

Memo

Aan RIVM/AERIUS
Van Pim van Mensch & Mitch Elstgeest
Onderwerp Bronkarakteristieken mobiele werktuigen

www.tno.nl
pim.vanmensch@tno.nl
+31652803662

Datum
28 oktober 2024
Onze referentie
2024-STL-MEM-100354884v2

1. Inleiding

De verspreiding van schadelijk uitlaatgas hangt samen met de weersomstandigheden, de uitstoetsnelheid - richting en -hoogte, maar vooral ook de warmte in het uitlaatgas. Warm gas stijgt op, en als het uitlaatgas enkele meters boven de grond is verwaait het sneller. De verspreidingsmodellen zijn daarom zeer gevoelig voor deze aspecten van uitlaatgas. Schadelijke emissies van machines worden tegenwoordig niet zozeer bepaald door de grootte van de machines, maar door de emissie-eisen aan de machine en de beperkingen van de wetgeving. Kleine moderne machines zijn over het algemeen in absolute niveaus viezer dan de grote moderne machines, en de grote machine hebben de hoogste absolute emissies bij de laagste motorlast. In de laatste jaren is voor grotere moderne machines het beeld veranderd, door brede toepassing van katalysatoren voor het reduceren van schadelijke emissies uit motoren. Als de katalysator warm is, zijn de emissies laag, maar als de katalysator koud is, na een start van de motor, of bij langdurige lage motorlast, zijn de emissies zeer hoog.

RIVM heeft TNO gevraagd om deze aspecten van bronkarakteristieken op een rij te zetten. De focus ligt hierbij op karakteristieken bij lage motorbelasting. Omdat de uitstoot dan hoog is, is dit belangrijke input voor modelberekeningen rondom dispersie en depositieberekeningen.

In deze notitie wordt eerst ingegaan op de emissieniveaus van mobiele werktuigen wanneer de katalysator niet op bedrijfstemperatuur is. De informatie hiervoor is gebaseerd op een (emissie)meetprogramma met mobiele werktuigen uit 2023. Het meetprogramma is door TNO uitgevoerd, in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. De resultaten hiervan zijn recent gepubliceerd in TNO rapport 2024 R11077 "*Opties voor monitoring van de NO_x-emissies van mobiele werktuigen*". Daarna wordt ingegaan op de volumestroom van het uitlaatgas bij lage motorbelasting. Hierbij wordt rekening gehouden met de verschillende motorgroottes die worden toegepast bij mobiele werktuigen. Vervolgens wordt ingegaan op de bronkenmerken gerelateerd aan uitlaatgastemperatuur en volumestromen. Hierbij wordt ingegaan op uitlaatgastemperaturen bij een niet werkende SCR-katalysator⁷ en op de uitlaatgasvolumestroom die daarbij hoort. Tot slot wordt ingegaan op technische bronkenmerken zoals de plaatsing van uitlaten, de diameter van uitlaten en de configuratie van uitworp.

2. Uitstootniveaus

Moderne machines (Stage IV en V machines met een motorvermogen tussen de 56 en 560 kW) zijn uitgerust met een SCR-katalysator om de NO_x-emissie te reduceren. De SCR-katalysator dient op bedrijfstemperatuur te komen om goed te kunnen functioneren. Vlak na een start (met koude motor), of tijdens inzet met een te lage motorbelasting (zoals stationair draaien, of andere inzet met lage motorlast), wordt deze bedrijfstemperatuur niet bereikt of vastgehouden. De emissies gedurende de tijd dat de SCR-katalysator niet op bedrijfstemperatuur is, zijn dominant in de totale emissies.

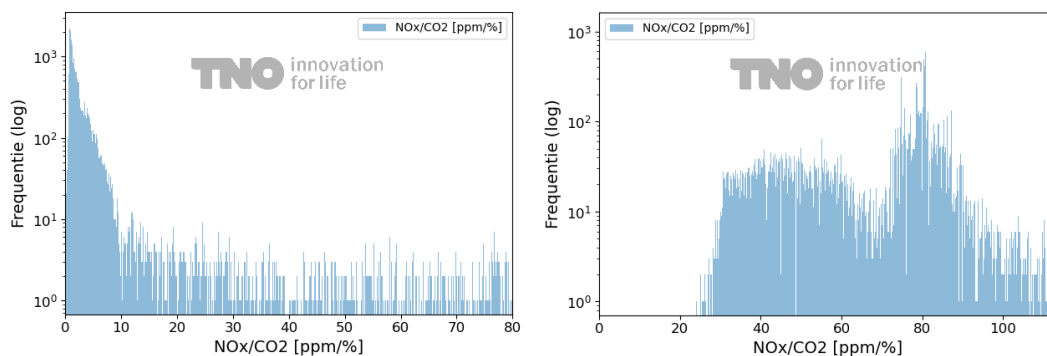
⁷ SCR staat voor (in het Nederlands) Selectieve Katalytische Reductie, het werkingsprincipe van de katalysatoren die zijn toegepast om NO_x-emissies te reduceren.

Zelfs als de mobiele machine minder dan 10% van de tijd de SCR katalysator niet functionerend heeft, wordt het grootste deel van de NO_x-emissies gedurende die tijd uitgestoten. In de TNO-rapportage 2024 R11077 is op basis van gemonitorde emissies bij diverse mobiele werktuigen (onder andere) een korte analyse beschreven rondom de impact op emissies door een te koude SCR-katalysator. Hieronder wordt deze analyse beknopt weergegeven.

Op basis van de NO_x/CO₂-verhouding kan het aandeel van de tijd waarin de SCR-katalysator goed functioneert redelijk goed benaderd worden. Als uitgangspunt in deze studie is aangenomen dat de SCR-katalysator goed functioneert wanneer de uitstoot onder de wettelijke emissielimiet van 0,4 gNO_x/kWh blijft. Een grove inschatting van de grammen NO_x per kWh - op basis van de NO_x/CO₂ ratio - kan gemaakt worden door het motorrendement theoretisch te benaderen. Als voorbeeld: stel dat het motorrendement 740 gCO₂/kWh is bij een gemiddelde inzet van 30% motorbelasting, en dat de NO_x/CO₂ verhouding 6 ppm/% is. Dan kan de gemiddelde (groveweg) gNO_x/kWh ingeschat worden op: $6/10 \cdot 740/1000 = 0,44$ g/kWh. Bij een hoger motorrendement, bijvoorbeeld 670 gCO₂/kWh, zou de ingeschatte gNO_x/kWh op 0,40 uitkomen. Afhankelijk van het motorrendement zal de theoretische benadering van de emissielimiet (0,4 g/kWh) op een NO_x/CO₂ verhouding tussen de 5 en 6 ppm/% uitkomen.

In dit onderzoek zijn alle waarden onder de 6 ppm/% aangenomen als 'SCR aan', en alle waarden boven de 6 ppm/% als 'SCR uit'. In de praktijk is de scheiding niet zo zwart-wit, en zal de SCR ook nog (deels) functioneren bij waarden boven een NO_x/CO₂ ratio van 6 ppm/%, de waarden zullen dan wel veelal boven de emissielimiet liggen.

Figuur 1 geeft een histogram van de NO_x/CO₂ ratio weer van een machine met SCR-katalysator (links) en een machine zonder SCR-katalysator (rechts). Deze histogrammen bevestigen dat bij de machine met SCR-katalysator de NO_x/CO₂ ratio's van onder de 5 ppm/% veruit het meeste voorkomen (merk op dat de schaal logaritmisch is). Het histogram van de machine zonder SCR-katalysator begint pas boven de 20 ppm/%, dit impliceert dat wanneer de SCR volledig uit zou zijn, de NO_x/CO₂ verhouding fors hoger is dan de gehanteerde 6 ppm/%.



Figuur 1: Histogram NO_x/CO₂ ratio van machine met SCR-katalysator (links) en machine zonder SCR-katalysator (rechts), y-as is logaritmisch.

Tabel 1 laat voor de gemonitorde machines (uit de hierboven genoemde rapportage) met een SCR zien gedurende welk aandeel van de tijd hun SCR's 'aan' of 'uit' stonden. Hieruit blijkt dat de SCR's van de machines over een relatief groot deel van de tijd 'aan' stonden en goed werkten. Echter, voor 7-29 % van de totale tijd staan de SCR's uit, met wel 15 tot 140 keer hogere emissies tot gevolg dan bij SCR 'aan'. Hierdoor heeft 66 tot 94% van de NO_x-uitstoot van de machines plaatsgevonden in de periode dat de SCR 'uit' stond. De hoogste percentages komen veelal voor bij machines met een hoog tijdsaandeel 'SCR uit'. De Dynapac 2500 is hierop een uitzondering, bij deze machine is het tijdsaandeel 'SCR uit' laag, maar de NO_x bijdrage bij 'SCR uit' alsnog zeer hoog.

Dit is te verklaren door de zeer effectieve SCR (lage NO_x/CO₂ ratio bij 'SCR aan'). De aandelen SCR aan/uit kunnen daarom niet los gezien worden van de NO_x/CO₂ ratio's.

Tabel 1: Inschatting van het tijdstaandeel SCR uit (>6 ppm/%) en van SCR aan (<6 ppm/%), inclusief bijbehorende gemiddelde NO_x/CO₂-ratio's en inschatting van het aandeel SCR uit/aan in de NO_x-uitstoot, bij vijf machines met een SCR-katalysator.

	BOM BF700		Dynapac 2500		VOG_1800i		WIR_250_1		WIR_250_2		LIE_R926W	
	SCR uit	SCR aan	SCR uit	SCR aan	SCR uit	SCR aan	SCR uit	SCR aan	SCR uit	SCR aan	SCR uit	SCR aan
Tijd [%]	9	91	7	93	25	75	29	71	11	89	19	81
Gemiddelde NO _x /CO ₂ [ppm/%]	46	1,9	57	0,4	34	0,8	36	1,3	30	1,9	56	1,5
Totale NO _x [%]	71%	29%	92%	8%	94%	6%	92%	8%	66%	34%	90%	10%

3. Volumestroom en warmtestroom van het uitlaatgas

Naast de uitstootniveaus zijn ook de volumestroom en de warmtestroom van het uitlaatgas van belang voor de depositieberekeningen. De uitlaatgastemperatuur en volumestroom waarbij de meeste uitstoot plaatsvindt zou maatgevend moeten zijn voor de modelinvoer voor dispersie- en depositieberekeningen.

Volumestroom

De uitlaatgasstroom van dieselmotoren wordt grotendeels bepaald door de inhoud en de snelheid van de motor. Bij lage gevraagde vermogens gaat er vooral veel lucht door de motor en minder verbrandingsproducten. De lucht-brandstof verhouding kan sterk variëren, bij inzet maar ook tussen motoren, en dat heeft directe gevolgen voor de volumestroom, maar ook de temperatuur van het uitlaatgas. Het uitlaatgas neemt een deel van de warmte weg die bij verbranding ontstaat.

De typische volumestroom (ook wel debiet genoemd) is voor Nederlandse buitentemperaturen:

$$Q[\text{Nm}^3/\text{hr}] = 0.9 * 60 * \text{toerental}[\text{min}^{-1}] * \text{Motorinhoud}[\text{liters}] / 2 / 1000$$

Hierbij is uitgegaan van inactieve turbo, waardoor een volumetrisch rendement van 0.9 gehanteerd is. Door drukverschillen wordt het volledige motorvolume namelijk niet 100 % gevuld. Bij een actieve turbo gaat dit rendement omhoog. De vermenigvuldiging van het toerental met 60 is om het aantal omwentelingen per uur te bepalen. Bij een viertaktmotor wordt elke 2 omwentelingen het motorvolume verpompt. Het motorvolume is in liters en de Q wordt bepaald in kubieke meters. Daarom wordt het geheel gedeeld door 2 en vervolgens door 1000.

De turbo, die meer lucht de motor in perst, en de uitlaatgasrecirculatie (EGR), die onder bepaalde condities een deel van het uitlaatgas weer terug de motor in leidt, zijn niet of nauwelijks actief bij lage motorlast waar de hoogste schadelijke uitstoot is. In deze gevallen, waarbij de motorsnelheid typisch 850 RPM bedraagt, is het genormaliseerde volume alleen een functie van motorinhoud:

$$Q[\text{Nm}^3/\text{hr}] = 23 * \text{Motorinhoud}[\text{liters}]$$

Daarbij is uitgegaan van lage motorbelasting en een volumetrisch rendement van 0.9 (zonder actieve turbo of EGR):

$$0.9 * 60 * 850 / 2 / 1000 = 23 \text{ [Nm}^3\text{/hr per liter motorinhoud]}$$

Warmtestroom

In AERIUS, de rekentool voor stikstofdepositie worden diverse vermogensklassen gehanteerd voor machines. Tabel 2 toont de berekende warmtestroom per AERIUS-vermogensklasse, op basis van uitlaatgasdebiet en uitlaatgastemperatuur. De warmtestroom is berekend met behulp van onderstaande formule (TNO-034-UT-2010-01108_RPT-ML). Tot nu toe wordt in AERIUS voor alle vermogensklassen gerekend met 35 kW aan warmtestroom.

$$Q_w \text{ [kW]} = 0.0013 \times V_n \times (T_g - 288) * 1000$$

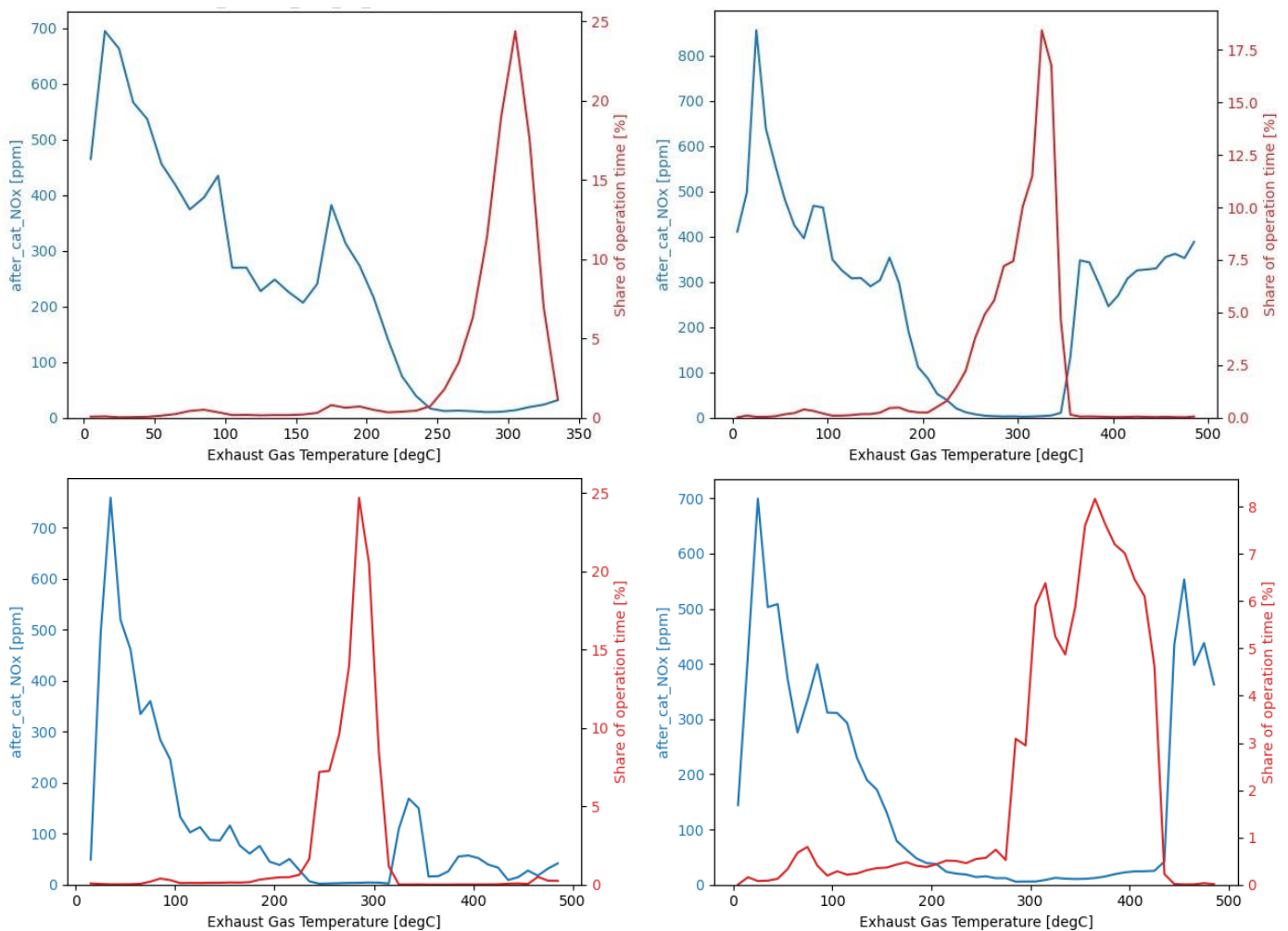
Met:

Q_w : Warmtestroom in kilowatt.

V_n : Uitlaatgasdebiet in normaalliter per seconde. ($Q[\text{Nm}^3\text{/hr}]/3600$)

T_g : uitlaatgastemperatuur in Kelvin.

Om de relevante uitlaatgastemperaturen te bepalen is monitoringsdata toegepast. Typische waarden voor uitlaatgastemperatuur aan het einde van de uitlaatpijp, bij een niet-werkende SCR, gaan tot circa 180 °C. Vanaf 180°C begint veelal de emissiereductie door de SCR en vanaf ongeveer 230 °C werkt de SCR goed. De grafieken hieronder van vier machines met SCR illustreren dit, zoals te zien in Figuur 2. Bij twee machines in dit figuur stijgt de NO_x-concentratie bij hogere temperaturen (>300 °C), hoogstwaarschijnlijk als gevolg van roetfilterregeneraties. Het figuur bevestigt daarnaast de lage NO_x-waarden (blauwe lijn) bij een goed werkende SCR (grofweg tussen de 200 en 300 °C), en de hoge NO_x-waarden bij lage uitlaatgastemperaturen.



Figuur 2: De gemiddelde NO_x-concentraties als functie van de uitlaatgastemperatuur, inclusief het operationele tijdsaandeel, van vier machines met SCR.

Tabel 2 toont per vermogensklasse (zoals in AERIUS gehanteerd) diverse variabelen, waaronder het gemiddeld geïnstalleerd motorvermogen van dieselmachines waarmee gerekend wordt. Per vermogensklasse is ook de verwachte motorinhoud weergegeven. Vervolgens is het toerental, het uitlaatgasdebiet, de uitlaatgastemperatuur en de warmtestroom voor twee verschillende condities gegeven. De condities hebben betrekking op de inzet: 1) lage motorlast met de SCR nog niet volledig op bedrijfstemperatuur (180°C) en 2) warme motor met werkende SCR (280 °C).

Deze twee condities zijn toegevoegd om de mate van variatie in warmtestroom aan te geven. Tabel 2 laat deze verschillen ook duidelijk zien, zowel tussen de inzet, als tussen de vermogensklassen. Tabel 2 geeft in de laatste kolom het verschil weer met de waarde die momenteel voor de warmtestroom wordt gehanteerd, namelijk 35 kW (0,035 MW).

In de praktijk zijn er uiteraard meer relevante condities. Bijvoorbeeld een start met koude motor, waarbij het uitlaatgas een zeer lage temperatuur heeft, en de NO_x-emissies hoog zijn. Er is echter gekozen om de condities weer te geven die relatief vaak voorkomen en het meeste bijdragen aan de emissietotalen.

Tabel 2: Warmtestroom (Qw) van mobiele (diesel) werktuigen bij verschillende vermogensklassen bij verschillende inzet.

Vermogens-klasse AERIUS	Gemiddeld geïnstalleerd motor-vermogen [kW]	Motor-inhoud [L]	Toerental [min ⁻¹]	Uitlaatgas debiet [Nm ³ /s]	Uitlaatgas-temperatuur [°C]	Qw [kW]	Vershil met 0,035 MW warmtestroom [kW]
<56 kW	27	1.7	850	0.0111	180	2.4	-32.6
			1600	0.0209	280	7.2	-27.8
56-75 kW	62	3.4	850	0.0217	180	4.7	-30.3
			1600	0.0408	280	14.1	-20.9
75-560 kW	170	8.0	850	0.0513	180	11.0	-24.0
			1600	0.0966	280	33.3	-1.7
>560 kW	725	20.9	850	0.1332	180	28.6	-6.4
			1600	0.2507	280	86.4	51.4

Het is in AERIUS momenteel niet mogelijk voor de gebruiker om variabelen zoals het toerental en de uitlaatgastemperatuur zelf in te voeren. Er is daarom een warmtestroom berekend waarbij de condities gecombineerd zijn. Hierbij is de grove inschatting, gebaseerd op diverse praktijkmetingen, dat de SCR van mobiele werktuigen gemiddeld ongeveer 25% van de tijd niet volledig op bedrijfstemperatuur is en 75% van de tijd wel op bedrijfstemperatuur is. Idealiter zou deze analyse in meer detail worden uitgevoerd voor meerdere machines.

Tabel 3 toont de gewogen warmtestroom per AERIUS vermogensklasse. Hierbij is rekening gehouden met de gemiddelde verhouding tussen de lastpunten waarbij de uitlaatgastemperatuur 180°C (25% van de tijd) en 280°C (75% van de tijd) is. Voor de meeste vermogensklassen is de berekende (gecombineerde) warmtestroom fors lager dan de 35 kW die tot dusver in AERIUS gehanteerd wordt.

Tabel 3: Gewogen warmtestroom van mobiele werktuigen bij verschillende vermogensklassen.

Vermogensklasse AERIUS	Warmtestroom Qw [kW]	Verschil met 0,035 MW [kW]
<56 kW	6.0	-29.0
56-75 kW	11.7	-23.3
75-560 kW	27.7	-7.3
>560 kW	72.0	37.0

4. Technische bronkenmerken

De richting en stroomsnelheid zijn tevens relevant voor de dispersie van het uitlaatgas. De gemiddelde diameter van de uitlaatpijp is bij benadering $3 \cdot V^{1/2}$ centimeter per liter motorinhoud 'V'. Voor een nauwkeurige inschatting zouden metingen gedaan kunnen worden op bijvoorbeeld een bouwplaats, waarbij de uitlaatbinnendiameter en motorvolume per motorklasse geregistreerd worden, ter statistische grondslag.

De snelheid van het uitlaatgas bij stationair draaien is, uitgaande van bovengenoemde diameter, altijd ongeveer 4 meter per seconde, ongeacht de machine of het type motor. Daarbij is de richting van het uitlaatgas zijwaarts, aangezien het eindstuk van de uitlaten over het algemeen horizontaal gemonteerd zijn of onder een hoek van 45 graden. De initiële spreiding, veroorzaakt door de scherpe randen van de uitlaat, is in de orde van een factor 8 in volume.

De hoogte van de uitlaat varieert sterk per type machine. Het meest voorkomend materieel zoals medium graafmachines (met een groot aandeel in totale emissies) hebben typisch een hoogte van ongeveer 2 tot 2,5 meter. Kleiner materieel (<56 kW) heeft typisch een uitlaathoogte onder de 1,5 meter.

5. Conclusies

Deze notitie beschrijft dat de hoogste NO_x-uitstoot voor grotere machines plaatsvindt bij lagere motorbelastingen. Hierbij is de uitlaatgastemperatuur en de volumestroom relatief laag, wat zorgt voor een lage warmtestroom van uitlaatgas. Voor de meeste vermogensklassen is de berekende warmtestroom, waarbij zowel rekening wordt gehouden met lage als hoge motorbelasting, fors lager dan de 35 kW die tot dusver in AERIUS gehanteerd wordt. Het is daarom belangrijk om voor de gehanteerde warmtestroom in dispersie- en depositieberekeningen onderscheid te maken tussen vermogensklassen, en om rekening te houden met de hoge en lage motorlast (al dan niet in een gecombineerde waarde). Ook voor de technische bronkenmerken, zoals de diameter van uitlaatpijp en de hoogte van de uitlaat, kan onderscheid gemaakt worden tussen de diverse vermogensklassen. Of dit van belang is voor de modeluitkomst hangt ook af van de gevoeligheid van het OPS-model voor deze bronkenmerken.