

# U-methode, NO<sub>x</sub> en NH<sub>3</sub> emissies van mobiele werktuigen op basis van draaiuren alleen

TNO 2023 R11233 – 30 juni 2023

## U-methode, NOx en NH3 emissies van mobiele werktuigen op basis van draaiuren alleen

### Rapport subtitel

|                     |  |
|---------------------|--|
| Auteurs             |  |
| Rubricering rapport | TNO Public   |
| Oplage              | Aantal kopieën   |
| Aantal pagina's     | 15 (excl. voor- en achterblad)   |
| Aantal bijlagen     | 0  |
| Opdrachtgever       | RWS  |
| Programmanaam       | U-methode  |
| Programmanummer     | 060.56975  |

**Alle rechten voorbehouden**

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

© 2023 TNO

# Samenvatting

Bij de beoordeling van de depositiebijdrage van projecten van Rijkswaterstaat worden, indien van toepassing, ook de stikstofemissies van activiteiten in de aanlegfase bepaald. In deze berekeningen vormen de mobiele werktuigen een belangrijke emissiebron van NO<sub>x</sub> (stikstofoxiden) en in mindere mate van NH<sub>3</sub> (ammoniak). De emissies van mobiele werktuigen kunnen in AERIUS Calculator worden berekend met de zogenoemde AUB-methode<sup>1)</sup>. Deze methode is ontwikkeld om op basis van praktijkgegevens, AdBlue, Uren, en Brandstof een nauwkeurige voorspelling te kunnen doen van de emissies.

Voor toepassing van de AUB-methode is praktijkinformatie benodigd over de draaiuren, het AdBlue- en brandstofverbruik, dit in combinatie met de machinegegevens (emissie- en vermogensklasse). De praktijkgegevens over het AdBlue- en brandstofverbruik zijn echter – vooralsnog - niet altijd beschikbaar bij projecten van Rijkswaterstaat.

Rijkswaterstaat wil daarom graag, totdat meer praktijkgegevens beschikbaar komen, een praktische, robuuste en alternatieve methode hanteren. Voor beperkte praktijkgegevens heeft TNO een aangepaste methode ontwikkeld. Het TNO rapport beschrijft deze beperkte methode.

---

<sup>1)</sup> AUB (AdBlue verbruik, Uren, en Brandstofverbruik): een robuuste schatting van NO<sub>x</sub> en NH<sub>3</sub> uitstoot van mobiele werktuigen, TNO rapport 2021 R12305 (het AUB rapport).

# Inhoudsopgave

|   |    |
|---|----|
| Samenvatting .....                      | 3  |
| Inhoudsopgave .....                     | 4  |
| 1     Inleiding .....                   | 5  |
| 2     De U-methode .....                | 7  |
| 3     Onderbouwing .....                | 9  |
| 4     Achtergrond van de metingen ..... | 12 |
| 5     Conclusies .....                  | 15 |

# 1 Inleiding

Bij de beoordeling van de depositiebijdrage van projecten van Rijkswaterstaat worden, indien van toepassing, ook de stikstofemissies van activiteiten in de aanlegfase bepaald. In deze berekeningen vormen de mobiele werktuigen een belangrijke emissiebron van NO<sub>x</sub> (stikstofoxiden) en in mindere mate van NH<sub>3</sub> (ammoniak). De emissies van mobiele werktuigen kunnen in AERIUS Calculator worden berekend met de zogenoemde AUB-methode<sup>1</sup>. Deze methode is ontwikkeld om op basis van praktijkgegevens, AdBlue, Uren, en Brandstof een nauwkeurige voorspelling te kunnen doen van de emissies.

Voor toepassing van de AUB-methode is praktijkinformatie benodigd over de draaiuren, het AdBlue- en brandstofverbruik, dit in combinatie met de machinegegevens (emissie- en vermogensklasse). De praktijkgegevens over het AdBlue- en brandstofverbruik zijn echter – vooralsnog - niet altijd beschikbaar bij projecten van Rijkswaterstaat.

Rijkswaterstaat wil daarom graag, totdat meer praktijkgegevens beschikbaar komen, een praktische, robuuste en alternatieve methode hanteren. Voor beperkte praktijkgegevens heeft TNO een aangepaste methode ontwikkeld. Uitgangspunt daarbij is dat deze vereenvoudigde methode een redelijke schatting moet geven, maar, gegeven de beperkingen, niet tot een onderschatting van de emissies mag leiden. Daarvoor is een marge bovenop de uitkomsten genomen in de aanpak, om met de hogere onzekerheid van de beperkte methode, ten opzichte van de AUB methode, om te gaan. Daarnaast is het nadrukkelijk niet de bedoeling dat de simpelere beperkte methode de AUB methode gaat vervangen: de beperkte methode is bedoeld voor de korte termijn ter overbrugging naar een situatie waarin wel voldoende praktijkgegevens beschikbaar zijn over het AdBlue- en brandstofverbruik. Dit rapport beschrijft deze methode, in de hoop daarmee ook een maatstaf te geven voor de huidige praktijk van schattingen van emissies met beperkte kennis van de inzet. De methode is in de wandelgangen al de “U-methode” gaan heten, als variant op de AUB-methode, omdat alleen machinegegevens en het aantal draaiuren “U” nodig zijn.

Met inzicht in het AdBlue-verbruik, de draaiuren, en het brandstofverbruik kan met redelijke nauwkeurigheid de daadwerkelijke uitstoot van NO<sub>x</sub> en NH<sub>3</sub> vastgesteld worden. In het bijzonder is de werking van het NO<sub>x</sub>-reductie systeem (SCR, *Selective Catalytic Reduction*) voor Stage IV en V (en in mindere mate Stage IIIB) direct gekoppeld aan het AdBlue verbruik. Daarmee geeft het AdBlue verbruik inzicht in verschillen in NO<sub>x</sub>-emissies bij verschillen van inzet, ook bij dezelfde machine. Deze verschillen kunnen zeer groot zijn. Moderne Stage IV & V machines met SCR (tussen 56 en 560 kW) kunnen een zeer lage uitstoot hebben. NO<sub>x</sub>-emissies met een factor 10 tot 20 lager dan oudere machines komen regelmatig voor.<sup>2</sup> Maar dergelijke lage emissies zijn geen gegeven. Zeker bij veel lage motorbelasting, onder de 20% van de maximale motorlast, werkt de SCR niet optimaal en kunnen emissies hoog zijn. Bij lagere motorbelasting is het brandstofverbruik ook lager, en in de praktijk zijn AdBlue-verbruik en brandstofverbruik per uur aan elkaar verbonden.

<sup>1</sup> AUB (AdBlue verbruik, Uren, en Brandstofverbruik): een robuuste schatting van NO<sub>x</sub> en NH<sub>3</sub> uitstoot van mobiele werktuigen, TNO rapport 2021 R12305 (het AUB rapport).

<sup>2</sup> Pilotproject Emissie Monitoring en Periodieke Keuring (EMPK) van bouwmachines, TNO rapport 2023 R10553.

Dit rapport beschrijft de methode om alleen op basis van draaiuren en machinegegevens, de emissies te schatten. Impliciet zit in deze aanpak het gemiddelde verband tussen brandstofverbruik en AdBlue-verbruik, omdat de SCR veelal beter werkt bij een hoger brandstofverbruik, met een proportioneel hoger AdBlue-verbruik tot gevolg. Door alleen draaiuren te gebruiken kunnen onrealistische combinaties van beide waarden, brandstof en AdBlue, niet gebruikt worden in de AUB methode. Hiermee wordt voorkomen dat de NOx-emissies te laag worden ingeschat, op papier, zonder onderliggende gegevens. In dit onderzoek wordt het verband niet expliciet vastgesteld, omdat dit maar voor een beperkt aantal machines die gemonitord zijn bekend is. In plaats daarvan is er gekeken naar de NOx-emissies per uur, de uiteindelijke uitkomst, van alle beschikbare machines. In deze meetdata is het duidelijk dat er een groot aantal machines zijn met SCR met lage tot zeer lage emissies, maar een kleine groep machines met veel hogere emissies, tot een factor 5 hoger. De schatting van de gemiddelde NOx-emissies op basis van alleen draaiuren ligt redelijkerwijs daar tussenin. Het nut van een betere bepaling van emissies op basis van gedetailleerde operationele gegevens (Adblue en Brandstof) is daarmee evident. De beperkte inzet van machines met veel hogere NOx emissies kan daarmee geëvalueerd en aangepast worden. Een andere machine gebruiken of instructies voor de operateur (zoals beperken stationair draaien), horen tot de opties. Effecten zijn zichtbaar in het veranderde AdBlue-verbruik.

## 2 De U-methode

De U-methode geeft de NO<sub>x</sub>- en NH<sub>3</sub>-emissies van mobiele machines op basis van de draaiuren en de machinegegevens. De machinegegevens vallen, afhankelijk het motorvermogen en de emissieklasse, in vijf categorieën, “X, A, B, C en D”:

Tabel 2.1: De categorieën van mobiele werktuigen X, A, B, C, en D. Er zitten grote verschillen in eisen voor verschillende vermogens in dezelfde Stage klasse. Voor elke klasse zijn er kentallen beschikbaar.<sup>1</sup>

| Classificatie | [...-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           | 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        |

De eerste toepassing van SCR in Stage IIIB had beperkte NO<sub>x</sub> reductie door de SCR, vanwege de minder strenge emissie-eisen. Pas met Stage IV en V, en de 0,4 g/kWh limiet in de laboratoriumtest, is de afhankelijkheid van de goede werking van de SCR groot geworden.

Voor de verschillende categorieën zijn de emissies per uur proportioneel met het maximaal motorvermogen van de machine. De eenheid van de kenwaarden zijn daarom in grammen per uur en per kilowatt motorvermogen [g/(u\*kW)] en moeten vermenigvuldigd worden met de uren dat de motor draait en het maximale vermogen van de motor.

Tabel 2.2: De U-methode kenwaarden, voor de verschillende categorieën, om NO<sub>x</sub> en NH<sub>3</sub> emissies te berekenen.

| 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 |
| NO <sub>x</sub> [g/(hr*kW)] | 2,7      | 1,8       | 1,3        | 1         | 0,34     |
| NH <sub>3</sub> [g/(hr*kW)] | 0,0007   | 0,0007    | 0,0007     | 0,021     | 0,021    |

Een voorbeeld van de berekening. Als een machine met SCR in categorie D (Stage IV of Stage V) met 160 kW maximaal motorvermogen voor 25 uur wordt ingezet dan is de geschatte NOx en NH3 uitstoot 1,36 kilogram en 84 gram respectievelijk:

$$\text{NOx[g]} = 160 \text{ [kW]} * 25 \text{ [hr]} * 0,34 \text{ [g/(hr*kW)]} = 1.36 \text{ kg NOx}$$

$$\text{NH3[g]} = 160 \text{ [kW]} * 25 \text{ [hr]} * 0,021 \text{ [g/(hr*kW)]} = 84 \text{ g NH3}$$

Het is ook interessant om te zien wat de verschillen zijn voor de verschillende categorieën voor dit voorbeeld:

Categorie X: 10,8 kg NOx en 2,8 gram NH3

Categorie A: 7,2 kg NOx en 2,8 gram NH3

Categorie B: 5,2 kg NOx en 2,8 gram NH3

Categorie C: 4,0 kg NOx en 84 gram NH3

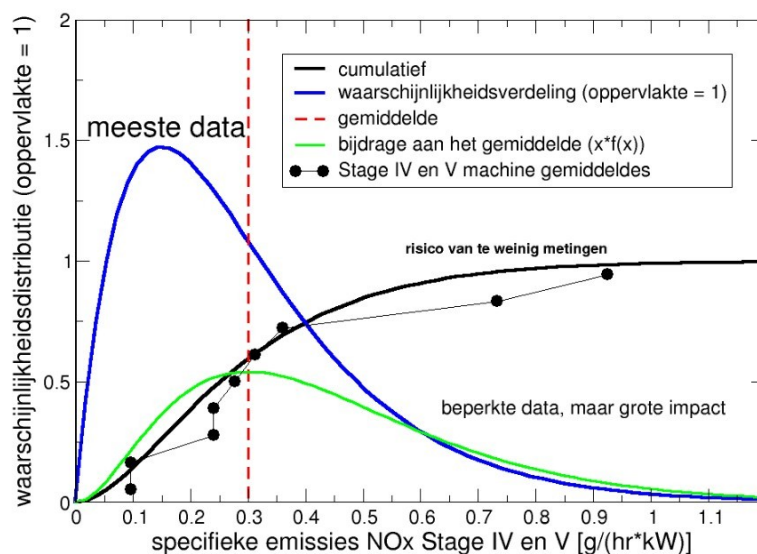
Categorie D: 1,36 kg NOx en 84 gram NH3

Dat zijn substantieel verbeteringen in de emissies met opeenvolgende emissieclassen (bij de juiste vermogenscategorie), waarbij verschillen ten gevolge van inzet veelal beperkter zijn.

### 3 Onderbouwing

Omdat voor oudere motoren, zonder SCR, de NOx en NH3 emissies direct gekoppeld zijn aan het brandstofverbruik, met verhoogde emissies voor stationair draaien, is een realistische inschatting van emissies per uur gekoppeld aan de motorbelasting. Deze waarden matchen met de gemiddelden die voor de nationale cijfers bepaald zijn, op basis van de emissiemetingen en monitoring van TNO.<sup>3</sup> Dit zijn recente inzichten voor mobiele werktuigen. In het verleden, deels gebaseerd op laboratoriumtesten en deels inschatting uit korte meetprogramma's zijn er veel hogere motorbelastingen opgegeven. Deze motorbelastingen zijn sinds 2018 meerdere keren naar beneden bijgesteld.<sup>2,4,5</sup>

De motorbelasting varieert met het type machine, maar vooral met het type inzet. Daarbovenop is de keuze van de grootte van de machine ook relevant voor de relatieve motorbelasting. Voor Stage V worden er motoren aangeboden net onder of net boven de vermogens van 56 en 560 kW, waartussen de eisen strenger zijn en de machines schoner. Sommige typen zeer grote machines, boven de 560 kW, worden mogelijk lager belast, en minder grote machines, onder de 56 kW mogelijk zwaarder. Maar dat vraagt meer gedetailleerde gegevens en de AUB methode op basis van brandstofverbruik.



Figuur 3.1: De monitoringsdata van tenminste meerdere dagen van machines die aan de 0,4 g/kWh eis moeten voldoen laat zien dat de meeste onder de 0.4 g/(hr\*kW) zitten, maar dat twee hoge waarden het gemiddelde op 0.3 g/(hr\*kW) brengen.

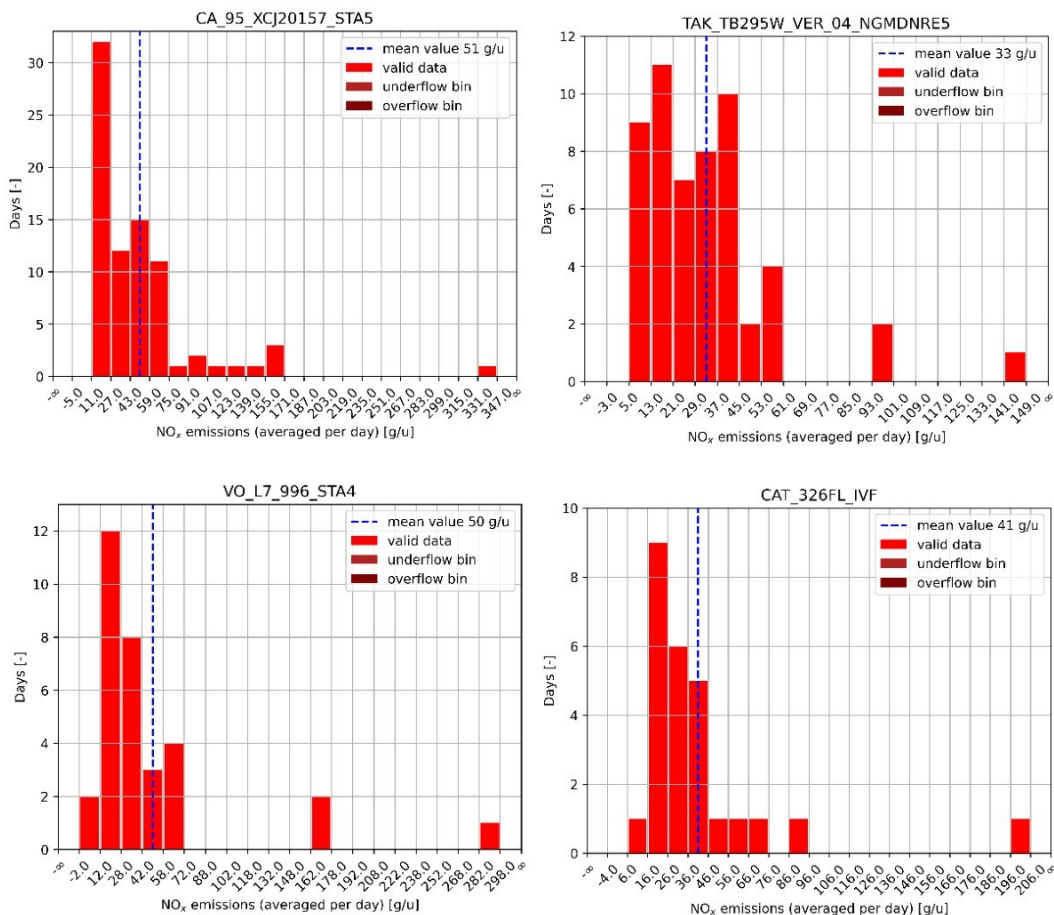
<sup>3</sup> Onderbouwing AERIUS emissiefactoren voor wegverkeer, mobiele werktuigen, binnenvaart en zeevaart, TNO rapport 2020 R11528.

<sup>4</sup> Real-world emissions of non-road mobile machinery, TNO rapport 2021 R10221.

<sup>5</sup> De inzet van bouwmachines en de bijbehorende NOx- en CO2-emissies, TNO rapport 2018 R10465.

Voor machines met SCR, Stage IV en Stage V, waren extra analyses nodig om de gram per uur te achterhalen. Zie Figuur 3.1. Als al deze data, met voldoende inzet per machine, bij elkaar genomen wordt komt het gemiddelde uit op 0,3 g/(u\*kW). Maar met twee machines met substantieel hogere waarden, en een vergelijkbaar beeld van de inzet van machines over de dagen, is een onzekerheidsmarge van 0,04 op zijn plaats.

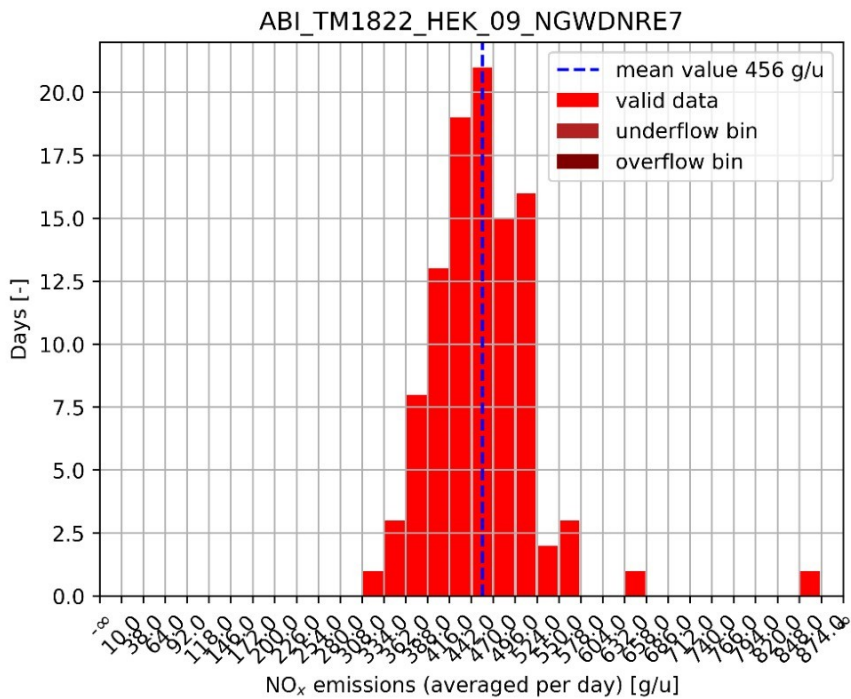
De moderne machines die typisch over een langere periode gevolgd zijn (meestal meer dan een maand), laten een grote variatie zien in g/uur emissies over de dagen. Zeker de machines met SCR hebben, met veel dagen met lagere emissies, ook dagen met emissies factoren hoger.



Figuur 3.2: De dag-tot-dag variaties in de gemiddelde emissies van moderne en verschillende Stage IV en Stage V machines met SCR laat zien dat een fractie van de dagen substantieel hogere emissies hebben dan het gemiddelde: wel 2 tot 5 keer hoger.

Machines zonder SCR laten een meer symmetrische verdeling zien, met een kleinere spreiding, zoals in het voorbeeld hieronder. Deze Stage V heimachine komt in de U-methode hoger uit dan de meetwaarde, omdat de motorbelasting veel lager is dan het geïnstalleerde vermogen van (net) boven de 560 kW, hiermee wordt de wettelijke noodzaak voor een SCR te vermeden.

Op basis van alle data gecombineerd komen de gemiddelden over het algemeen lager uit dan als er gemiddelden per dag gecombineerd worden. Bij inzet op dagen, waar de machine langer draait op een dag, zijn de emissies per uur vaak lager. De verschillende inzet van dezelfde machine, zeker de meer variabele inzet tijdens werkzaamheden bevestigd de spreiding met inzet.



Figuur 3.3: Een moderne Stage V machine met een vermogen boven de 560 kW heeft een gemiddelde uitstoot van 456 g/uur. Dat is lager dan de verwachte 736 g/uur emissies voor deze categorie B mobiele machine, omdat de gemiddelde motorbelasting laag is.

Omdat er geen rekening gehouden kan worden met de specifieke inzet, in de U-methode, is het belangrijk om een marge aan te nemen, zodat de methode niet tot een onderschatting leidt. Daarvoor is er een inschatting gemaakt van de kansverdeling van de emissies per machine en per dag, in Figuur 3.1. Deze gebruikt om te bepalen dat met de kenwaarden voor twee van de drie machines de kenwaarde een onderschatting is en voor een derde een overschatting.

## 4 Achtergrond van de metingen

Sinds 2017 worden door TNO uitgebreide praktijk emissiemetingen uitgevoerd aan mobiele werktuigen. Deze metingen zijn nodig zodat een breder inzicht in de daadwerkelijke emissies ontstaat. De resultaten worden in Nederland gebruikt bij berekeningen aan luchtkwaliteit en stikstofdepositie, en rapportage over de vermindering van de totale milieuverontreinigende emissies.

Voor het meten van praktijkemissies worden zowel langdurige monitoring als kortstondige metingen gebruikt. Langdurige monitoring duurt meestal weken tot maanden en biedt gedetailleerd inzicht in het emissiegedrag en het gebruik van mobiele machines in verschillende praktijksituaties. TNO heeft het Smart Emissions Measurement System (SEMS) ontwikkeld om deze langdurige monitoring uit te voeren. SEMS is een compact en eenvoudig in te bouwen systeem dat gebruikmaakt van sensoren. Het meten gebeurt autonoom, zonder dat de machinist het merkt, waardoor er gedurende langere tijd metingen kunnen worden verricht en er grote hoeveelheden praktijkdata kunnen worden verzameld.

Voor kortstondige metingen van stikstofoxiden (NOx) heeft TNO een draagbaar emissiemeetsysteem ontwikkeld, waarbij dezelfde sensoren als bij SEMS worden gebruikt. Dit systeem kan naast de machine worden geplaatst of met zuignappen worden bevestigd. In het laatste geval kan de machine meestal blijven functioneren in reguliere operatie. Als dit niet mogelijk of nodig is, worden de metingen uitgevoerd terwijl de machine stilstaat. Hierbij wordt bij voorkeur gemeten bij verschillende motorbelastingen en met een warme en koude motor. De metingen kunnen variëren in duur, van 10 minuten tot een hele werkdag.

De categorie 'mobiele werktuigen' omvat een divers scala aan machine- en toepassingstypen. Binnen deze categorie vallen onder andere grote graafmachines, walsen, laadschoppen, heimachines, stroomaggregaten, pompen en kleinere machines zoals trilplaten. Bovendien bestaan er verschillende emissieklassen en vermogensklassen die relevant zijn voor de emissie-eisen. Dit resulteert in een grote verscheidenheid aan machines.

TNO probeert de grote verscheidenheid aan materieel op te nemen in de meetprogramma's. Details over de meetprogramma's zijn samengevat in de drie onderstaande rapporten:

1. TNO 2023 R10553: Pilotproject Emissie Monitoring en Periodieke Keuring (EMPK) van bouwmachines
2. TNO 2021 R10221: Real-world emissions of non-road mobile machinery
3. TNO 2018 R10465: De inzet van bouwmachines en de bijbehorende NOx- en CO2-emissies

Tabel 3 geeft een overzicht van het aantal gemeten mobiele werktuigen in de diverse meetprogramma's. Hierbij is ook rekening gehouden met de machines die het meest voorkomen. Diesel aangedreven materieel wat veel voorkomt zijn bijvoorbeeld graafmachines, wielladers, landbouwtrekkers en generatorsets.

In de meetprogramma's zijn deze machinetypen dan ook in meerdere varianten onderzocht qua impact op emissies. Daarnaast zijn ook allerlei andere machines onderzocht, zoals een: asfalteermachine, wals, verreiker, hoogwerker, heftruck, bronbemaalingspomp, lichtmast, mobiele compressor, heimachine, boorinstallatie, betonmixer, kraan en een trilplaat. Naast deze mobiele werktuigen die op het land worden ingezet, zijn ook emissiemetingen uitgevoerd aan werkschepen, diesellocomotieven en spoorbouwmachines.<sup>6,7</sup>

Tabel 4.1: Overzicht van het aantal gemeten mobiele werktuigen in de diverse meetprogramma's, per vermogen-Stage combinatie.

| Tabel 4.1     | Pre-Stage | Stage II | Stage IIIa | Stage IIIb | Stage IV | Stage V |
|---------------|-----------|----------|------------|------------|----------|---------|
| <19kW         | 1         |          |            |            |          | 6       |
| 18/19 - 37 kW |           | 1        | 2          |            |          |         |
| 37 - 56 kW    | 2         | 3        | 2          |            | 4        | 3       |
| 56 - 75 kW    |           |          |            |            |          |         |
| 75 - 130 kW   | 1         |          | 1          | 3          |          |         |
| 130 – 560 kW  | 1         |          | 1          | 1          | 1        | 7       |
| >560 kW       | 3         |          |            |            |          | 1       |
|               |           |          |            |            |          |         |

Tabel 4 hieronder dient voor een groot deel als basis voor de U-methode, zoals ook toegelicht in Hoofdstuk 3. Dezelfde dataset is ook gebruikt als basis voor AUB, dan wel ter validatie. Dit zijn alle Stage IV en V machines met SCR (categorie D) die uitvoerig zijn gemeten in de TNO-meetprogramma's (de meeste meerdere maanden). De tabel laat een duidelijke spreiding zien in de NOx-uitstoot per uur, net als voor de gemiddelde motorbelasting.

Tabel 4.2: Overzicht van de gemeten Stage IV en V mobiele werktuigen met SCR met langdurige monitoring.

| Type_vermogen_Stage                      | Gem. Motorbelasting | Max. Motorvermogen | NOx gemiddeld | NOx gemiddeld |
|--|---------------------|--------------------|---------------|---------------|
|  | %                   | kW                 | g/u           | g/(u*kW)      |
| Asfalteermachine_129_V                   | 36%                 | 129                | 11            | 0,08          |
| Graafmachine_85_V                        | 23%                 | 85                 | 19            | 0,23          |
| Graafmachine_85_V                        | 40%                 | 85                 | 7,0           | 0,08          |
| Wiellader_171_V                          | 35%                 | 171                | 35            | 0,20          |
| Tractor_114_IV                           | 30%                 | 114                | 70            | 0,61          |
| Graafmachine_152_IV                      | 42%                 | 152                | 31            | 0,20          |
| Terminal trekker_115_V                   | 11%                 | 115                | 88            | 0,77          |
| Wiellader_127_IV                         | 35%                 | 127                | 38            | 0,30          |
| Graafmachine_129_IV                      | -                   | 129                | 34            | 0,26          |
| Pomp_340_retrofit SCR (hoge belasting) * | 21%                 | 340                | 8             | 0,02          |
| Boor_205 kW_V *                          | 24%                 | 205                | 8             | 0,04          |

\* Kortstondige meting in plaats van langdurige monitoring, niet meegenomen in de analyses van emissies bij normaal gebruik

<sup>6</sup> Inzicht in het energieverbruik, de CO2 uitstoot en de NOx-uitstoot van het spoorgoederenvervoer, TNO rapport 2017 R11414.

<sup>7</sup> Inventarisatie en categorisatie huidige en toekomstige aanbod duurzame mobiele werktuigen, bouwlogistieke voertuigen, spoorwerktuigen en vaartuigen die worden ingezet voor de waterbouw, TNO rapport 2022 R11048.

Om een indicatie te geven van de emissieprestaties van machines zonder SCR geeft Tabel 5 een overzicht van machines zonder SCR. Deze tabel bevat zowel resultaten van langdurige monitoring als van kortstondige metingen. De kortstondige metingen zijn alleen van het stationair materieel. Dit betreft slechts een deel van alle meetresultaten, er zijn nog tientallen andere machines onderworpen aan kortstondige metingen.

Tabel 5 laat duidelijk zien dat machines zonder SCR fors hogere emissies hebben dan de machines met SCR in Tabel 4 (ondanks de spreiding in beide tabellen). Daarnaast is het duidelijk dat de Stage IIIA, II en 'geen eis' machines de hoogste emissies hebben in g/(u\*kW). Aangezien ook in Tabel 5 de gemiddelde motorbelasting varieert, zijn de meetresultaten niet een op een vergelijkbaar. Machines zonder SCR hebben in het algemeen hogere emissies bij een hogere motorbelasting. Illustratief daarvoor is de heimachine met 570 kW, deze geeft een fors lagere emissie in g/(u\*kW), dit komt door de gemiddelde motorbelasting van 9%. Voor de emissie-kentallen wordt hier rekening mee gehouden, net als bijvoorbeeld veroudering. Meetresultaten zijn daarom niet direct te gebruiken als emissie-kentallen. Voor zowel de AUB-methode als de U-methode wordt een goede staat van de machine aangenomen.

De gemeten machines zijn allemaal onderdeel van de dataset die gebruikt is voor kentallen van zowel de nationale getallen, als de AUB methode als de U methode. In het algemeen geeft de U-methode wat hogere emissies dan de meetresultaten, met uitzondering van machines die een hogere gemiddelde motorbelasting hebben dan verwacht. Wanneer de motorbelasting in de praktijk zeer laag is, dan zijn de resultaten van de U-methode flink hoger dan de meetresultaten. Indien het brandstofverbruik of de motorbelasting bekend is, en daarmee de AUB methode gebruikt kan worden, nemen de afwijkingen ten opzichte van de metingen af.

Tabel 4.3: Overzicht van de gemeten mobiele werktuigen zonder SCR, bevat zowel machines met langdurige monitoring alsook kortstondige metingen.

| Type_vermogen_Stage     | Gem. Motor-belasting | Max. Motor-vermogen | NOx gemiddeld | NOx gemiddeld |
|-------------------------|----------------------|---------------------|---------------|---------------|
|                         | %                    | kW                  | g/u           | g/(u*kW)      |
| Heimachine_563_V        | 11%                  | 563                 | 499           | 0,89          |
| Wals_55_V               | 20%                  | 54,6                | 53            | 0,98          |
| Graafmachine_42_V       | 39%                  | 42                  | 56            | 1,33          |
| Graafmachine_52_V       | 30%                  | 52                  | 71            | 1,37          |
| Graafmachine_18_V       | -                    | 18,5                | 36            | 1,95          |
| Laadschop_129_IIIB      | -                    | 129                 | 141           | 1,09          |
| Graafmachine_159_IIIB   | -                    | 159                 | 149           | 0,94          |
| Pomp_33_IIIA            | 35%                  | 33                  | 69            | 2,09          |
| Genset_48_IIIA          | 23%                  | 48                  | 103           | 2,15          |
| Genset_41_II            | 66%                  | 41                  | 140           | 3,41          |
| Genset_19_II            | 39%                  | 19                  | 50            | 2,63          |
| Lichtmast_12_geen eis   | 58%                  | 12                  | 65            | 5,42          |
| Heimachine_570_geen eis | 9%                   | 570                 | 486           | 0,85          |
| Genset_770_geen eis     | 46%                  | 770                 | 4143          | 5,38          |

## 5 Conclusies

Dit rapport geeft een handvat om NOx en NH3 uitstoot te bepalen van mobiele machines als alleen de draaiuren voorhanden zijn, zonder daarmee gemiddeld een onderschatting te geven. Voor moderne machines Stage IV en Stage V met SCR strekt het de aanbeveling om de operationele gegevens uit de praktijk te verkrijgen, omdat machines veel lagere emissies kunnen hebben, bij goede inzet, dan gemiddelde kenwaarden die hier gegeven worden. De hoogte van de kenwaarden worden mede bepaald door een kleine groep machines met substantieel hogere emissies, en daarmee het beperken van het risico op een onderschatting van de NOx uitstoot. De resultaten zijn gebaseerd op het gemiddelde van een scheve verdeling van uitstoot van machines.

Voor oudere machines zijn de NOx emissies gekoppeld aan het totale brandstofverbruik. De inschatting van het brandstofverbruik is gekoppeld aan de gemiddelde motorbelasting. Deze is ingeschat op 35% van de maximale motorbelasting. Dit komt grofweg overeen met de gemiddelde waarden die in de praktijk worden gezien.

Indien praktijkgegevens beschikbaar zijn zou de AUB methode gehanteerd moeten worden, omdat dit de effecten op de uitstoot van concrete machine- inzet meeneemt. Bovendien, zijn in de uitvoeringfase de gegevens zoals draaiuren, brandstofverbruik, en AdBlue-verbruik te registreren en te controleren, zodat daarmee duidelijk wordt of aan de voorwaarden, aangaande de uitstoot van NOx en NH3 aan de vergunning of afspraken voldaan worden.

# Ondertekening

TNO Mobility & Built Environment Den Haag, 28 juni 2023



Research Manager



Auteur

Mobility & Built Environment

Anna van Buerenplein 1  
2595 DA Den Haag  
[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

**TNO** innovation  
for life