

Er dienen twee controles op de invoer te worden uitgevoerd voor het invullen van de AUB-methode: 1) Voor machinegroep met categorie C mag het AdBlue-verbruik niet hoger zijn dan 4% van het dieselverbruik. 2) Voor machinegroep met categorie D mag het AdBlue-verbruik niet hoger zijn dan 7% van het dieselverbruik.[12] Als de waarden te hoog zijn (>4%>7%), wordt het AdBlue-verbruik afgekapt op de maximale waarden.

Met formule 9 en de benodigde invoergegevens wordt de totale NO_x-uitstoot berekend

Formule 9:

$$NO_x\,[kg] = Qb * brandstof[l] + Qu * tijd[u] + Qa * AdBlue[l]$$

4.1 Bepaling van het AdBlue-verbruik op basis van belastingsgraad

In de praktijk komt het voor dat het AdBlue-verbruik niet bekend is bij de gebruiker omdat deze niet structureel wordt bijgehouden. Als dat het geval is, kent de uitkomst een grotere mate van onzekerheid. Daarom is onderzocht of een methode mogelijk is met alleen uren en brandstof, zie volgende alinea's en Hoofdstuk 5.

Wanneer het AdBlue-verbruik niet bekend is bij de gebruiker, worden er momenteel door veel gebruikers default waarden toegepast. Namelijk voor categorie C een default AdBlue-verbruik van 3% van het brandstofverbruik (bijvoorbeeld: 100 liter diesel = 3 liter AdBlue), en voor categorie D 6%. In sommige gevallen wordt ook 7% AdBlue gebruikt. Het verschil in uitkomst tussen 6 en 7% AdBlue is groot en moet daarom ook onderbouwd worden.

[11] Emissiefactoren voor luchtkwaliteit en stikstofdepositie

[12] De rekenmethodiek is ingericht op een maximaal AdBlue-percentage van 7%. In de praktijk zijn er soms machines die daar net boven kunnen zitten, deze worden in deze methodiek teruggezet naar 7%.

Op basis van heel veel nieuwe NO_x-meetdata (ca. 70 diverse machines) is voor categorie D machines een nieuwe methode ontwikkeld waarmee het mogelijk is om het AdBlue-verbruik (indien deze niet bekend is) in te schatten aan de hand van de belastingsgraad van de motor.[13] De belastingsgraad is de fractie van het totale motorvermogen dat de motor gemiddeld heeft geleverd. De belastingsgraad kan berekend worden met het brandstofverbruik, het bouwjaar en het maximale motorvermogen, zie formule 10.

Deze methode is op het moment van schrijven voorgesteld als onderdeel van de actualisatie AERIUS 2026. Het blijft ook nog steeds mogelijk om het AdBlue-verbruik zelf te bepalen op basis van monitoring of registraties.

Formule 10:

$$Belastingsgraad = ((V_f * 840 * 3{,}1/3600) - 0{,}5 * ((1+\eta) * (0{,}4 + 0{,}0025 * P_{max})))/(0{,}2 * \eta * P_{max} * (1 + e\text{^}(-0{,}2 * P_{max}))))$$

V_f= brandstofverbruik [l/h]
η= Motorefficientie [factor]
P_{max}=Maximum motorvermogen[kW]

De motorefficiëntie van motoren verbeterd over de jaren en is geïndiceerd op het jaartal 2010. De motorefficiëntie kan gevonden worden in de volgende spreadsheet. Op het moment van schrijven wordt ook een spreadsheet ontwikkeld waarmee de belastingsgraad berekend wordt voor de gebruiker. De benodigde input voor de spreadsheet is het brandstofverbruik, het bouwjaar en het maximum motorvermogen. Voor verdere toelichting over deze methodiek of beschikbare Excel formules mag contact opgenomen worden met de auteurs van deze rapportage.

Nadat de gemiddelde belastingsgraad is bepaald, kan in de Tabel 4.4 het bijbehorende Ad-Blue percentage worden afgelezen. De AdBlue-percentages in de tabel zijn gebaseerd op gemiddelde belastingsgraden per dag.

Tabel 4.4: AdBlue percentage aan de hand van de belastingsgraad..

Belastingsgraad (gemiddeld per dag of project)	AdBlue [% van brandstofverbruik]
0-10%	4,3%
10-15%	5,3%
15-20%	6,2%
20-25%	6,4%
25-35%	6,8%
35-50%	6,9%
50-100%	7%

[13] In de nieuwe meetdata was het AdBlue-verbruik niet beschikbaar. Daarom is het theoretische AdBlue-verbruik bepaald aan de hand van de gemeten NOx-uitstoot. Dit wijkt af van bijvoorbeeld TNO rapport “TNO 2024 R11077 - Opties voor monitoring van de NOx-emissies van mobiele werktuigen” waarbij de relatie tussen AdBlue-verbruik en motorbelasting is beschreven op basis van zes machines waarbij zowel motorbelasting als AdBlue bekend was.

Met de AUB-methode kan voor “D’” machines die hoge motorlasten draaien de NO_x-uitstoot lager uitvallen dan met andere rekenmethodieken. Om het “shoppen” van de meest gunstige methode tegen te werken wordt aanbevolen dat het bepalen van het AdBlue-percentage (voor categorie D machines) voor het hele bouwproject gedaan dient te worden en niet alleen voor de machines met een hoge motorbelasting.

De voorspellende waarde voor de NO_x-uitstoot via de AUB-methode is goed wanneer het brandstofverbruik bekend is, en het AdBlue-verbruik bepaald kan worden. Indien het brandstofverbruik geschat moet worden vanuit algemene kentallen is de voorspellende waarde van de U-methode (zie Hoofdstuk 6) beter.

Voorbeeldberekening 1 waarbij A, U en B bekend zijn:

- Maximaal vermogen [kW]: **100 kW**
- Bouwjaar of Stage-klasse: **2021 / Stage V**
- Aantal draaiuren: **100**
- Brandstofverbruik [l]: **1000**
- AdBlue-verbruik [l]: **65**
- Classificatie: **D**

NO_x [kg] = 0,033 * 1000 + 0,005 * 100 - 0,46 * 65 =**3,6 kg**

Voorbeeldberekening 2 waarbij A onbekend is, en bepaald met berekende belastingsgraad:

- Maximaal vermogen [kW]: **100 kW**
- Bouwjaar of Stage-klasse: **2021 / Stage V**
- Aantal draaiuren: **100**
- Brandstofverbruik [l]: **1000**
- Efficiëntie ten opzichte van basisjaar 2010: **0,9110**
- Classificatie: **D**

Brandstofverbruik[l/h] = 1000/100**=10**

De belastingsgraad bepaald door middel van Formule 9: Belastingsgraad =

((10*840*3,1/3600)-0.5*(1+0,9110)*(0,4+0,0025*100))/(0,2*0,9110*100*(1+e^(-0,2*100)))=**0,36**

Belastingsgraad=**36%**

Het AdBlue-percentage dat overeenkomt met een belastingsgraad van 36% is:
AdBlue-percentage = **6,9%**

Het AdBlue-verbruik in liters kan berekend worden door:
AdBlue-verbruik [l]=0,069*1000=69 liter

De totale NO_x-uitstoot [kg] met het bovenstaande rekenvoorbeeld geeft:

NOx [kg] = 0,033 * 1000 + 0,005 * 100 - 0,46 * 69 =**1,76 kg**

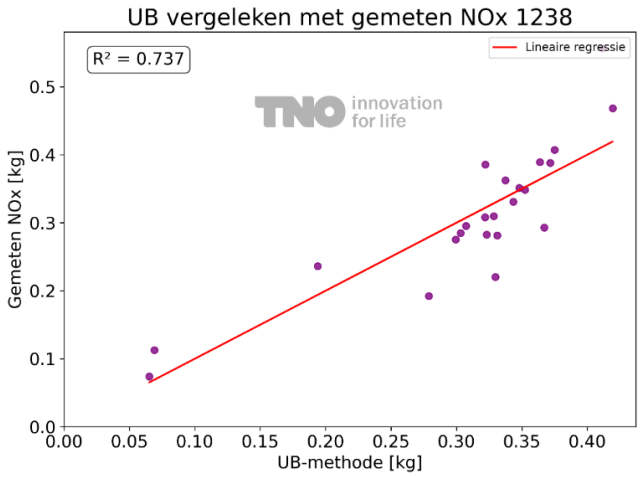
5 UB-methode

Zoals in het vorige hoofdstuk benoemd is het AdBlue-verbruik in de praktijk vaak niet bekend voor machines met een SCR-katalysator (categorie C en D uit de AUB-methode). De emissieberekening voor andere categorieën dan C en D zijn bij de “AUB-methode” al gebaseerd op alleen uren en brandstof. In deze studie is onderzocht of een methode zonder AdBlue-verbruik ook toepasbaar is voor de categorie D.

Deze methode is nieuw en gebaseerd op daggemiddelde data van 70 machines. Deze methode is een relatief nauwkeurige methode die nog wat simpeler toe te passen is dan de AUB-methode op basis van belastingsgraad (zie vorige hoofdstuk). De methode is geen onderdeel van de AERIUS-calculator maar zou wel gebruikt kunnen worden onder de noemer “invoer met eigen specificatie”. Zie hiervoor de “Instructie Gegevensinvoer voor AERIUS Calculator 2025”, paragraaf 8.1.3.[14]

Voor de UB-methode geldt hetzelfde als bij de AUB-methode, namelijk dat de voorspellende waarde voor de NO_x-uitstoot goed is wanneer het brandstofverbruik bekend is. Indien het brandstofverbruik geschat moet worden vanuit algemene kentallen is de voorspellende waarde van de U-methode beter.

De coëfficiënten zijn het product van een regressie waarbij de NO_x-uitstoot bepaald werd aan de hand van het brandstofverbruik en de draaiuren. Per machine type zijn gemiddelde coëfficiënten bepaald en aan de hand van de Nederlandse vloot (volgens het TNO model: TNO 2023 R12643 – EMMA – Mephisto model) zijn deze coëfficiënten gewogen. Figuur 5.1 geeft voor een specifieke machine zowel de gemeten NO_x-uitstoot weer alsook de resultaten van de UB-methode.



Figuur 5.1: Totale NO_x-uitstoot per dag van machine op de Y-as. Resultaten van UB-methode gebaseerd op deze machine op de X-as.

[14] Instructie gegevensinvoer AERIUS Calculator 2025 | AERIUS

In de onderstaande tabel zijn de coëfficiënten weergegeven:

Tabel 5.1 : Coëfficiënten van UB-methode.

Coëfficiënt	Categorie D	
Qb	0,00053	**Per liter**
Qu	0,037	**Per uur**

Formule 13:

$$NO_x = Qb * b + Qu * u$$

Voorbeeldberekening:

- Aantal draaiuren: **100**
- Brandstofverbruik [l]: **1000**
- Classificatie: **D**

Doormiddel van formule 13 en tabel 5.1 geeft dit een NO_x-uitstoot [kg] van:

NO_x [kg] = 0,00053 * 1000 + 0,037 * 100 =**4,23 kg**

6 U-methode

Indien het Adblue- en het brandstofverbruik niet bekend zijn kan de NO_x-uitstoot worden geschat aan de hand van het aantal draaiuren, dit is de zogenaamde U-methode. In de “Instructie Gegevensinvoer voor AERIUS Calculator 2025” is de U-methode aangegeven als een mogelijke methode, in paragraaf 8.3. Aanvullend geeft paragraaf 8.1.3. de optie voor “invoer met eigen specificatie”.[15]

De meest nauwkeurige methode van draaiuren meten is door de CAN-bus data op te slaan, zelf bij te houden, of via het gebruik van sensoren die activiteit detecteren. Als dit niet beschikbaar is worden de draaiuren geschat, wat een grote onzekerheid met zich mee brengt. Een te hoog of te laag aantal uren leidt tot navenant hogere of lagere emissies. Een uitgebreide beschrijving en onderbouwing van de U-methode is te vinden in het TNO-rapport met referentie TNO 2023 R11233 [3].

In de onderstaande Tabel 6.1 is te zien hoeveel NO_x-uitstoot per uur berekend wordt, geschaald over het maximum vermogen van de machine (kW). In Tabel 6.1 wordt gebruik gemaakt van de classificering uit Tabel 4.1. Aan de hand van nieuwe meetdata zijn coëfficiënten van drie machine categorieën naar beneden bijgesteld in Tabel 6.1 (aangegeven in groen).

Tabel 6.1: De U-methode kernwaarden, voor de verschillende categorieën, om NO_x-emissies te berekenen in groen de bijgestelde coëfficiënten.

Dieselmotoren			Zonder SCR	Met SCR	SCR
Categorie	X	A	B	C	D
Limiet op de test	>6 g/kWh	4-6 g/kWh	2-4 g/kWh	2-4 g/kWh	<2 g/kWh
Oude Qu	2,7	1,8	1,3	1	0,34
Bijgestelde Qu	2,7	1,46	1,1	1	0,26

De U-methode berekent de emissies door de gevonden factor g/(uur*kW) te vermenigvuldigen met het maximum vermogen [kW] van de machine en het aantal draaiuren. Dit resulteert in de emissies in grammen. De U-methode hanteert dezelfde classificatie als de AUB-methode.

Formule 12:

$$NO_x[kg] = \frac{Qu * tijd[uur] * Pmax[kW]}{1000}$$

[15] Instructie gegevensinvoer AERIUS Calculator 2025 | AERIUS

Voorbeeldberekening met bijgestelde Qu:

- Maximaal vermogen [kW]: **160 kW**
- Bouwjaar of Stage-klasse: **2018 / Stage IV**
- Aantal draaiuren: **100**
- Classificatie: **D**

De NO_x-uitstoot [kg] bepaald met bovenstaande voorbeeld en Formule 12 geeft:

NO_x [kg] = (160 * 100 * 0,26) / 1000= **4,16 kg**

7 Vergelijking uitkomsten van rekenmethodieken en nieuwe inzichten

In dit hoofdstuk worden de uitkomsten van de diverse rekenmethodieken onderling vergeleken. Aanvullend wordt de nauwkeurigheid van de verschillende methoden kwantitatief beoordeeld.

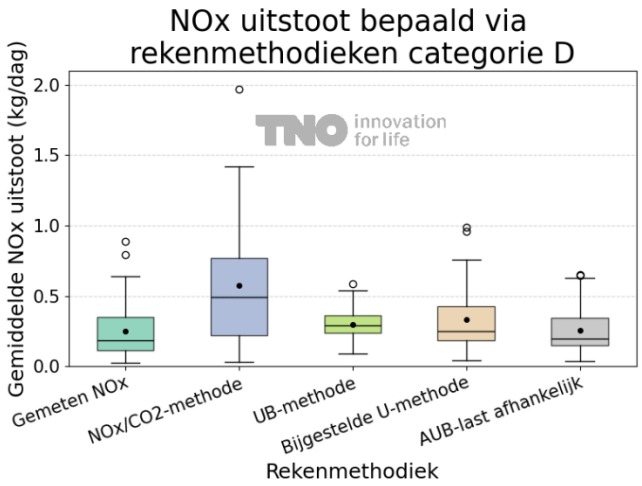
7.1 Categorie D

Sinds de ontwikkeling van de huidige rekenmethodieken zijn er aanzienlijk meer praktijkmetingen aan bouwmachines beschikbaar gekomen. Zowel vanuit TNO, als vanuit een gezamenlijk project tussen Topsector Logistiek en TNO. Dit geeft de mogelijkheid om de huidige rekenmethodieken verder te onderzoeken. Dit is uitgevoerd door de resultaten van verschillende rekenmethodieken te vergelijken met meetresultaten. Voor categorie D was er data van ca. 70 machines beschikbaar. Categorie D zijn machines die relatief jong zijn en binnen de vermogensklasse 56-560 kW vallen, deze machines hebben een SCR.

Om de verschillen tussen de methodes te bepalen zijn voor de 70 machines de bovenstaande rekenmethodes gebruikt om de totale NO_x-emissies te bepalen. Per machine is een gemiddelde NO_x-uitstoot bepaald per dag en de spreiding tussen de machines is in onderstaande grafiek te zien (figuur 7-1). In het figuur staat “Gemeten NO_x” voor de NO_x-uitstoot bepaald aan de hand van gemeten NO_x-concentraties en berekend via MAF-signaal of via het brandstofverbruik.

Het is te zien dat de nieuwe en bijgestelde indirecte rekenmethodieken (UB-methode, bijgestelde U-methode en AUB op basis van belastingsgraad) dichtbij gemeten waardes liggen. De rekenmethodieken bepaald aan de hand van deze dataset weerspiegelen de gemeten waardes beter dan de NO_x/CO_2-methode.

Uit de data-analyse blijkt ook dat wanneer 6% AdBlue wordt aangenomen als waarde, dat daarmee de NO_x-emissies overschat worden voor groot deel van machines. De AUB-methode met 7% onderschat de werkelijke uitstoot in het algemeen.



Figuur 7.1 : Nieuwe en bijgestelde rekenmethodieken vergeleken voor 70 machines in klasse D. Het zwarte punt geeft het gemiddelde weer. De box (het gekleurde gedeelte) geeft 50% van de middelste datapunten weer, de streep is de mediaan en de punten die hierbuiten vallen worden weergegeven met de lijnen.

Om de accuraatheid van de nieuwe en eerder bepaalde methodes te bepalen is de root mean squared error (RMSE) berekend van de methodes. De RMSE is een maat voor de gemiddelde afwijking (in kg NO_x per dag) tussen de berekende en gemeten waarden (de gemeten waarde is de referentie). In Formule 13 is de definitie van de RMSE weergegeven, waarbij “n” het aantal meetpunten is, “y_i“ de gemeten NO_x-uitstoot weergeeft en ”$\hat{y}$“ de NO_x-uitstoot is zoals bepaald aan de hand van de rekenmethodiek. Grote fouten wegen bij de RMSE zwaarder mee dan kleine. De RMSE is bepaald op basis van dag-data (NO_x in kg) per machinegroep waarbij de resultaten gewogen zijn naar hoe veel de machinegroep gebruikt wordt in Nederland.

Formule 13:

$$\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}$$

In Tabel 7.1 staan de RMSE’s van de nieuwe en bijgestelde methodieken. De AUB- en UB-methodiek laten voor de categorie D machines de hoogste nauwkeurigheid zien, gevolgd door de bijgestelde U-methode. Dit laat zien dat de UB-methode een goede optie is als eventuele toekomstige methode. Zoals ook te zien in Figuur 7.1 heeft de NO_x/CO_2-methode een grotere foutmarge met een RMSE van 0,46. De methode op basis van de NO_x/CO_2 ratio is daarmee de minst nauwkeurige optie.

De bijgestelde U-methode heeft een 19% lagere RMSE vergeleken met de eerder bepaalde coëfficiënten van de U-methode (resp. 0,20 en 0,27). De RMSE van de AUB-methode gebaseerd op belastingsgraad ligt 59% lager dan die van AUB-6% en 11% lager dan die van AUB-7%.

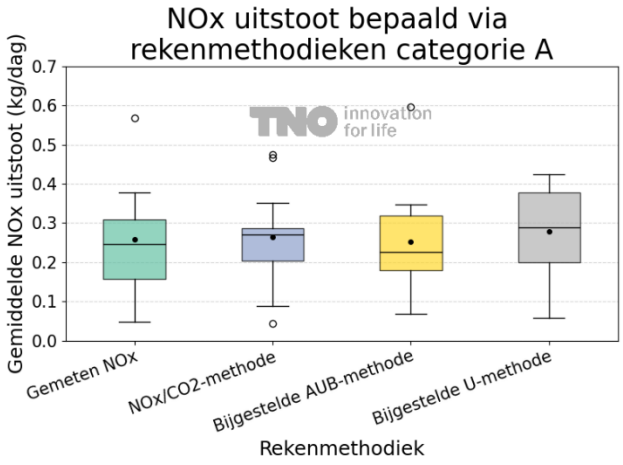
Tabel 7.1: Root mean squared error resultaten van de nieuwe en bijgestelde rekenmethodieken.

Methode	NOx/CO2	Bijgestelde U	AUB op basis van belasting	UB
RMSE	0,46	0,20	0,18	0,17

7.2 Categorie A

Machines binnen categorie A zijn veelal moderne kleine machines (<56 kW voor Stage V en <75 kW voor Stage IIIB). Enkele oudere machines vallen ook onder categorie A. Voor categorie A geeft de AUB-methode met de voorgestelde bijgestelde coëfficiënten wat lagere NO_x-emissies dan de AUB methode voorheen. De U-methode is ook wat omlaag geschaald. De methodes over het algemeen relatief dicht bij de gemeten waardes, zie Figuur 7.2

Ook voor categorie A is de RMSE bepaald, maar hierbij zijn de resultaten van de machines gemiddeld, aangezien er te weinig machines van deze categorieën in de dataset zitten om een realistische weging naar de vloot uit te voeren. Voor categorie A representeert de bijgestelde AUB-methode het best de gemeten NOx, deze ligt 64% lager dan de oude AUB-methode (resp. 0,05 en 0,14). De NO_x/CO_2-methode representeert de gemeten NOx met een RMSE van 0,11. De RMSE van de U-methode is verlaagd met 24% met de bijgestelde coëfficiënt (resp. 0,12 en 0,16). De AUB-methode is hiermee de meest nauwkeurige methodiek voor de categorie A, gevolgd door de NO_x/CO_2 en U-methode.



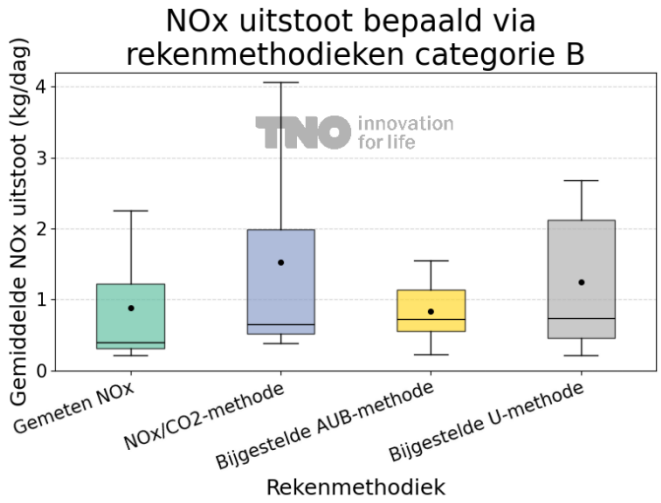
Figuur 7.2: Oude rekenmethodieken vergeleken met gemeten waardes voor 13 machines in klasse A. Het zwarte punt geeft het gemiddelde weer.

7.3 Categorie B

Categorie B is een groep waar veel verschillen tussen zitten, er zitten wat oudere machines tussen (bijvoorbeeld categorie IIIA) maar ook hele moderne grote machines. Deze machines zijn gegroepeerd vanwege de vergelijkbare wettelijke emissielimieten maar laten een variabele uitstoot zien in de praktijk. Ook zijn er binnen de dataset vijf machines langdurig gemeten, wat weinig is vergeleken met categorie A en D.

Figuur 7.3 geeft de verschillen binnen de rekenmethodieken weer, waarbij de NO_x/CO_2-methode de uitstoot over het algemeen overschat. En de bijgestelde methodieken meer in de buurt komen van de gemeten waarden.

De RMSE van de NO_x/CO_2-methode bedraagt 0,74. De bijgestelde U-methode geeft met een gemiddelde RMSE die 33% lager ligt dan de RMSE van de oude coëfficiënt (resp. 0,46 en 0,69) een verbetering. Voor de AUB-methode ligt gemiddeld de RMSE van de nieuwe coëfficiënten hoger dan de voorheen vastgestelde AUB-methode (0,36 en 0,28). Dit komt echter door één machine met een hoge totale uitstoot. Voor de andere machines waren de bijgestelde coëfficiënten een verbetering of gelijkblijvend vergeleken met de eerder coëfficiënten. Deze coëfficiënten van de individuele machines zijn weergegeven in Bijlage B. De AUB-methode is hiermee de meest nauwkeurige methodiek voor de categorie B, gevolgd door de U-methode.



Figuur 7.3: Rekenmethodieken vergeleken met gemeten waardes voor 5 machines in klasse B. Het zwarte punt geeft het gemiddelde weer.

8 Conclusies

Uit de analyse van beschikbare praktijkdata en rekenmethodieken blijkt dat de nauwkeurigheid van NO_x-emissiebepalingen sterk afhankelijk is van de beschikbare invoergegevens. Directe meting van NO_x-concentraties in combinatie met uitlaatmassastroom (bepaald aan de hand van een MAF sensor) levert veruit de meest betrouwbare resultaten op en vormt daarmee de referentie voor alle andere methoden. Wanneer MAF- of brandstofsignalen op 1Hz ontbreken, bieden de indirecte rekenmethodes in het algemeen een betere voorspellende NO_x-waarde.

De AUB-methode, die AdBlue, draaiUren en Brandstofverbruik combineert, is de meest nauwkeurige berekeningsmethode voor machines met SCR wanneer geen directe NO_x-metingen beschikbaar zijn. De betrouwbaarheid van deze methode staat of valt echter met een juiste bepaling van het AdBlue-verbruik. In de praktijk wordt dit verbruik vaak niet structureel bijgehouden, waardoor vaak standaardpercentages worden toegepast (bijv. 6% of 7%). Dit leidt tot aanzienlijke variatie in de nauwkeurigheid. Een nieuwe analyse toont aan dat een schatting van het AdBlue-verbruik op basis van de berekende belastingsgraad een nauwkeurig alternatief biedt. De analyse is gebaseerd op daggemiddelde meetdata van 70 machines. Ook zijn de coëfficiënten voor categorie A en B machines aangepast. Deze nieuwe cijfers en aanvullende methode zijn aangeleverd en voorgesteld als onderdeel van de actualisatie AERIUS 2026.

Voor situaties waarin AdBlue-gegevens ontbreken, blijkt de ontwikkelde UB-methode ook een versimpeld alternatief. Deze methode, ook gebaseerd op daggemiddelde meetdata van 70 machines, sluit goed aan op werkelijk gemeten emissies. De bijgestelde U-methode, waarbij alleen draaiuren beschikbaar zijn, geeft een robuustere schatting dan de oudere versie, maar blijft qua nauwkeurigheid in het algemeen beperkter doordat motorbelasting niet kan worden meegenomen.

De nieuwe en bijgestelde methodieken zorgen in veel gevallen voor een lagere NO_x-uitstoot dan met de huidige methodieken/coëfficiënten. Tegelijkertijd sluiten deze beter aan bij gemeten praktijkemissies en bieden daarmee een realistischer en betrouwbaarder inzicht.

Tot slot wordt geconcludeerd dat de beschikbaarheid van praktijkdata essentieel is voor verdere verbetering van emissieberekeningen. De toename van meetdata in recente jaren maakt het mogelijk om rekenregels nauwkeuriger af te stemmen op het werkelijke gedrag van moderne dieselmotoren en nabehandelingssystemen. Het verdient daarom aanbeveling om structureel NO_x- en machinegegevens te blijven verzamelen om de methodieken actueel en effectief te houden. Momenteel loopt het grootschalige meetprogramma vanuit Topsector Logistiek nog door, waarmee nog veel extra data verzameld wordt, mogelijk wel twee tot drie keer meer data dan nu gebruikt. Het wordt daarom aanbevolen om de methodieken te vergelijken met de uitkomsten wanneer er minimaal een half jaar aan emissiedata verzameld is.

Referenties

[1] P. van Mensch, M. Steinmetz, M. Elstgeest en T. Oosterbeek, „Ontwikkeling van meetmethoden voor emissietesten en NO_x-monitoring bij mobiele werktuigen," TNO, Den Haag, 2025.

[2] TNO R12305, „AUB (AdBlue verbruik, Uren, en Brandstofverbruik): een robuuste schatting van NO_x en NH_3 uitstoot van mobiele werktuigen.," 2021.

[3] N. Ligterink en P. van Mensch, „U-methode, NO_x en NH_3 emissies van mobiele werktuigen op basis van draaiuren aleen," TNO, Den Haag.

Ondertekening

TNO Mobility & Built Environment Den Haag, 18 mei 2026

ValidSigned by Tim Dijkmans
on 18-05-2026

Tim Dijkmans
Plv. Research Manager

ValidSigned by Pim van Mensch
on 18-05-2026

Pim van Mensch
Auteur

Bijlage A

Uitleg formules rekenmethode 1

Om de NO_x-concentratie om te rekenen naar totale NO_x-uitstoot is de stroomsnelheid van de uitlaat nodig. Formule 1 berekent de totale NO_x-uitstoot. De gemeten NO_x-concentraties worden vermenigvuldigd met totale massastroom door de uitlaat (Exhaust Mass Flow (EMF)), en de fractie van de molaire massa van NO_x ten opzichte van uitlaatgas.

Formule 1:

$$NO_x\ mass[kg] = \frac{\overline{NO_x}[ppm] * gewicht\ uitlaatgas[kg] * M_{nox}\left[\frac{g}{mol}\right]}{M_{uitlaatgas}\left[\frac{g}{mol}\right] * 10^6}$$

Om de stroomsnelheid van de uitlaat te bepalen wordt een MAF sensor van de motor gebruikt of, indien niet aanwezig, erbij geplaatst bij de luchtinlaat van de motor. De stroomsnelheid door de inlaat wordt opgeteld bij de grammen brandstof dat verbruikt wordt. Samen vormen deze de totale massastroom door de uitlaat. Formule 2 wordt gebruikt om de massastroom door de uitlaat te bepalen:

Formule 2:

$$Uilaat\ massstroom\ (EMF)\left[\frac{g}{s}\right] = MAF\left[\frac{g}{s}\right] + Brandstofverbruik\left[\frac{g}{s}\right]$$

De massastroom van de brandstof wordt indien beschikbaar bepaald door signalen uit de CAN-bus. Als dit niet het geval is kan het brandstofverbruik worden bepaald aan de hand van het zuurstofpercentage in de uitlaat in combinatie met de metingen van de MAF-sensor. In formule 3 wordt het brandstofverbruik berekend.

Formule 3:[16]

$$Brandstofverbruik\ \left[\frac{g}{s}\right] = MAF\left[\frac{g}{s}\right] * \frac{20.9476 - O_2[\%vol]}{304.557}$$

[16] Een constante berekend met formule: ambientO2[%]*air to fuel ratio=20.9476*14.539.

Bijlage B

Root mean squared error UB-methode voor categorie B machines

De onderstaande tabel geeft de RMSE weer van de individuele categorie B machines. Deze zijn weergegeven voor de “oude” AUB en bijgestelde AUB-methode. De machine die sterk afwijkt van de groep is in het rood weergegeven.

Tabel B.1: Root mean squared error berekend voor de oude AUB en bijgestelde AUB-methode. In rood de machine die sterk afwijkt van de groep.

Machine	Root mean_AUB	Root mean_ bijgestelde AUB
1	0,35	0,86
2	0,21	0,18
3	0,10	0,09
4	0,19	0,12
5	0,56	0,52

Mobility & Built Environment

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

TNO innovation for life