

TNO PUBLIEK

Westerduinweg 3
1755 LE Petten
Postbus 15
1755 ZG Petten

TNO-rapport

www.tno.nl

T +31 88 866 50 65

Emissiereductie en mogelijke normering voor verbranding vaste biomassa in biomassaketels

Datum	9 juli 2020
Auteur(s)	Arjan Plomp Pieter Kroon
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	73 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	
Opdrachtgever	
Projectnaam	Emissiereductie en normering biomassaverbranding
Projectnummer	060.37320/01.01.04
Referentienummer	100333388

Alle rechten voorbehouden.

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

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2020 TNO

TNO PUBLIEK

Samenvatting

Biomassa wordt in uiteenlopende vormen en op uiteenlopende manieren toegepast om hernieuwbare energie op te wekken. Nederland staat aan de vooravond van een energietransitie, waarbij opwekking van hernieuwbare energie wenselijk is om klimaatdoelstellingen (CO₂ reductie) te halen. In het huidige energiesysteem wordt de meeste warmte opgewekt middels aardgasstook en naar verwachting zal dit voor een deel worden vervangen door biomassastook. Ten opzichte van aardgas resulteert verbranding van vaste biomassa in een toename van de emissies van NO_x, stof en SO₂: het rookgas van verbrande biomassa veroorzaakt meer luchtverontreiniging dan bij aardgasverbranding het geval is. In dit rapport wordt onderzocht op welke wijze en in welke mate deze emissies beperkt kunnen worden.

Een bekende vorm van hernieuwbare energie is warmte-opwekking middels stook van vaste biomassa, veelal in de vorm van snipperhout of houtpellets. Andere bekende vormen van biomassa zijn gasvormige biomassa (zoals biogas uit bijvoorbeeld mestvergisting) of vloeibare biomassa (zoals brandstof uit plantaardige olie die wordt bijgemengd in vloeibare fossiele brandstoffen). Dit rapport richt zich alleen op de verbranding van vaste biomassa waar kleine (0,5 - 1 MW_{th}) en middelgrote (1 - 50 MW_{th}) stookinstallaties bij betrokken zijn (CBS, 2019). Het begrip stookinstallatie omvat een brede groep installaties waarin brandstof wordt verstoekt teneinde de opgewekte warmte nuttig te gebruiken, zoals ketels, turbines en motoren (Ab, 2020). Omdat vaste biomassa vrijwel volledig wordt toegepast in ketels (CBS, 2019), wordt in dit rapport veelvuldig de situatie voor biomassaketels beschreven.

Het recent ondertekende Schone Lucht Akkoord¹ streeft ten behoeve van de gezondheid naar een permanente verbetering van de luchtkwaliteit. Een van de afgesproken maatregelen is om te onderzoeken of de emissies van biomassastook in kleine en middelgrote stookinstallaties aangescherpt kunnen worden (Schone Lucht Akkoord, hfst 3, maatregel 9¹). Overeenkomstig deze maatregel in het Schone Lucht Akkoord behandelt dit rapport de uitstoot van luchtverontreinigende stoffen en de mogelijke aanscherping van emissie-eisen aan (kleine en middelgrote) stookinstallaties die vaste biomassa verbranden, zodat de luchtkwaliteit, ondanks de inzet van biomassastook, verder kan verbeteren.² Daartoe worden de technische mogelijkheden in kaart gebracht en tevens de daaraan verbonden meerkosten. Dit wordt gevolgd door een voorstel voor mogelijke aanscherpingen van emissie-eisen richting het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.

Op verzoek van het Ministerie is specifiek onderzocht:

¹ Het Schone Lucht Akkoord is op 13 januari 2020 officieel ondertekend door de Rijksoverheid, de meeste provincies en diverse gemeenten. Documenten beschikbaar via de bibliotheek op <https://www.schoneluchtakkoord.nl/home/default.aspx> (laatst bezocht juni 2020). Zie ook kamerstukken behorende bij kamerbrief met kenmerk IENW/BSK-2019/267463.

² Naast luchtverontreiniging ten gevolge van biomassastook is er eveneens aandacht voor de NO_x-emissie in het kader van de stikstofproblematiek rondom de PAS (Programmatiese Aanpak Stikstof, een regeling onder de Wet natuurbescherming). Deze studie is niet direct gericht op maatregelen ten bate van beperking van de stikstofdepositie, maar op de effecten voor de luchtkwaliteit. De reden hiervoor is dat beperking van de stikstofdepositie lokaal wordt gereguleerd en zijn eigen wettelijk kader heeft, namelijk de Wet natuurbescherming. Er zal echter wel synergievoordeel zijn als er emissiereductie ten aanzien van NO_x wordt gerealiseerd.

- de mogelijke toepassing van DeNO_x³ bij biomassastook in kleine (0,5 - 1 MW_{th}) en middelgrote (1 - 50 MW_{th}) biomassaketels en de betekenis hiervan voor mogelijke NO_x-eisen;
- de mogelijke toepassing van stoffilters en/of ESP (Electrostatic Precipitator, ofwel een elektrostatisch filter) bij biomassastook voor kleine en middelgrote biomassaketels en de betekenis hiervan voor mogelijke stof-eisen;
- de daadwerkelijke SO₂-emissie in relatie tot het zwavelpercentage bij uiteenlopende soorten biomassa, eventuele mogelijkheden voor ontzwaveling en de betekenis hiervan voor mogelijke SO₂-eisen.

Er is geconstateerd dat er diverse mogelijkheden zijn om de emissies van biomassastook te reduceren, omdat technologie beschikbaar en in de praktijk bewezen is. Er is daarom ruimte voor aanscherping van de emissie-eisen aan stookinstallaties met een thermisch inputvermogen tussen de 0,5 MW_{th} en 50 MW_{th} op hout en andere vaste biomassa.

De mogelijke technieken en bijbehorende mogelijke emissie-eisen zijn samengevat in Tabel 1 per doelstof en per vermogenscategorie. Ter vergelijking is de huidige eis in het Activiteitenbesluit opgenomen.

Stof

De meeste stookinstallaties kunnen worden voorzien van een stoffilter. Dit is in de praktijk veelal een doekenfilter voor de vermogenscategorie 5-50 MW_{th}. Voor de lagere vermogens kan een ESP worden toegepast, als alternatief voor een doekenfilter. Dergelijke filters worden ook reeds op grote schaal toegepast in Duitsland. Een enkele ketel zou eventueel kunnen voldoen aan de voorgestelde eis voor de vermogenscategorie 0,5-1 MW_{th} op basis van brandstofkeuze (kwaliteit van toegepaste biomassa) en een optimale verbranding.

In het algemeen is het mogelijk om bij bestaande installaties alsnog een filter technisch in te passen. Deze zogeheten retrofit van stoffilters vereist met name bij grotere vermogens een zeker ruimtebeslag; dit hangt echter ook af van andere aspecten, zoals eventuele automatisering van de stofafvoer. Naar verwachting is het ruimtebeslag de voornaamste barrière bij retrofit toepassing van filters.

NO_x

Alle installaties groter dan 1 MW_{th} kunnen actieve rookgasreiniging toepassen oftewel DeNO_x³. Dit kan zowel niet-katalytisch (Selective Non-Catalytic Reduction, bekend als SNCR) als katalytisch (Selective Catalytic Reduction, bekend als SCR) worden uitgevoerd; het is ook mogelijk om deze technieken gecombineerd toe te passen. Er is onderscheid gemaakt in twee mogelijke niveaus van aanscherping van de NO_x-eis. Het gewenste niveau hangt samen met de wijze van uitvoering: een diepe(re) NO_x-reductie is technisch haalbaar, maar vereist veelal een duurdere technologische inpassing, zoals een combinatie van beide technieken of een zwaarder katalysatorpakket. De technische mogelijkheden hangen mede af van bijvoorbeeld de technische verbrandingsruimte en de aanwezige vervuiling in het rookgas. Er zijn daarom in Tabel 1 twee categorieën opgenomen ten aanzien van de NO_x-eisen.

³ DeNO_x = verwijdering van NO_x uit rookgas. Veelal wordt dit uitgevoerd met behulp van Selective Catalytic Reduction (SCR) of Selective Non-Catalytic Reduction (SNCR); met behulp van deze technieken wordt NO_x verwijderd door reactie met een reductiemiddel (meestal ammoniak of ureum).

Het is mogelijk om bij bestaande biomassa-installaties DeNO_x-technologie in te passen. Inpassing van DeNO_x-technologie bij bestaande installaties kan echter wel gehinderd worden door beperkte ruimte in de vuurhaard, inpassingsruimte in het algemeen en het temperatuurprofiel van het rookgas.

Voor de vermogenscategorie kleiner dan 1 MW_{th} zijn nog geen voorbeeldprojecten geïdentificeerd, waar de mogelijkheid voor toepassing van DeNO_x is bewezen. Daarom wordt in het bijzonder voor deze vermogenscategorie nader onderzoek geadviseerd naar de technische inpassing van DeNO_x, alvorens een verdergaande emissie-eis dan 225 mg/Nm³ wordt geïntroduceerd. De eis van 225 mg/Nm³ voor de vermogenscategorie <1 MW_{th} vereist dus geen DeNO_x, maar zal in diverse gevallen wel schoon hout als brandstof vergen, omdat diverse andere biomassatypen relatief veel stikstof bevatten.

Tabel 1 Overzicht van huidige emissie-eisen waar biomassaketels aan moeten voldoen (Ab, 2019) en voorgestelde aanscherpingen voor diverse doelstoffen: stof (PM), NO_x, SO₂). De emissiegrenswaarden zijn uitgedrukt in mg/Nm³, in droog rookgas bij 6% O₂ en STP (=standaard temperatuur en druk)

	Vermogenscategorie (MW, thermisch input)		
	> 5 MW _{th}	1 - 5 MW _{th}	< 1 MW _{th}
Stof (PM)			
Huidige eis	5 mg/Nm ³	20 mg/Nm ³	40 mg/Nm ³
Mogelijke aanscherping	5 mg/Nm ³	5 mg/Nm ³	10 mg/Nm ³
Mogelijke technieken om aan aanscherping te voldoen	Doekenfilter of ESP-filter	Doekenfilter of ESP-filter of brandstofkeuze en optimale verbranding	
NO_x			
Huidige eis	145 mg/Nm ³	275 mg/Nm ³	300 mg/Nm ³
Mogelijke aanscherping	100 mg/Nm ³ ⁴	145 mg/Nm ³ ⁴	225 mg/Nm ³
Mogelijke technieken om aan aanscherping te voldoen	SCR ⁴	SNCR en/of SCR ⁴	Brandstofkeuze en optimale verbranding
Mogelijke verdergaande aanscherping	80 mg/Nm ³ ⁴	100 mg/Nm ³ ⁴	-
Mogelijke technieken om aan verdergaande aanscherping te voldoen	SCR ⁴	SNCR en SCR of alleen SCR ⁴	advies voor nader onderzoek naar toepassing SNCR en/of SCR ⁴ ; 145 mg/Nm ³ ⁴ is realistische eis als DeNO _x mogelijk is
SO₂			
Huidige eis	200 mg/Nm ³	200 mg/Nm ³	200 mg/Nm ³
Mogelijke aanscherping	60 mg/Nm ³	60 mg/Nm ³	60 mg/Nm ³
Mogelijke technieken om aan aanscherping te voldoen	Brandstofkeuze, evt kalkinjectie en doekenfilter		

⁴ Bij deze eisen (en toepassing van SCR en/of SNCR): hierbij wordt ervan uitgegaan dat 5 mg NH₃/Nm³ als randvoorwaarde bij SCR haalbaar is en 10 mg NH₃/Nm³ bij SNCR.

SO₂

Stook van vaste biomassa wordt meestal uitgevoerd op basis van snipperhout of houtpellets. Stook van hout voldoet ruimschoots aan de huidige eis van 200 mg/Nm³ en kan zonder nageschakelde techniek eveneens ruimschoots voldoen aan een aanscherping tot 60 mg/Nm³, omdat schoon hout een zwavelarme brandstof is. Er is echter ook biomassa beschikbaar met hoge zwavelgehalten, zoals stro. Aanscherping van de SO₂-eis is er vooral op gericht om de inzet van biomassa met hogere zwavelgehalten zonder nageschakelde techniek (zoals kalkinjectie in rookgas) te voorkomen. Aan een eis van 60 mg/Nm³ zal normaliter voldaan kunnen worden bij toepassing van schoon snipperhout (afwezigheid van bladeren en/of naalden) en/of houtpellets. Mogelijk kan de SO₂-emissie eenvoudig worden vastgesteld op grond van beoordeling van de brandstofkwaliteit, voor zover dat binnen de MCPD⁵ is toegestaan. Ten aanzien van houtpellets zijn er al certificatieschema's (met name ENplus en DINplus certificaten worden regelmatig gebruikt in de handel van houtpellets; deze certificatieschema's bevatten o.a. eisen ten aanzien van het zwavelgehalte).

In Tabel 2 zijn kosten-kentallen opgenomen. Deze zijn relevant om inzicht te krijgen in de mogelijke kostprijsverhoging ten gevolge van aangescherpte emissie-eisen.

Tabel 2 Kosten van nageschakelde technieken

Vermogensklasse (MW, thermisch input)	Investeringskosten nageschakelde techniek (keuro/MW _{th input})	Toelichting nageschakelde technologie
Stof (PM)		
> 5 MW _{th}	n.v.t.	Nageschakelde techniek reeds toegepast onder huidig regime
1 - 5 MW _{th}	Ca 70	Toepassing ESP
< 1 MW _{th}	40-50 50-75	Lage prijs bij 1-veld ESP Hogere prijs bij meerveld ESP voor diepe(re) stofreiniging
NO_x		
> 5 MW _{th}	n.v.t.	Nageschakelde techniek reeds toegepast onder huidig regime
1 - 5 MW _{th}	Ca 43. Kosten reductiemiddel:1000 euro/ton	Toepassing SNCR
< 1 MW _{th}	n.v.t.	Nageschakelde techniek niet van toepassing bij voorgestelde eis

Aanscherpingen van de emissie-eisen kunnen (separaat) per pollutent worden ingevoerd of in combinatie met elkaar worden geïmplementeerd in de wetgeving. Aanscherping voor de ene emissie beperkt niet de mogelijkheden om ook een andere emissie aan te scherpen. Ondanks dat is er interactie mogelijk: bij een NO_x-eis die SCR noodzakelijk zou maken, wordt in veel situaties ook een stoffilter toegepast dat tegen een hogere temperatuur bestand is.

⁵ MCPD = Medium Combustion Plant Directive (EU) 2015/2193 oftewel de Europese Richtlijn middelgrote stookinstallaties.

Als nageschakelde technologie om SO₂-emissies te reduceren wordt veelal kalkinjectie toegepast. In dat geval wordt dit veelal gecombineerd met een doekenfilter om het kalk af te vangen.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	9
2	Stof	14
2.1	Inleiding stof uit biomassaverbranding	14
2.2	Emissie-eisen voor stof in relatie tot praktijk-emissies	14
2.3	Nageschakelde technieken voor stofverwijdering uit rookgas	17
2.4	Kosten stoffilters	22
2.5	Mogelijke toekomstige emissie-eisen voor stof	25
2.6	Mogelijk reductie-effect bestaande ketels	26
3	NO_x	28
3.1	Inleiding NO _x uit biomassaverbranding	28
3.2	Emissie-eisen voor NO _x in relatie tot praktijk-emissies	29
3.3	Brandstofkwaliteit en onbestreden NO _x -emissies	31
3.4	Nageschakelde technieken voor NO _x -reductie	32
3.5	Kosten voor SNCR of SCR	34
3.6	Mogelijke toekomstige emissie-eisen voor NO _x	36
3.7	Mogelijk reductie-effect	38
4	SO₂	39
4.1	Inleiding SO ₂ uit biomassaverbranding	39
4.2	Huidige SO ₂ -eisen	39
4.3	Zwavelgehalte biomassa en SO ₂ -emissies	39
4.4	Mogelijke toekomstige emissie-eisen voor SO ₂	42
4.5	Kosten voor zwavelafvangst	43
5	Referenties	44
6	Ondertekening	53
	Bijlage(n)	
	A Emissies van middelgrote stookinstallaties	
	B Definitie biomassa in het Activiteitenbesluit en het BOR	
	C Emissiemetingen aan kleinere ketels	
	D Beschikbaarheid van filters in Duitsland	
	E Kosteneffectiviteit volgens het AMEC rapport	
	F Emissies van grote stookinstallaties	

1 Inleiding

In het kader van het Schone Lucht Akkoord en het Klimaatakkoord^{6, 7} wil het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat de emissiegrenswaarden voor verbranding van vaste biomassa in stookinstallaties, met name ketels, opnieuw laten toetsen door TNO⁸. In het Schone Lucht Akkoord staat de aanleiding voor dit onderzoek beschreven in maatregel 9 voor de Industrie:

9. De Rijksoverheid onderzoekt in 2020 welke emissie-eisen in de algemene regels kunnen worden aangescherpt. Hierbij worden de reguliere stappen, waaronder consultatie, doorlopen. Hieronder vallen de generieke eisen in de huidige afdeling 2.3 van het Activiteitenbesluit en de eisen ten aanzien van biomassastook in kleine en middelgrote installaties.

Naar verwachting zal in de nabije toekomst de inzet van biomassa (voor warmte) toenemen door investeringen in biomassaketels (Schoots & Hammingh, 2019). De toename wordt met name beïnvloed door subsidie (de Stimuleringsregeling Duurzame Energieproductie, kortweg SDE+ regeling), het beleid om het gebruik van aardgas te reduceren en de beoogde realisatie van CO₂-reductie in diverse sectoren.

Verbranding van vaste biomassa, zoals hout, resulteert in aanzienlijk meer uitstoot naar de lucht van stof (inclusief fijnstof, onder te verdelen in PM₁₀ en PM_{2.5}), stikstofoxiden (NO_x) en zwaveloxiden (SO₂) dan de verbranding van aardgas. Vanwege de verwachte toename van vaste biomassastook in biomassaketels, zal de emissie van stof, NO_x en SO₂ toenemen. Voor de luchtkwaliteit is het dan ook van belang dat emissies van biomassastook naar de lucht zoveel mogelijk worden beperkt, met name middels wettelijk vastgelegde emissie-eisen voor verbranding van vaste biomassa.

Er zijn emissie-eisen opgenomen in het Activiteitenbesluit voor (standaard) stookinstallaties, onder § 3.2.1 en § 5.1.5⁹, voor installaties met een thermisch ingangsvermogen tot 50 MW_{th}, zie Tabel 3. De ondergrens voor biomassaketels, conform het Activiteitenbesluit, is 0,5 MW_{th}: daaronder vallen biomassa-installaties terug op de Ecodesign richtlijn¹⁰. Boven deze vermogensgrens van 50 MW_{th} valt een installatie onder de Industrial Emissions Directive en onder § 5.1.1 van het

⁶ Het Klimaatakkoord, hoofdstuk D2 Biomassa, beschikbaar via publicaties op <https://www.klimaatakkoord.nl/> (laatst bezocht Februari 2020).

⁷ Kamervragen over de inzet van biomassa als energiebron (kenmerk: 19274168, november 2019).

⁸ Eerder uitgevoerd werk: (Kroon & Plomp, 2013; Plomp & Kroon, 2013).

⁹ Het Besluit Omgevingsrecht definieert vergunningplicht in § 2.1 en bijlage I, deel B en C, categorie 1.4. Een biomassa-installatie <15 MW_{th} is niet vergunning-plichtig en valt daarmee onder het regime van § 3.2.1 van het Activiteitenbesluit. Een biomassa-installatie >15 MW_{th} valt onder het regime van § 5.1.5 in het Activiteitenbesluit (Bor, 2019). Deze normen worden in de nabije toekomst onder de omgevingswet opgenomen in het Besluit activiteiten leefomgeving (kortweg Bal), § 4.31 en § 4.32.

¹⁰ Ondergrens wordt bepaald door de Activiteitenregeling, artikel 3.7m: keuringsplicht vanaf 20 kW nominaal thermisch ingangsvermogen, inclusief emissie-meting of aantonen meetrapport van fabrikant voor CO, als bewijs voor volledige (goede) verbranding.

Activiteitenbesluit¹¹. Dergelijke grote stookinstallaties (>50 MW_{th}) kennen in het algemeen aanzienlijk scherpere emissie-eisen dan kleine (0,5 - 1 MW_{th}) en middelgrote (1 - 50 MW_{th}) stookinstallaties, dat wil zeggen, installaties die vallen onder § 3.2.1 en § 5.1.5.

De genoemde vermogensgrenzen zijn uitgedrukt als het nominale thermisch ingangsvermogen van de installatie. De eisen zijn uitgedrukt in mg/Nm³, omgerekend naar droog rookgas bij 6% O₂¹² en STP (standaard temperatuur en druk).

Tabel 3 Overzicht van emissie-eisen waar biomassaketels aan moeten voldoen (Ab, 2020)

Vermogen per doelstof	Huidige eis (mg/Nm ³ , droog rookgas bij 6% O ₂ , STP)
Stof (PM)	
> 5 MW _{th}	5
1 - 5 MW _{th}	20
< 1 MW _{th}	40
NO_x	
> 5 MW _{th}	145
1 - 5 MW _{th}	275
< 1 MW _{th}	300
SO₂	
Alle vermogensklassen	200

In Tabel 4 zijn diverse gegevens opgenomen omtrent houtgestookte biomassaketels in Nederland, zoals de situatie in 2018 was: het aantal installaties, het opgesteld vermogen en de gerapporteerde brandstofinzet (CBS, 2019). De brandstofinzet bij biomassaketels kleiner dan 0,5 MW_{th} wordt ingeschat, zie Tabel 4 voor de aannames. Voor installaties groter dan 0,5 MW_{th} wordt de brandstofinzet gerapporteerd voor de subsidieregeling; CBS heeft deze rapportages gebruikt om de totale biomassa-inzet te berekenen, maar splitst de totale biomassa-inzet niet uit voor de categorieën groter dan 0,5 MW_{th}. De totale inzet van biomassa voor het ketelpark (d.w.z. alle opgestelde installaties) is vastgesteld op 7571 TJ en hieruit volgt 3172 vollasturen per jaar als parkgemiddelde, dus gemiddelde over alle ketels (zie Tabel 4). Het CBS kent hier een onzekerheid aan toe van 30% (CBS, 2019).

Het CBS rapporteert veel vermogensgroei sinds de aanvang van de statistiek in 2006. Er wordt veel vermogensgroei waargenomen in de sector Landbouw, waar biomassaketels veelvuldig worden toegepast, m.n. in de intensieve veehouderij voor verwarming van stallen en in de glastuinbouw. Ook de sectoren Energiebedrijven en Overig laten een aanzienlijke vermogensgroei ten opzichte van 2006 zien. Naast houtgestookte biomassaketels, rapporteert het CBS eveneens gegevens voor 'vaste en vloeibare biomassa voor decentrale elektriciteitsproductie' (21 installaties, 17496 TJ biomassa) en 'vaste en vloeibare biomassa voor warmte bij bedrijven' (11 installaties, 3910 TJ biomassa) (CBS, 2019).

¹¹ Op de website van Infomil staat hulpmiddel Abees om de relevante emissie-eis voor een installatie te vinden (Infomil, 2019).

¹² Emissies van verbrandingsprocessen worden herleid op afgas met een standaard volumegehalte aan zuurstof. Anders zou middels verdunning aan elke emissie-eis voldaan kunnen worden.

Een klein aantal van deze installaties stookt op schoon hout, maar een groot deel van deze installaties verbrandt afvalstoffen, zoals afvalhout, kippenmest, papierslib en slachtafval (CBS, 2019). Voor het verbranden van afvalstoffen geldt andere regelgeving dan in dit rapport wordt behandeld. Deze gegevens zijn daarom niet opgenomen in Tabel 4.

Tabel 4 Gegevens over 2018 omtrent aantal en vermogen houtgestookte biomassaketels (CBS, 2019) en gegevens van RVO over houtgestookte biomassaketels over de SDE periode 2010-2019 (SDE, 2020). De gegevens van de SDE omvatten alle projecten die een lopende subsidiebeschikking hebben ontvangen; de daadwerkelijk gerealiseerde projecten zijn eveneens gerapporteerd.

Vermogensklasse (MW _{th})	Aantal installaties	Totaal vermogen (MW _{th})	Opmerkingen
Gegevens van CBS (CBS, 2019)			
Ketels >1 MW _{th}	66	226	CBS baseert inzet >0,5 MW _{th} op SDE-rapportages, maar publiceert de inzet niet (CBS, 2019)
Ketels >0,5 - 1 MW _{th}	99	73	
Ketels >0,1 - 0,5 MW _{th}	880	202	Aanname CBS voor <0,5 MW _{th} : 3000 vollasturen landbouwbedrijven en 1500 vollasturen overige bedrijven (CBS, 2019)
Ketels ≤ 0,1 MW _{th}	3193	162	
Totaal ketels	4238	663	7571 TJ totaal biomassa-inzet (brandstof: hout) → 3172 vollasturen parkgemiddelde (CBS, 2019)
Gegevens van RVO (SDE, 2020)			
Ketels > 5 - 50 MW _{th}	35	525	(SDE, 2020)
Waarvan gerealiseerd	11	180	(SDE, 2020)
Ketels 1 - 5 MW _{th}	47	135	(SDE, 2020)
Waarvan gerealiseerd	27	59	(SDE, 2020)
Ketels 0,5 - < 1 MW _{th}	187	121	(SDE, 2020)
Waarvan gerealiseerd	126	81	(SDE, 2020)
Totaal ketels	269	781	(SDE, 2020)
Waarvan gerealiseerd	164	320	(SDE, 2020)

Ten bate van de Stimuleringsregeling Duurzame Energie (voormalige SDE en huidige SDE+ regeling) worden gesubsidieerde projecten voor hernieuwbare energie bijgehouden: dit is uitgesplitst naar het totale aantal projecten met een subsidiebeschikking en het deel daarvan dat reeds is gerealiseerd. Over de periode 2010 tot en met 2019 is het aantal projecten voor biomassaketels tussen 0,5 en 50 MW_{th} op vaste biomassa geanalyseerd. Dit omvat geen projecten waarbij de reeds bestaande ketels subsidie kregen toegekend voor een herinvestering (dus geen 'verlengde levensduur-projecten') en omvat niet de belangrijkste categorie voor elektriciteitsproductie ('thermische conversie'). De geanalyseerde projecten zijn dus grotendeels (maar mogelijk niet exclusief) gericht op warmteproductie. Omdat 2019 is meegenomen als extra monitoringjaar, kan dit een mogelijke verklaring zijn dat het gerealiseerde vermogen (categorie 0,5-1 MW_{th} en gecombineerde categorie 1-5 en 5-50 MW_{th}) en het aantal installaties (categorie 0,5-1 MW_{th}) wat hoger is dan de CBS statistieken. Ook de gehanteerde vermogensgrenzen wijken onderling wat af:

CBS inventariseert een categorie groter dan 0,5 MW_{th}, terwijl de gegevens van RVO het mogelijk maken om ketelvermogens gelijk aan 0,5 MW_{th} te inventariseren, waardoor er mogelijk meer ketels in beeld komen op basis van de SDE-gegevens (CBS, 2019; SDE, 2020). Op hoofdlijnen bevestigen deze gegevens dat de biomassaketels in Nederland tussen 0,5 en 50 MW_{th} sterk worden gestimuleerd door de SDE+ regeling en dat het ketelpark voor een groot deel jonger is dan 2010, omdat dit een analyse betreft voor de SDE-periode vanaf 2010. De analyse is weergegeven in Tabel 4. Het verschil tussen het totale aantal beschikkingen en de reeds gerealiseerde projecten (zie Tabel 4) kan potentieel nog gerealiseerd gaan worden in de nabije toekomst. Het is bekend uit het verleden dat niet alle projecten met een subsidiebeschikking doorgang vinden, maar het vermogen dat nog gerealiseerd kan worden op basis van een subsidiebeschikking, is aanzienlijk. Deze observatie onderbouwt mede de verwachting dat in de nabije toekomst de inzet van biomassa (voor warmte) zal toenemen door investeringen in biomassaketels (Schoots & Hammingh, 2019).

De categorie “<0,5 MW_{th}” is verder niet geanalyseerd, omdat deze buiten de relevante vermogenscategorieën ligt voor deze studie. Daarnaast is sinds 1 januari 2020 de Ecodesign-richtlijn van toepassing op nieuwe biomassaketels tot en met 0,5 MW_{th}, waarin emissiegrenswaarden en eisen ten aanzien van energie-efficiëntie zijn opgenomen¹³. Dit betreft product-eisen aan nieuwe installaties: de fabrikant moet aantonen dat het te verkopen product hieraan voldoet. Dat betekent dat Nederland aan deze ketels geen verdergaande emissie-eisen kan stellen.

In 2013 is door het toenmalige ECN, nu onderdeel van TNO, een tweetal studies uitgevoerd: *‘Evaluatie Besluit emissie-eisen middelgrote stookinstallaties’* en *‘De mogelijke aanscherping van vijf eisen in het Besluit emissie-eisen middelgrote stookinstallaties’* (Kroon & Plomp, 2013; Plomp & Kroon, 2013). De emissie-eisen omtrent biomassaketels zijn toen eveneens onderwerp van onderzoek geweest en er is toen een lijst met eisen in de omringende landen opgenomen (Tabel 1, pag 75 en Tabel 2, pag 77 van Kroon & Plomp, 2013). De eisen in het Nederlandse Activiteitenbesluit bleken toen consequent scherper dan in de belangrijkste omringende landen: Duitsland, Denemarken en Oostenrijk. Voor zover bekend, is het huidige emissieregime zoals dat in Nederland geldt, niet voorbijgestreefd door andere landen.

In dit onderzoek is opnieuw onderzocht wat mogelijke (nageschakelde) technieken en hun kosteneffectiviteit kunnen zijn, en tot op welk niveau emissie-eisen aangescherpt kunnen worden. De onderzoeksvragen voor TNO zijn:

¹³ De Ecodesign richtlijn (verordening 2015/1189) stelt eisen inzake ecologisch ontwerp voor verwarmingsketels op vaste brandstoffen. Fabrikanten van verwarmingsketels moeten met ingang van 1 januari 2020 voldoen aan de eisen voor ketels die nieuw op de markt worden gebracht. Naast eisen ten aanzien van energie-efficiëntie zijn ook emissie-eisen opgenomen in de Ecodesign richtlijn. Voor stof geldt een emissie-eis van 55 mg/Nm³ en voor NO_x geldt een emissie-eis van 273 mg/Nm³ (bij 6% O₂; eisen in de richtlijn omgerekend van 10% O₂). Deze eisen zijn van toepassing op automatisch gestookte ketels en zijn ‘seizoensgebonden’: een gewogen gemiddelde bij 100% vermogen en bij 30% vermogen, beschreven in bijlage III (EU, 2015a). Deze Ecodesign richtlijn is niet van toepassing op ketels die gebruikmaken van niet-houtachtige biomassa, zie artikel 1. Onder artikel 2 is niet-houtachtige biomassa gedefinieerd, waaronder stro, miscanthus, riet, korrels, granen, olijfpitten, perskoeken van olijven en notendoppen (EU, 2015a).

- A) Wat zijn de toepassingsmogelijkheden van stofreductie bij kleine (0,5 - 1 MW_{th}) en middelgrote (1 - 50 MW_{th}) biomassaketels en wat zijn de gevolgen hiervan voor mogelijke stof-eisen voor diverse vermogenscategorieën?
- B) Wat zijn de toepassingsmogelijkheden van DeNO_x bij kleine (0,5 - 1 MW_{th}) en middelgrote (1 - 50 MW_{th}) biomassaketels en wat zijn de gevolgen hiervan voor mogelijke NO_x-eisen voor diverse vermogenscategorieën?
- C) Wat is de relatie tussen het zwavelpercentage in biomassa in relatie tot de huidige SO₂-eis? Is een nieuwe SO₂-eis nodig voor kleine (0,5 - 1 MW_{th}) en middelgrote (1 - 50 MW_{th}) biomassaketels en wat zou een mogelijke, nieuwe SO₂-eis kunnen zijn?

Het onderzoek is uitgevoerd op basis van kennis omtrent milieutechnieken die toegepast kunnen worden, kennis vanuit wetenschappelijke literatuur, de Stimuleringsregeling Duurzame Energie en bedrijfsbezoeken, informatie die (publiek) beschikbaar is bij fabrikanten en informatie die (publiek) beschikbaar is gesteld door exploitanten of bevoegde gezagen van biomassaketels. Er is daarnaast gesproken met de brancheorganisatie Nederlandse vereniging van Biomassa Ketel Leveranciers (NBKL) omtrent emissie-eisen.

Het primaire doel is om inzichtelijk te krijgen wat typische emissieprofielen zijn bij (correcte) bedrijfsvoering van biomassaketels, welke (nageschakelde) technieken commercieel beschikbaar zijn en of deze (kosteneffectief) toegepast kunnen worden.

In **Hoofdstuk 2 Stof** zijn de resultaten die gerelateerd zijn aan onderzoeksvraag A beschreven.

In **Hoofdstuk 3 NO_x** is onderzoeksvraag B beantwoord.

In **Hoofdstuk 4 SO₂** zijn de resultaten beschreven voor onderzoeksvraag C.

Afweging Kostenaspect

In het Schone Lucht Akkoord is afgesproken te streven naar een permanente verbetering van de luchtkwaliteit. Tegelijkertijd zal Nederland, in het kader van de energietransitie, naar verwachting meer warmte-opwekking realiseren op basis van biomassastook in plaats van aardgasstook. Ten opzichte van aardgas heeft biomassastook –ook bij de meeste moderne installaties– aanzienlijk hogere emissies van NO_x, stof en SO₂. Om permanente verbetering van luchtkwaliteit te bereiken en tevens de energietransitie te realiseren, is een verdere ontwikkeling van de installaties voor biomassastook nodig. Daarom worden in deze studie technische mogelijkheden in kaart gebracht en tevens de daaraan verbonden meerkosten. In een latere fase wordt een (politieke) keuze gemaakt waarbij kosten en baten worden afgewogen.

2 Stof

2.1 Inleiding stof uit biomassaverbranding

Regelgeving voor stofemissie van stookinstallaties is meestal gebaseerd op 'totaal stof'. Emissie-eisen in het Activiteitenbesluit en vergunningen voor middelgrote stookinstallatie op vaste biomassa worden ook uitgedrukt als 'totaal stof'. Hiertoe worden alle zwevende deeltjes in het rookgas afkomstig van deze installaties gerekend. De emissie van 'totaal stof' bij verbranding van biomassa bestaat voor het grootste deel, maar niet exclusief, uit deeltjes van 10 micron en kleiner (PM_{10}). Metingen bevestigen deze observatie met name bij volledige verbranding, zowel aan handgestookte als automatische gestookte installaties (Struschka et al, 2008; Nussbaumer, 2003; Nussbaumer, 2006; Nussbaumer, 2017).

Omdat de stofemissie van biomassastook vrijwel geheel bestaat uit stof van 10 micron en kleiner (PM_{10}), maar ook uit stof van 2.5 micron en kleiner ($PM_{2.5}$), wordt deze emissie veelal op basis van PM_{10} en $PM_{2.5}$ gerapporteerd.

Stofemissie bestaande uit PM_{10} en $PM_{2.5}$ wordt gerekend tot fijnstof. Fijnstof wordt gerelateerd aan negatieve gezondheidseffecten (WHO, 2005; WHO, 2013; Maas et al, 2015; Buijsman, 2005). De World Health Organization (WHO) heeft hiervoor advieswaarden opgesteld, zowel voor PM_{10} (deeltjes van 10 micron en kleiner; advieswaarde is $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ jaargemiddeld) als $PM_{2.5}$ (deeltjes van 2.5 micron en kleiner; advieswaarde is $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ jaargemiddeld) (WHO, 2005). Deze advieswaarden wijken overigens af van de Europese Richtlijn Luchtkwaliteit: $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ jaargemiddeld voor PM_{10} en $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ jaargemiddeld voor $PM_{2.5}$; de laatste waarde was tot 1 januari 2020 nog $25 \mu\text{g } PM_{2.5}/\text{m}^3$ jaargemiddeld (EC, 2008).

2.2 Emissie-eisen voor stof in relatie tot praktijk-emissies

De huidige emissie-eisen voor totaal stof uit ketelinstallaties gestookt op vaste biomassa zijn opgenomen in Tabel 5.

Tabel 5 Overzicht van stofnormen waar biomassaketels aan moeten voldoen (Ab, 2020)

Vermogen per doelstof	Huidige eis (mg/Nm^3 , droog rookgas bij 6% O_2 , STP)
Stof (PM)	
> 5 MW_{th}	5
1 - 5 MW_{th}	20
< 1 MW_{th}	40

Middelgrote ketels 5-50 MW_{th}

Recent is door Ricardo Energy&Environment een grote inventarisatie uitgevoerd in EU-lidstaten van de emissieprofielen bij bestaande middelgrote stookinstallaties (1-50 MW_{th}) om de Europese Commissie te ondersteunen bij de uitvoering van de Richtlijn Middelgrote Stookinstallaties (Ricardo, 2019; EU, 2015b).

Het onderzoek liet zien dat van de geïnventariseerde biomassa-installaties het 25 percentiel¹⁴ een stofemissie heeft lager dan 4 mg/Nm³ bij 6% O₂ (zie bijlage A, Figuur 4). De brandstoffen die zijn gerapporteerd bij deze stofmetingen zijn in het algemeen 100% biomassa, hoewel een enkele ketel ook andere brandstoffen vermeldt, zoals afval. In de ketels die een emissie lager dan 4 mg/Nm³ bij 6% O₂ rapporteren, wordt niet uitsluitend houtpellets of houtchips gestookt: één ketel rapporteert stro als brandstof en nog enkele ketels rapporteren een aandeel biomassa-afval als brandstof (bijv. 'recycled wood' en 'bast'). Dit biomassa-afval voldoet in ieder geval (indien emissierapportage <4 mg stof/Nm³ bij 6% O₂) aan de Richtlijn Middelgrote Stookinstallaties (Richtlijn (EU) 2015/2193), artikel 18b (Ricardo, 2019). Dit komt overeen met de Nederlandse definitie van biomassa in het Activiteitenbesluit, zie bijlage B.

Er is een verdere uitsplitsing gemaakt in verschillende vermogensklassen. De resultaten zijn als volgt uitgewerkt:

- 5-20 MW_{th}: er zijn 20 metingen aan stofemissies in deze vermogensklasse beschikbaar gesteld. Deze varieerden van 0,05-283 mg stof/Nm³ bij 6% O₂. Het gemiddelde was 53 mg stof/Nm³ bij 6% O₂. Het 25 percentiel in deze vermogenscategorie ligt op 4 mg stof/Nm³ bij 6% O₂.
- 20-50 MW_{th}: er zijn 17 metingen aan stofemissies in deze vermogensklasse beschikbaar gesteld. Deze varieerden van 0,1-79 mg stof/Nm³ bij 6% O₂. Het gemiddelde was 18 mg stof/Nm³ bij 6% O₂. Het 25 percentiel in deze vermogenscategorie ligt op 4 mg stof/Nm³ bij 6% O₂.

Vrijwel alle installaties in het 25 percentiel, zijn uitgerust met een multi-cycloon, gecombineerd met een ESP of een doekenfilter. Deze combinatie is ook commercieel ruimschoots beschikbaar en is ook bij een aantal (recente) initiatieven in Nederland gerealiseerd.

Middelgrote ketels 1-5 MW_{th}

De studie van Ricardo Energy&Environment omvat ook een aantal emissiemetingen voor 1-5 MW_{th} biomassaketels (Ricardo, 2019). Er zijn 4 metingen aan stofemissies in deze vermogensklasse beschikbaar gesteld. Deze varieerden van 0,4-99 mg stof/Nm³ bij 6% O₂. De emissies zijn sterk afhankelijk van de toepassing van nageschakelde filters. Het gemiddelde was 29,5 mg stof/Nm³ bij 6% O₂. Ook in deze vermogenscategorie wordt de toepassing van stoffilters gerapporteerd.

Een andere set praktijkmetingen aan ketels tussen 1 en 5 MW_{th} is weergegeven in Tabel 6 (IRBEA, 2016). De metingen en het rapport laten zien dat er aanzienlijke verschillen zijn in de stof-emissie tussen biomassaketels: niet het vermogen, maar de aanwezigheid of afwezigheid van nageschakelde technieken bij deze installaties is direct van invloed op de emissie (IRBEA, 2016; AEA, 2010). Deze metingen zijn uitgevoerd voor 2010. Daarnaast laat deze studie zien dat ook het op- en afregelen van biomassaketels van grote invloed is op de stofemissie van biomassaketels: continue belasting laat een lagere emissie zien dan tijdens op- en afregelen van de biomassaketel.

¹⁴ Analyse van het 25 percentiel laat zien wat de best-presterende installaties qua emissieniveau behalen. Dit kan bijvoorbeeld dienen als benchmark.

Tabel 6 Stofmetingen en NO_x-metingen aan ketels groter dan 1 MW_{th} (IRBEA, 2016)

Producent en type	Test-jaar	Vermogen (kW)	Brand-stof	PM-emissie (g/GJ)	PM-emissie (mg/Nm ³ , 6% O ₂) ¹⁵	NO _x -emissie (g/GJ)	NO _x -emissie (mg/Nm ³ , 6% O ₂) ¹⁵
Kohlbach K8-5000	2008	5325	Chip	2,6	8	76,1	225
Gilles HPK-UTSK 1600	2005	1600	Chip	42,3	125	64,4	190
Binder RRK 2500-3000	2005	3000	Chip	48,8	144	82,6	244
Kohlbach K8-1600	2008	1600	Chip	50,7	150	63,7	188

Kleine ketels (0,5 – 1 MW_{th})

Een set praktijkmetingen aan ketels tussen 0,5 en 1 MW_{th} is weergegeven in Tabel 7 (IRBEA, 2016). Deze metingen laten zien dat de onbestreden fijnstofemissie (en ook de NO_x-emissie) aanzienlijk kan fluctueren tussen verschillende stookinstallaties en brandstoffen. Het valt daarbij op dat het gebruik van pellets niet noodzakelijk leidt tot een lagere stofemissie. Slechts één meting laat zien dat de betreffende installatie aan de huidige eis in het Activiteitenbesluit voldoet, zonder nageschakelde techniek. De meeste van deze metingen zijn ruim voor 2010 uitgevoerd, waardoor dit mogelijk onvoldoende representatief is voor de nieuwste generatie stookinstallaties.

Tabel 7 Stofmetingen en NO_x-metingen aan ketels tussen 0,5 en 1 MW_{th} (IRBEA, 2016)

Producent en type	Test-jaar	Vermogen (kW)	Brand-stof	PM-emissie (g/GJ)	PM-emissie (mg/Nm ³ , 6% O ₂) ¹⁵	NO _x -emissie (g/GJ)	NO _x -emissie (mg/Nm ³ , 6% O ₂) ¹⁵
Kohlbach Metnitz	2009	632	Chip	11,6	34	63,6	188
Hoval STU 800 Wood pellet boiler	2006	800	Pellet	25	74	90	266
Binder RRK 640 – 850	2005	840	Chip	16,9	49	65,7	194
Gilles HPK-UTSK 550	2006	550	Chip	32,5	96	52	154
Gilles HPK-UTSK 900	2005	900	Pellet	32,5	96	93,6	277

Deze studie omvat ook veel metingen aan biomassa-installaties kleiner dan 0,5 MW_{th}, maar deze zijn niet opgenomen in Tabel 7 (IRBEA, 2016). Veel van deze metingen zijn afkomstig van het Josephinum Institut, maar zijn uitgevoerd tussen 1999 en 2009.

¹⁵ Omrekening naar STP (=standaard temperatuur en druk; 0°C en 1.013 bar) en droog rookgas. Omrekening gebaseerd op aanname: droog hout=19,65 MJ/kg en 4.747 m³ droog rookgas/kg hout bij STP.

Er is in bijlage C een nieuwe analyse uitgevoerd van meetrapporten van het Josephinum Institut, waarbij ook nieuwere metingen, uitgevoerd in de periode tot 2014, zijn geanalyseerd. Dit is dus een overzicht van een groot aantal meetrapporten van kleinere ($<0,5 \text{ MW}_{\text{th}}$) houtketels op houtsnippers, ook wel houtchips genoemd, en pelletketels. Deze meetresultaten zijn relevant, omdat het emissieprofiel voor dergelijke kleine ketels, ook verwacht mag worden voor ketels in een wat grotere vermogensklasse, zoals $0,5$ tot 1 MW_{th} . Voor de houtsnipperketels ligt de emissie van ketels van 20 tot $400 \text{ kW}_{\text{th}}$ in de bandbreedte van 38 tot 47 mg fijnstof/ Nm^3 bij $6\% \text{ O}_2$. Houtpelletketels liggen vrijwel allemaal beneden de 38 mg fijnstof/ Nm^3 bij $6\% \text{ O}_2$. Dit betekent dat diverse ketels commercieel beschikbaar zijn, die kleiner zijn dan 1 MW_{th} en die voldoen aan de huidige eis van $40 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ zonder nageschakelde techniek (Josephinum Institut, 2014).

2.3 Nageschakelde technieken voor stofverwijdering uit rookgas

Bij biomassaketels wordt vrijwel standaard tenminste een cycloon of een multi-cycloon toegepast om stof uit het rookgas te verwijderen (Ricardo, 2019). Dit type separator werkt op basis van middelpuntvliedende krachten. Cyclonen verwijderen vooral grotere deeltjes effectief, zo wordt circa $50\% - 75\% \text{ PM}_{10}$ verwijderd. Voor $\text{PM}_{2.5}$ is het verwijderingsrendement echter $5\% - 10\%$. Zoals beschreven in § 2.1, is zeker ook $\text{PM}_{2.5}$ gezondheidsrelevant en juist deze fractie wordt beperkt verwijderd door (multi-)cyclonen. Daarom dient er een combinatie met aanvullende, nageschakelde technieken te worden gemaakt om (aanzienlijk) lagere stof-emissies te realiseren (Ricardo, 2019). Hiervoor worden meestal combinaties gemaakt met ofwel doekenfilters (fabric filters) ofwel elektrostatische filters (ESP-filters) (Nussbaumer, 2006; Nussbaumer, 2017; Ricardo, 2019; IRBEA, 2016).

Doekenfilters zijn geschikt om zowel grofstof als fijnstof af te vangen (Larrivee, 2018). Elektrostatische filters zijn met name geschikt om fijnstof (PM_{10} en $\text{PM}_{2.5}$) af te vangen (Larrivee, 2018). Doekenfilters verwijderen stof met een hoge verwijderingsgraad: ca 99% van het stof of meer wordt verwijderd (Nussbaumer, 2006; IRBEA, 2016). Bij algemene vergelijkingen wordt voor ESP-filters een stofverwijderingsrendement van meer dan 95% gerapporteerd en dit kan, net als voor doekenfilters, toenemen tot meer dan 99% (Nussbaumer, 2006; IRBEA, 2016). Het verwijderingsrendement kan hiervan echter (neerwaarts) afwijken, zoals beschreven in § 2.3.1 en § 2.4.1. Dit hangt onder meer samen met de technische vormgeving van de ESP (Nescaum, 2008; Beauchemin, 2008)¹⁶. Het is daarom wellicht zinvol om een testrapport bij inbedrijfstelling op te laten stellen, zodat de praktijkmeting ook overlegd kan worden. Overigens is het verwijderingsrendement bij ESP-filters van PM_{10} veelal hoger dan van $\text{PM}_{2.5}$.

Tenslotte kan ook katalytische naverbranding (bijvoorbeeld met keramische filters) worden toegepast (Tytgat, 2017; IRBEA, 2016).

¹⁶ Door meerdere E-velden achter elkaar te plaatsen in een ESP kan het verwijderingsrendement toenemen. Daarnaast kan ook het spanningsniveau en de geleidbaarheid van de stofdeeltjes en de deeltjesgrootteverdeling van invloed zijn op het verwijderingsrendement bij een ESP.

In de praktijk wordt dit zelden gerapporteerd als toegepaste, nageschakelde techniek voor biomassa-installaties (Ricardo, 2019; Nussbaumer, 2006)¹⁷.

2.3.1 ESP-filters bij biomassaketels

Onderzoek van het DBFZ (Deutsche Biomasseforschungszentrum) voor de fabrikant Schröder Abgastechnologie laat zien dat met de AL-TOP, een type ESP-filter, hoge verwijderingsrendementen voor stof zijn behaald (zie Tabel 8)¹⁸. Dit filter is commercieel beschikbaar tot 300 kW_{th} (Schröder, 2017a). Schröder Abgastechnologie heeft meerdere typen ESP-filters in portfolio, commercieel beschikbaar tot 600 kW_{th}. De fabrikant geeft zelf aan dat deze dubbel toegepast kan worden tot 1,2 MW_{th} (Schröder, 2017b; Schröder, 2017c; Schröder, 2020).

DBFZ heeft voor de metingen aan het AL-TOP filter houtpellets en 'Agrarsticks' gemeten; 'Agrarsticks' zijn biomassapellets gemaakt van met name agrarische (rest)stromen, zoals Miscanthus (DBFZ, 2012). De metingen laten onbestreden stofconcentraties zien, nabij 40 mg stof/Nm³ bij 6% O₂. Na het ESP-filter daalt de stofconcentratie tot 8 à 11 mg stof/Nm³ bij 6% O₂. Daarnaast zijn er verwijderingsrendementen ten aanzien van stof haalbaar van 80% tot 89%.

Tabel 8 Stofmetingen en verwijderingsrendementen van AL-TOP filter van Schröder, bepaald door DBFZ. De concentratie stof in mg/Nm³ is bij 13% O₂; tussen haakjes () de omgerekende waarde bij 6% O₂ (Schröder, 2017a)

Meting	Concentratie in rookgas voor filter	Concentratie in rookgas na filter	Verwijderingsrendement
Metingen met houtpellets			
1	20 (38)	4 (8)	80%
2	21 (39)	4 (8)	81%
3	21 (39)	4 (8)	81%
gemiddelde	21 (39)	4 (8)	81%
Meting	Concentratie in rookgas voor filter	Concentratie in rookgas na filter	Verwijderingsrendement
Metingen met 'Agrarsticks'			
1	53 (100)	6 (11)	89%

Daarnaast is door één van de fabrikanten van biomassaketels een aantal metingen uit 2019 beschikbaar gesteld met betrekking tot snipperhoutketels (<0,5 MW_{th}), die zijn uitgerust met een ESP. Deze metingen laten zien dat de onbestreden stof-emissie varieert tussen 25 en 30 mg/Nm³ bij 6% O₂. Dit is wat lager dan beschreven in § 2.2; wellicht wordt dit veroorzaakt door verdergaande verbetering van ketel-ontwerp ten opzichte van de metingen beschreven in § 2.2. Daarnaast laten deze metingen zien dat toepassing van een ESP resulteert in een gemeten stofemissie van 0 tot 1,5 mg/Nm³ bij 6% O₂.

¹⁷ Bij dieselauto's worden ook roefilters toegepast. Diesel bevat echter veel minder asresten dan biomassa, zodat verstopping veel minder snel optreedt. Ook kleine biomassa ketels en kachels (en openhaarden) kunnen veel roet geven door onvolledige verbranding. De klasse ketels waar het in dit rapport over gaat, moeten een goede verbranding hebben en kunnen hooguit wat roetvorming geven als ze (koud geworden) worden aangestoken.

¹⁸ Een literatuurstudie van de universiteit van Antwerpen laat ook vergelijkbare verwijderingsrendementen zien, maar ook een grotere spreiding (Tytgat, 2017, pag 26-27). Bovendien gaat het in deze studie om kleinere (huishoudelijke) ketels en kachels.

Dit laat zien dat bij toepassing van een ESP, die commercieel ruimschoots beschikbaar is voor biomassaketels, verwacht mag worden dat de stofemissie zeer veel lager is dan de huidige emissie-eisen voor de vermogenscategorieën 0,5 – 1 MW_{th} en 1 - 5 MW_{th}.

Er is bij de inventarisatie van de technologische mogelijkheden voor stofreductie gebleken dat ESP's veelvuldig worden toegepast op biomassaketels. Er zijn fabrikanten benaderd en er is ook gesproken met enkele leden van de branche-organisatie Nederlandse vereniging van Biomassa Ketel Leveranciers (NBKL). Niet alle ketelleveranciers in Nederland zijn overigens lid van deze branche-organisatie. De NBKL geeft zelf aan dat een aanscherping van de stofnorm voor kleine biomassaketels wenselijk is: binnen de NBKL is er consensus over deze aanscherping. De opvatting van ketelleveranciers buiten de NBKL is niet bekend. Een aantal leden van de NBKL biedt (relatief kleine) biomassaketels aan met een ingebouwd elektrostatisch filter (ESP-filter), maar daarnaast wordt een ESP ook als separate, nageschakelde techniek regelmatig toegepast, ook bij ketels met een aanzienlijk kleiner vermogen dan 0,5 MW. Een voorbeeld is een 150 en 300 kW_{th} installatie op Texel (Woonstede Nesland, 2013).

Uit de inventarisatie van Ricardo omtrent middelgrote installaties (1-50 MW_{th}) blijkt dat ESP's, maar ook doekenfilters, zeer regelmatig worden toegepast bij middelgrote biomassaketels (Ricardo, 2019). Ook uit deze inventarisatie blijkt dus dat ESP's zowel commercieel beschikbaar zijn als mede worden toegepast in de praktijk.

Enkele voorbeelden van fabrikanten die ESP's commercieel aanbieden: het Oostenrijkse Ionitec, het Oostenrijkse HERZ¹⁹, het Duitse Schröder Abgastechnologie en het Italiaanse Tama Aernova. Deze fabrikanten rapporteren 80%-85% stofreductie met behulp van een ESP. Ionitec richt zich op een brede vermogenscategorie aan stookinstallaties voor biomassa (ESP-filters voor 0,2 tot 14 MW_{th}), terwijl Schröder zich juist richt op kleinere vermogens stookinstallaties voor biomassa (diverse types: <40 kW_{th} tot 200-600 kW_{th}) (Schröder, 2017b; Schröder, 2020). In het algemeen lijkt het ESP-filter momenteel de belangrijkste nageschakelde technologie voor stofreductie bij biomassaverbranding te zijn²⁰. Het Italiaanse Tama Aernova biedt eveneens doekenfilters (baghouses) aan voor diverse toepassingen, inclusief biomassaverbranding, maar noemt op haar website het ESP-filter specifiek voor biomassaverbranding (Tama Aernova, 2019).

2.3.2 Doekenfilters bij biomassaketels

Naast voornoemde ESP-filters kunnen ook doekenfilters worden toegepast bij biomassaketels. Enkele praktijkvoorbeelden van toegepaste doekenfilters in Nederland: diverse installaties van HoSt, zoals in Eindhoven (5,75 MW_{th}), in Lelystad (15 MW_{th}) en in Horst (4,6 MW_{th}) die in januari 2020 gereed komt (HoSt, 2019a; HoSt, 2019b; HoSt 2019c)²¹.

¹⁹ Ter illustratie: HERZ levert bij zijn Firematic (45-500 KW) en BioFire (0,5-1,5 MW) elektrofilters met een verwijderingsgraad van 80%. Ook plaatsing bij bestaande ketels is mogelijk (HERZ, 2019).

²⁰ Doekenfilters kennen veelal een grotere drukval dan ESP-filters en vereisen ook maatregelen met betrekking tot brandveiligheid. Als een doekenfilter is beschadigd, heeft dit een negatief effect op de afvangst.

²¹ Er zijn meer voorbeelden. In Kals am Großglockner in Oostenrijk is een installatie met een 1 MW_{th} en 0,5 MW_{th} ketel voorzien van een doekenfilter (Froeling, 2018).

Ook bij de biomassa-installatie van Attero (10 MW_{th}) in Odiliapeel is een doekenfilter toegepast. Doekenfilters zijn commercieel beschikbaar, bijvoorbeeld het Italiaanse Tama Aernova biedt doekenfilters (baghouses) aan voor diverse toepassingen, inclusief biomassaverbranding (Tama Aernova, 2019).

Uit de inventarisatie van Ricardo omtrent middelgrote installaties (1-50 MW_{th}) blijkt dat doekenfilters zeer regelmatig worden toegepast bij biomassaketels (Ricardo, 2019). Voor de categorie 1-5 MW_{th} zijn er drie metingen beschikbaar gesteld, waarbij de ketel was uitgerust met een doekenfilter. De meetresultaten resulteerden in waarden van 18,9 en 3,87 en 0,37 mg stof/Nm³ bij 6% O₂.

Doekenfilters kennen veelal een grotere drukval dan ESP-filters, wat mogelijke eisen kan stellen aan de installatie om voldoende rookgasdebiet te garanderen. Daarnaast vereist een doekenfilter voldoende maatregelen ten aanzien van brandveiligheid. Een doekenfilter heeft echter als voordeel dat het een geschikte technologie is voor stof-afvangst indien kalkinjectie in de vuurhaard wordt toegepast (met behulp van kalkinjectie kan de SO₂-emissie worden gereduceerd).

2.3.3 Katalytische naverbranding bij biomassaketels

Een alternatieve mogelijkheid om de stofemissie te verminderen is katalytische naverbranding, al dan niet op een keramisch filter. Voordeel is dat behalve de uitstoot van fijnstof, ook andere emissies, die gerelateerd zijn aan onvolledige verbranding, met name CO en koolwaterstoffen, worden gereduceerd (Tytgat, 2017; pag 30, 31 en 32). Deze studie van Tytgat behandelt veel kleinere installaties (<0,5 MW_{th}). Parallel aan de toepassing bij kleine ketels wordt in de Verenigde Staten bij ongeveer 15% van de goedgekeurde kachels een katalytische naverbrander toegepast. Rapportages uit 2011 beschrijven hoge reductiepercentages zowel voor totaal-stof (TSP) als Vluchtige Organische Stoffen (VOC's) en CO. Praktijkmetingen laten echter aanzienlijk lagere reductiepercentages zien.

Tytgat beschrijft dat de kennis over dit soort katalysatoren sindsdien sterk is verbeterd (Tytgat, 2017). Metingen laten reducties zien van CO: > 95%, OGC (Organic Gaseous Compounds oftewel VOC's): > 60%, PM: ~30% (Reichert 2018). Het is echter onduidelijk wat het verwijderingsrendement is op lange termijn. Nieuwe type katalysatoren voor stookhoutkachels zijn nog steeds in onderzoek (Mack, 2016).

Dergelijke nageschakelde technieken worden, voor zover bekend, nog niet toegepast bij middelgrote biomassaketels.

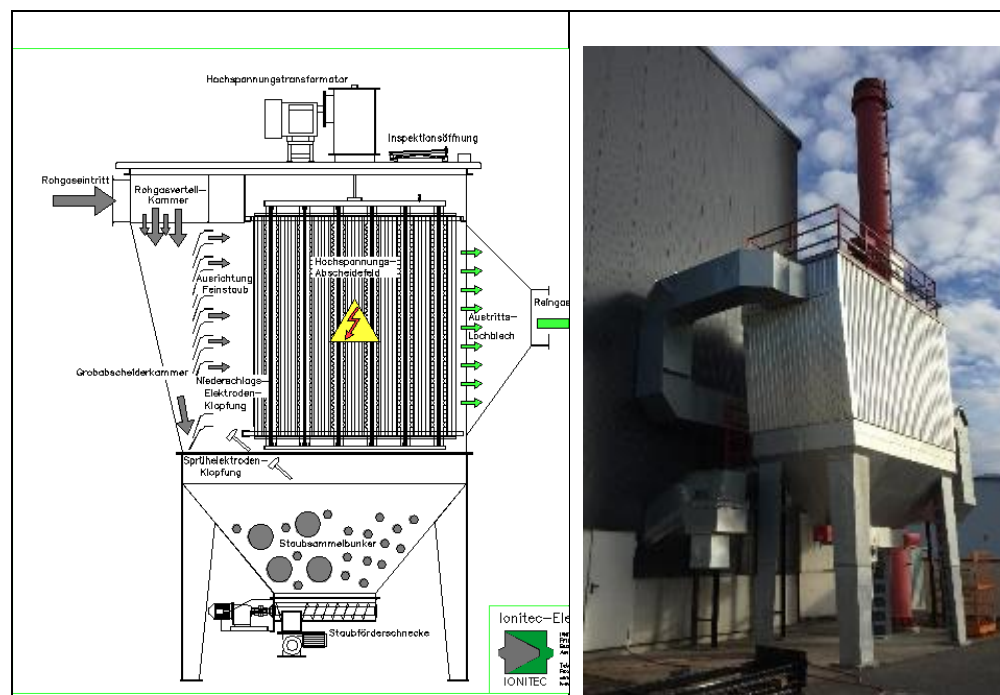
Mede omdat de emissiereductie van stof beperkt is, is deze techniek niet geschikt om de stofemissie substantieel naar beneden te brengen. Wel kan deze techniek een oplossing bieden voor emissiereductie van VOC's en CO. Dit zijn componenten die typisch gerelateerd zijn aan onvolledige verbranding.

2.3.4 Retrofit toepassingen stoffilters

Er hebben zich veel ontwikkelingen voorgedaan op het gebied van stoffilters in de afgelopen decennia en in het algemeen kan gesteld worden dat er geen technische beperking is om bij een bestaande installatie een filter te plaatsen, ook wel retrofit

toepassing genoemd²². Bij kleine installaties kan een filter direct achter de verbrandingsinstallatie in de schoorsteen geplaatst worden of eventueel boven op het dak op de schoorsteen. In Duitsland worden op grote schaal dergelijke filters bij bestaande installaties geplaatst (zie ook informatie in bijlage D).

De meerkosten van toepassing van stoffilters bij bestaande installaties in vergelijking met nieuwe installaties worden naar verwachting met name beïnvloed door engineering, aanpassingen aan het rookgaskanaal en de separate levering (ten opzichte van totaal-levering bij een nieuwe installatie). Voor kleinere installaties zullen de meerkosten relatief beperkt blijven. Bij grotere ketels echter kunnen meerkosten beïnvloed worden door bouwkundige aanpassingen, zoals het verstevigen van een fundering of het uitbreiden van het ketelgebouw. Een mogelijke barrière is een eventueel ruimtegebrek nabij de installatie; een mogelijke oplossing kan zijn om de installatie buiten te plaatsen (zie Figuur 1). Een geschikte vuistregel voor de meerkosten voor industriële elektrofilters bij bestaande installaties is een retrofit factor van 1,3 tot 1,5 (ofwel 30% tot 50% hogere investeringskosten dan bij een nieuwbouw situatie) (Turner, 1988). De daadwerkelijke meerkosten voor retrofit toepassingen van stoffilters bij biomassaketels is niet nader gecontroleerd: voor zover bekend wordt dit beperkt toegepast bij bestaande biomassaketels.



Figuur 1 Stoffilter van Ionitec (Bron: <http://ionitec.co.at/de/content/filter-de>). Links schematische weergave van de installatie en rechts een afbeelding van de installatie in Heberndorf (3 MW_{th}). De installatie staat buiten en vereist dus geen uitbreiding van het gebouw.

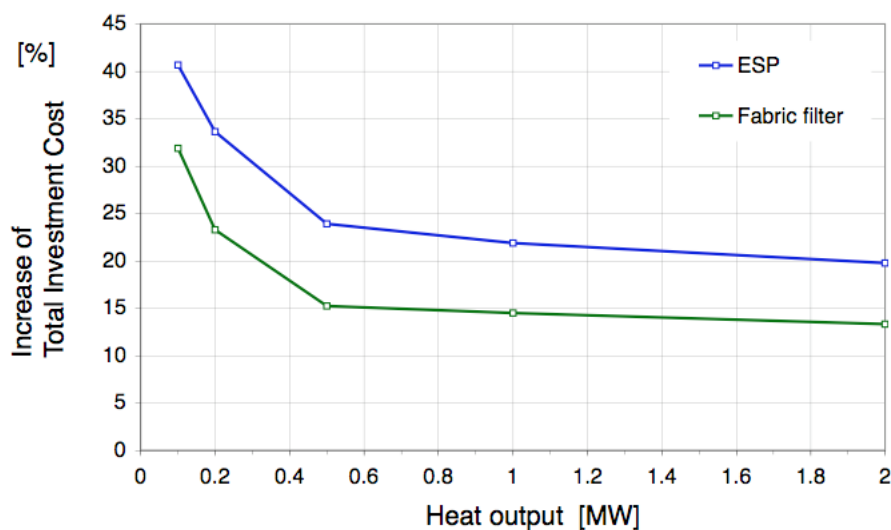
²² Voorbeeld in deze folder: https://www.herz-energie.at/tl_files/members/Werbung%20=%20Advertising/Prospekte%20=%20Brochures/German%20=%20Deutsch/Filtertechnik_Deutsch_%28d02-2018%29_V1.0.pdf

2.4 Kosten stoffilters

Doekenfilters kennen lagere investeringskosten, maar hebben hogere exploitatiekosten (Larrivee, 2018). Elektrostatisch filters zijn duurder qua investering, maar zijn weer goedkoper in de exploitatie (Larrivee, 2018).

Nussbaumer heeft in 2010 een rapport uitgebracht, waarin de kostprijsverhoging van biomassaketels is gerapporteerd ten gevolge van toepassing van nageschakelde stoffilters. Ook in deze studie wordt bevestigd dat toepassing van een ESP duurder is dan toepassing van een doekenfilter: ca 23% - 24% meerkosten voor een ESP-filter bij een installaties van 0,5 MW_{th}, zie Figuur 2 (Nussbaumer, 2010). Dit is een prijs-referentie van 2010 en de kosten voor filters zijn sindsdien substantieel gedaald door ontwikkelingen in onder andere Duitsland, Oostenrijk en Zwitserland. Recente kostencijfers voor doekenfilters zijn bij TNO echter niet beschikbaar. Figuur 2 maakt duidelijk dat bij kleine installaties de meerkosten relatief hoog zijn.

Voor eerdere werkzaamheden zijn kosten van nageschakelde filters voor houtketels gedeeld, afkomstig van Royal Haskoning uit 2011. De toenmalige prijzen voor ESP-filters lagen substantieel hoger dan de huidige prijzen voor ESP-filters (zie paragraaf 2.4.1 en Tabel 9). Dat bevestigt voornoemde prijsdaling. Overigens waren ook toen de prijzen voor ESP-filters aanzienlijk hoger dan voor doekenfilters.



Figuur 2 Stijging van de totale investeringskosten (procentueel) door toepassing van een filter (Nussbaumer, 2010)

Het Duitse Schröder heeft een prijslijst uit 2017 beschikbaar gesteld voor uiteenlopende typen ESP-filters (Schröder, 2017c). Hieruit kan afgeleid worden dat een elektrofilter met een afvangst van 85% tot 90% en automatische as-afvoer voor een 0,5 MW_{th} ketel in de orde van 30-35 keuro kost. De fabrikant geeft aan dat met deze filters aan stof-normen van 20 mg/Nm³ bij 13% O₂ kan worden voldaan; omgerekend is dit 38 mg/Nm³ bij 6% O₂.

Het Duitse HDG geeft filterprijzen voor 2019 (HDG, 2019). Voor een elektrofilter (OekoRona) met 80% stofafvangst bij een 300-400 kW_{th} installatie wordt een prijs genoemd van 10 tot 20 keuro en 14 tot 27 keuro als de installatie wordt uitgerust met een automatisch as-afvoer. De prijsrange wordt mede bepaald door uitvoering met 1 filter of seriële uitvoering met een dubbel filter. De investeringskosten kunnen hoger worden als bijvoorbeeld een bypass nodig is: ca 1,5 tot 2 keuro.

De aanschafkosten voor een 400 kW_{th} ketel is ca 75 keuro (HDG, 2019). Dit is exclusief brandstofopslag, schoorsteen, gebouw, regeling van de installatie en dergelijke. Een stookinstallatie op biomassa van 0,5 MW_{th}, inclusief installatie en voorraadsilo voor de brandstof, kost circa 150 – 175 keuro (KWIN, 2016-2017). Onder een prijs-aanname van 30 keuro voor een ESP-filter wordt de totale prijs voor een biomassaketel circa 17% - 20% hoger ten opzichte van een installatie zonder ESP-filter. Een dergelijke verhoging van de kostprijs ten gevolge van toepassing van een ESP-filter ligt wat lager dan de kostprijsverhoging zoals gerapporteerd door Nussbaumer: zoals voornoemd zo'n 23%-24% (Nussbaumer, 2010). De kostprijsverhoging is vergelijkbaar tussen deze analyses en bevestigt daarmee de meerprijs. Het beperkte verschil kan veroorzaakt zijn door tussentijdse kostprijsdaling van met name filters, maar wellicht ook door het ontbreken van inpassingskosten voor het filter. De meerkosten voor grotere vermogens (1-5 MW_{th}) zal zeker niet hoger zijn dan gerapporteerd door Nussbaumer: ca 13%-22%.

2.4.1 Emissiereductiekosten

In deze studie worden, naast de technische mogelijkheden die in kaart zijn gebracht en de daaraan verbonden investeringskosten, ook de emissiereductiekosten bij benadering bepaald, zodat in een latere fase een (politieke) keuze gemaakt waarbij kosten en baten worden afgewogen.

In Tabel 9 is de kosteneffectiviteit voor kleine ketels, uitgedrukt in euro per kg vermeden emissie, gebaseerd op de recente kostengegevens voor een ESP-filter van Schröder (Schröder, 2017c), kostengegevens voor ESP-filters van HDG (HDG, 2019) en kostengegevens voor een doekenfilter voor 1,1 MW_{th} biomassaketel via mondelinge informatie van Royal Haskoning uit 2011. In het algemeen worden de kosten voor ESP-filters sterk bepaald door de mate van automatisering van de reinigingsmethode om het filter zelf schoon te maken. Er zijn relatief goedkope ESP-filters beschikbaar, zeker voor kleine stookinstallaties (<0,5 MW_{th}), maar deze moeten regelmatig handmatig gereinigd worden. Voor berekening van de emissiereductiekosten is verondersteld dat automatisering veelal wenselijk is, waardoor de operationele kosten overigens weer lager zullen zijn. Er is een combinatie van berekeningen uitgevoerd voor zowel ESP's met 1 veld als met 2 velden. Deze verschillen onderling in verwijderingsrendement van stof (enkel filter versus dubbel filter). Daarnaast is een kostenpost voor onderhoud en elektriciteitsverbruik toegevoegd aan de berekening, afgeleid uit cijfers voor kleinere installaties (DBFZ, 2015). Door toepassing van een schaafactor op de investeringen (factor 0,7), is ook een berekening uitgevoerd voor 1 MW_{th}. Een 1-velde ESP bij een houtketel van 0,4 MW_{th} heeft een vergelijkbare kosteneffectiviteit als een 2-velde ESP bij een 1 MW_{th} ketel. Hierbij wordt opgemerkt dat de berekeningen zijn gebaseerd op de aanschafkosten; de mogelijke kosten voor installatie en mogelijke inpassingskosten in de fysieke ruimte zijn dus niet meegenomen.

De gehanteerde rente in Tabel 9 is zowel 4% als 10%: een rentepercentage van 10% komt overeen met de huidige, voorgeschreven rekenmethodiek voor kosteneffectiviteit. Het rentepercentage van 4% benadert de huidige marktrente beter.

De investeringskosten, zoals weergegeven in Tabel 2, zijn gebaseerd op gegevens uit Tabel 9 en de studie van AMEC (AMEC, 2012).

Tabel 9 Kosteneffectiviteitsberekeningen voor ESP-filters op biomassaketels gebaseerd op gegevens van HDG (HDG, 2019) en Schröder (Schröder, 2017c) en een doekenfilter op biomassaketels (kosten volgens Royal Haskoning, gegevens uit 2011)

Vermogenscategorie (MW _{th})	0,4	0,4	0,6	1	1	1,1
Type ESP	1 veld	2 velden	Schröder Filterbox, meerdere elektroden	1 veld	2 velden	Doeken-filter
Investeringskosten (euro/kW _{th})	39	72,5	53	29,5	55	91
Kosten ESP-filter + bypass (in euro)	15500	29000	32000	29500	55000	100100
Onderhoud en elektriciteit (% van de investering)	6%	4%	4%	6%	4%	4%
Electro-mechanische afschrijving over 10 jaar, 4% rente (euro/jaar)	1910	3580	3945	3640	6780	12341
Electro-mechanische afschrijving over 10 jaar, 10% rente (euro/jaar)	2520	4720	5208	4800	8950	16291
Variabele kosten euro/jaar	930	1160	1280	1770	2200	4004
Aanname vollasturen/jaar	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Emissiereductie in mg/Nm ³ bij 6% O ₂	40 → 10	40 → 5	40 → 5	40 → 10	40 → 5	40 → 5
Emissiereductie in kg stof per jaar	44	51	76	110	129	140
Kosteneffectiviteit (euro/kg stof bij 10 jaar, 4% rente)	64	92	68	49	70	117
Kosteneffectiviteit (euro/kg stof bij 10 jaar, 10% rente)	78	114	85	60	87	145

In bijlage E zijn eveneens kosteneffectiviteiten berekend op basis van een AMEC-rapport uit 2012 (AMEC, 2012). Onder aanname van een onbestreden emissie van 40 mg/Nm³ komen de kosten voor installaties tussen de 1 en 50 MW_{th} uit op 24-32 euro/kg PM₁₀ vermeden. In dit rapport is eveneens gerekend met een onbestreden emissie van 100 mg/Nm³; dit is echter gebaseerd op emissie-eisen in een aantal andere, Europese landen en de aanname dat cycloon afwezig is.

De aanname hier is dat de huidige emissie-eis van 40 mg/Nm³ eveneens representatief is voor de onbestreden emissie, wat wordt ondersteund door beschreven emissiemetingen in § 2.2.

2.5 Mogelijke toekomstige emissie-eisen voor stof

Op basis van beschikbare technieken wordt in deze paragraaf een voorstel gedaan voor een mogelijke aanscherping van emissie-eisen.

Zoals eerder beschreven wordt bij biomassaketels vrijwel standaard tenminste een cycloon of een multi-cycloon toegepast om stof uit het rookgas te verwijderen (Ricardo, 2019). Dit kan worden gecombineerd met een ESP of een doekenfilter, waardoor een aanzienlijke reductie van stof wordt gerealiseerd. Deze combinatie is ook commercieel ruimschoots beschikbaar en wordt in de praktijk toegepast, ook bij een aantal (recente) initiatieven in Nederland.

Middelgrote stookinstallaties (5-50 MW_{th})

In bijlage F is een analyse opgenomen van rapportages van grote stookinstallaties (>50 MW_{th}). Uit deze inventarisatie blijkt dat 50% van deze grote ketels, gestookt op vaste biomassa²³, een emissie heeft van 5 mg stof/Nm³ of lager. De huidige eis van 5 mg/Nm³ voor biomassa-installaties in de categorie 5-50 MW_{th} is gelijk aan de eis voor grote stookinstallaties (>50 MW_{th}) en is gelijk aan hetgeen technisch goed realiseerbaar is voor een groot deel van de grote biomassaketels. Er ligt hierin dus geen aanleiding om aanscherping op grond van de stof-eis voor 5-50 MW_{th} te overwegen.

Uit de inventarisatie van Ricardo omtrent middelgrote ketels, gestookt op vaste biomassa (1-50 MW_{th}) in de EU, zie bijlage A, blijkt dat het 25 percentiel van de installaties op of onder 4 mg stof/Nm³ emitteert, zie ook § 2.2. Nagenoeg in alle gevallen zijn deze installaties uitgerust met een ESP of een doekenfilter (Ricardo, 2019). Er zijn dus ruimschoots stookinstallaties voor biomassa commercieel beschikbaar in de categorie 5-50 MW_{th} die aan de huidige eis van 5 mg stof/Nm³ kunnen voldoen. Maar ook uit deze inventarisatie blijkt dat er geen aanleiding is om aanscherping op grond van de stof-eis voor 5-50 MW_{th} te overwegen.

Middelgrote stookinstallaties (1-5 MW_{th})

Uit de inventarisatie van Ricardo omtrent middelgrote installaties (1-50 MW_{th}) blijkt dat er weinig rapportages beschikbaar zijn gesteld voor installaties tussen 1-5 MW_{th}, zie ook § 2.2 en bijlage A. Er zijn drie metingen beschikbaar gesteld in deze vermogenscategorie, waarbij de ketel was uitgerust met een doekenfilter. De meetresultaten resulteerden in waarden van 18,9 en 3,87 en 0,37 mg stof/Nm³ bij 6% O₂. Eén biomassaketel was alleen uitgerust met een multicycloon (99 mg stof/Nm³ bij 6% O₂). Zoals hiervoor beschreven zijn nageschakelde technieken om de stof-emissie te reduceren van biomassaketels, ruimschoots commercieel voorhanden en worden deze ook toegepast. Met behulp van deze technieken is het realistisch om onder 5 mg stof/Nm³ bij 6% O₂ te emitteren. Hier is dus aanscherping mogelijk van de eis voor 1-5 MW_{th}.

²³ Minimaal 90% vaste biomassa

Kleine stookinstallaties (0,5-1 MW_{th})

De categorie 0,5-1 MW_{th} kan eveneens uitgerust worden met nageschakelde technologie. Veelal zal hiervoor een ESP worden toegepast. Zoals hiervoor beschreven, is de emissie in deze categorie dan aanzienlijk lager dan de huidige eis. Het blijkt in een aantal gevallen mogelijk om beneden 5 mg stof/Nm³ bij 6% O₂ te halen, maar de onbestreden emissie ligt dan reeds relatief laag. Daarnaast wordt deze categorie gekenmerkt door regelmatig op- en afregelen van het vermogen. De NBKL geeft aan dat 20 mg stof/Nm³ bij 6% O₂ ruimschoots haalbaar moet zijn voor ketels kleiner dan 1 MW_{th} en indiceerde ook 15 mg stof/Nm³ bij 6% O₂ voor deze categorie. Op grond van de waarnemingen, zoals beschreven in § 2.2 en § 2.3.1 blijkt dat 10 mg stof/Nm³ bij 6% O₂ ruimschoots haalbaar moet zijn met behulp van een ESP en dat veruit de meeste ketels door toepassing van nageschakelde technologie hier aan kunnen voldoen.

Op basis van voorgaande constatering, zou het Ministerie de volgende aanscherpingen kunnen overwegen:

- Geen aanscherping van 5 mg stof/Nm³ bij 6% O₂ voor ketels van 5 - 50 MW_{th}
- Aanscherping van 20 mg stof/Nm³ bij 6% O₂ voor ketels van 1 tot en met 5 MW_{th} naar 5 mg stof/Nm³ bij 6% O₂
- Aanscherping van 40 mg stof/Nm³ bij 6% O₂ voor ketels kleiner dan 1 MW_{th} naar 10 mg/Nm³ bij 6% O₂

Deze grenswaarden lijken alleen gegarandeerd te kunnen worden met behulp van nageschakelde technieken. Zowel een ESP-filter als ook een doekenfilter zijn hiervoor geschikt en beschikbaar: voor de klasse 1-5 MW_{th} lijkt in ieder geval een efficiënte ESP (waarschijnlijk met 2 velden) of een doekenfilter nodig. Voor de klasse < 1 MW_{th} kan wellicht met een eenvoudig (1 veld) ESP worden volstaan in combinatie met een schone verbrandingstechniek. Wellicht dat een aantal zeer schone ketels, kleiner dan 1 MW_{th}, zonder ESP-filter aan de voorgestelde eis van 10 mg stof/Nm³ bij 6% O₂ kan voldoen: in bijlage C wordt een beperkt aantal pelletketels (<1 MW_{th}) gerapporteerd die aan deze eis voldoen, op grond van de gerapporteerde emissiemetingen²⁴.

2.6 Mogelijk reductie-effect bestaande ketels

Zoals beschreven in hoofdstuk 1 en Tabel 4 is het aantal ketels geïnterpreteerd, met name op basis van de subsidieregeling (SDE, 2020). Het effect van de mogelijke aanscherping op het bestaande ketelpark, indien toepassing van filters noodzakelijk wordt, is bij benadering uitgerekend (zie Tabel 10). Uitgangspunt hierbij zijn de emissie-niveaus bij de huidige eisen en mogelijk toekomstige eisen (0,5-1 MW_{th}: 40 → 10 mg stof/Nm³ bij 6% O₂; 1-5 MW_{th}: 20 → 5 mg stof/Nm³ bij 6% O₂). Daarnaast is het aantal vollasturen aangenomen op 3172 vollasturen per jaar, dat is het parkgemiddelde (zie Tabel 4).

De totale stofuitstoot van houtketels (exclusief huishoudens en bijstook in centrales) ligt in 2018-2019 rond de 90 ton. Hiervan is 35 tot 40 ton afkomstig van ketels tussen de 0,5 en 5 MW_{th}.

²⁴ Aandachtspunt hierbij is dat testmetingen in een laboratorium, met kwalitatief goed hout, voor stof een te gunstig beeld kan geven dan in de praktijk soms het geval is. Het Ministerie kan overwegen om naast een emissie-eis, ook een bepaalde verwijderingsgraad van een filter te eisen (>50%) of om met enige regelmaat een praktijkmeting voor stof uit te laten uitvoeren.

Verwacht wordt dat door toenemende biomassa inzet, buiten de huishoudens en bijstook in centrales, de stofemissie toeneemt met ca 30 ton stof/jaar in 2030 (Schoots & Hammingh, 2019; PBL et al, 2020).

Tabel 10 Omvang emissiereductiepotentieel voor stof op het bestaande, gesubsidieerde ketelpark van 0,5-5 MW_{th}. De berekende reductiewaarden zijn afgerond.

Vermogen (thermisch input)	Aantal ketels gerealiseerd onder SDE 2010-2019	Vermogen ketels gerealiseerd onder SDE 2010-2019	Jaarlijkse vollasturen	Ketels gerealiseerd onder SDE 2010-2018
0,5-1 MW	126 ketels	81 MW	3172	Reductie ca 9 ton stof/jaar
1-5 MW	27 ketels	59 MW	3172	Reductie ca 3 ton stof/jaar
5-50 MW	11 ketels	180 MW	3172	Geen reductie, omdat hier geen aanscherping van toepassing is
				Totale reductie ca 13 ton stof/jaar

In Tabel 4 is het beschikte en het gerealiseerde ketelpark volgens SDE-gegevens weergegeven. Het verschil tussen deze gegevens betreft biomassaketels die nog, met reeds verkregen subsidiebeschikking, gerealiseerd kunnen worden. Hieruit blijkt dat zowel het aantal ketels als het vermogen van het ketelpark kan verdubbelen, indien al deze initiatieven gerealiseerd zouden worden.

3 NO_x

3.1 Inleiding NO_x uit biomassaverbranding

De NO_x-vorming bij biomassaverbranding is sterk gerelateerd aan de hoeveelheid stikstof in de brandstof, ook wel brandstof-NO_x genoemd. Naast brandstof-NO_x kan ook thermische NO_x ontstaan (Houshfar et al, 2012a; Houshfar et al, 2012b; Carroll et al, 2015; Van Loo & Koppejan, 2008).

Behalve houtpellets en houtchips worden ook andere vaste biomassastromen toegepast in biomassaketels, zoals zeefoverloop van composteer-installaties (niet afgebroken GFT afval), houtchips met relatief hoog aandeel naald en blad, torrefieerd of steam exploded pellets van hout en landbouwafval, gepelletiseerde biomassa, torwashed pellets, etc. Dergelijke biomassastromen kunnen een afwijkende samenstelling hebben van schoon hout, waaronder een (aanzienlijk) hoger stikstofgehalte. Naast effect op corrosie en vervuiling van de installatie zelf, kunnen bij dergelijke biomassastromen de NO_x-emissies toenemen in vergelijking met (schone) houtpellets en houtchips.

De emissie van NO_x wordt gerelateerd aan negatieve gezondheidseffecten (WHO, 2005; WHO, 2013; Maas et al, 2015). De World Health Organization (WHO) heeft daarom een advieswaarde opgesteld voor NO_x (advieswaarde is 40 µg/m³ jaargemiddeld) (WHO, 2005). Deze advieswaarde is gelijk aan de Europese Richtlijn Luchtkwaliteit (EC, 2008). De NO_x-emissie van middelgrote stookinstallaties wordt daarom gereguleerd: de huidige NO_x-emissie-eisen uit (middelgrote) stookinstallaties, gestookt op vaste biomassa, zijn opgenomen in Tabel 11.

Tabel 11 Overzicht van NO_x-normen waar biomassaketels aan moeten voldoen (Ab, 2020)

Vermogen per doelstof	Huidige eis (mg NO _x /Nm ³ , droog rookgas bij 6% O ₂ , STP)
NO_x	
> 5 MW _{th}	145
1 - 5 MW _{th}	275
< 1 MW _{th}	300

Eerdere studies naar mogelijke NO_x-eisen lieten zien dat door toepassing van nageschakelde technieken wel aanscherpingen mogelijk zijn, maar uiteindelijk is er voor gekozen om de vermogens kleiner dan 5 MW_{th} geen NO_x-eis op te leggen die toepassing van nageschakelde technieken noodzakelijk zouden maken (Kroon & Wetzels, 2008; Kroon & Plomp, 2013). Een nadrukkelijke overweging hierbij was de groei van biomassa als duurzame brandstof niet zwaar te beperken. Naar verwachting neemt de totale, nationale NO_x-emissie in de toekomst af, maar neemt de emissie van NO_x uit biomassastook toe onder invloed van stimuleringsbeleid, naar inschatting tot 1,3 kton in 2030 (PBL et al, 2020; Schoots & Hammingh, 2019).

3.2 Emissie-eisen voor NO_x in relatie tot praktijk-emissies

Middelgrote ketels 5-50 MW_{th}

Recent is door Ricardo Energy&Environment een grote inventarisatie uitgevoerd omtrent de emissieprofielen bij middelgrote stookinstallaties om de Europese Commissie te ondersteunen bij de uitvoering van de Richtlijn Middelgrote Stookinstallaties (Ricardo, 2019; EU, 2015b).

Ook de NO_x-emissie van diverse biomassagestookte installaties (1 tot 50 MW_{th}) is daarbij geïnventariseerd. De resultaten zijn in een eigen analyse nader uitgewerkt om een verdere uitsplitsing te maken in verschillende vermogensklassen. De resultaten laten zien dat:

- 20 - 50 MW_{th}: er zijn 18 NO_x-metingen in deze vermogensklasse beschikbaar gesteld. Deze varieerden van 107 tot 470 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂. Het gemiddelde was 270 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂. Het 25 percentiel in deze vermogenscategorie ligt op 165 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂.
- 5 - 20 MW_{th}: er zijn 22 NO_x-metingen in deze vermogensklasse beschikbaar gesteld. Deze varieerden van 84 tot 467 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂. Het gemiddelde was 248 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂. Het 25 percentiel in deze vermogenscategorie ligt op 173 mg stof/Nm³ bij 6% O₂.

Van het totaal van de biomassagestookte installaties in dit onderzoek heeft het 25 percentiel een NO_x-emissie lager dan 178 mg/Nm³ bij 6% O₂ en het 10 percentiel heeft een NO_x-emissie lager dan 100 mg/Nm³ bij 6% O₂ (zie bijlage A, Figuur 5). De installaties die aan deze voorwaarden voldoen zijn lang niet allemaal uitgerust met actieve rookgasreiniging, zoals SNCR (Ricardo, 2019). Zeker bij de installaties waar een hoge NO_x-emissie wordt gerapporteerd, komt het nogal eens voor dat er niet 100% biomassa in houtachtige vorm wordt verstookt, maar bijvoorbeeld ook turf, diesel en uiteenlopende typen biomassa-afval. Het voornoemde biomassa-afval voldoet (meestal) aan de Richtlijn Middelgrote Stookinstallaties (Richtlijn (EU) 2015/2193), artikel 18b (Ricardo, 2019). Dit komt overeen met de Nederlandse definitie van biomassa in het Activiteitenbesluit, zie bijlage B.

Middelgrote ketels 1-5 MW_{th}

De studie van Ricardo Energy&Environment omvat ook een aantal emissiemetingen voor 1 - 5 MW_{th} biomassaketels (Ricardo, 2019). Er zijn vier metingen aan NO_x-emissies in deze vermogensklasse beschikbaar gesteld. Deze varieerden van 98 tot 527 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂. Het gemiddelde was 248 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂. In deze vermogenscategorie is geen actieve rookgasreiniging gerapporteerd. Deze emissieniveaus benaderen dus de onbestreden NO_x-emissie bij regulier bedrijf, waarbij hooguit in het ontwerp rekening is gehouden om lage NO_x-emissies te realiseren.

Daarnaast zijn er ook NO_x-metingen aan ketels tussen 1 en 5 MW_{th} opgenomen in Tabel 6 (IRBEA, 2016). Hieruit blijkt dat de NO_x-emissie tussen 188 en 244 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂ ligt.

Kleine ketels 0,5-1 MW_{th}

In 2017 heeft het Duitse FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.) een nieuw overzicht gepubliceerd van snipperhoutketels (ketels op houtchips) (FNR, 2017).

In dit overzicht zijn deels ook NO_x-emissiegegevens opgenomen van ketels tussen de 0,5 MW_{th} en 1 MW_{th}, zie Tabel 12. De gepubliceerde emissies zijn gegeven bij 13% O₂. Dit is hier omgerekend naar 6% O₂. Overigens is voor het grootste deel van geïnterviewde ketels geen NO_x-emissie opgenomen²⁵. Op één uitzondering na is de emissie, gemeten onder laboratorium omstandigheden, van alle ketels lager dan 200 mg/Nm³ bij 6% O₂ (zie Tabel 12).

Dat NO_x-emissies beperkt worden gerapporteerd, blijkt ook uit overzichten van het Duitse FNR (FNR, 2013; FNR, 2017). Dit komt overeen met gegevens van fabrikanten: bij controle van de website van drie fabrikanten blijken geen NO_x-emissies te worden vermeld.

Tabel 12 NO_x-emissie van snipperhoutketels tussen de 0,5 MW_{th} en 1 MW_{th} (FNR, 2017)

Type	Vermogen (kW)	NO _x -emissie in mg/Nm ³ , 6% O ₂		Brandstof	Jaartal meting
		Vollast	Deellast		
Turbomat TM 500	500	126	143	Chips	2011
Turbomat TM 500	500	182	197	Pellets	2011
Lambdamat LM 750 KOM	750	167	177	Chips	2006
Lambdamat LM 100 KOM	1000	192	180	Chips	2008
GILLES HPKI-K 550	522	295	304	Chips	2006
Vitoflex 300-FFU 550	550	<188	<188	Dennenhout	2002
Vitoflex 300-FSB 550	550	<150	<150	Dennenhout	
Vitoflex 300-FFU 700	700	<188	<188	Dennenhout	2002
Vitoflex 300-FSB 700	700	<150	<150	Dennenhout	
Vitoflex 300-FFU 850	850	<188	<188	Dennenhout	2002
Vitoflex 300-FSB 850	850	<150	<150	Dennenhout	

Er zijn eveneens NO_x-metingen aan ketels tussen 0,5 en 1 MW_{th} opgenomen in Tabel 13 (IRBEA, 2016). Hieruit blijkt dat de NO_x-emissie tussen 154 en 277 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂ ligt.

Tabel 13 Stofmetingen en NO_x-metingen aan ketels tussen 0,5 en 1 MW_{th} (IRBEA, 2016)

Producent en type	Test-jaar	Vermogen (kW)	Brandstof	PM-emissie (g/GJ)	PM-emissie (mg/Nm ³ , 6% O ₂) ¹⁵	NO _x -emissie (g/GJ)	NO _x -emissie (mg/Nm ³ , 6% O ₂) ¹⁵
Kohlbach Metnitz	2009	632	Chip	11,6	34	63,6	188
Hoval STU 800 Wood pellet boiler	2006	800	Pellet	25	74	90	266
Binder RRR 640 – 850	2005	840	Chip	16,9	49	65,6	194
Gilles HPK-UTSK 550	2006	550	Chip	32,5	96	52	154
Gilles HPK-UTSK 900	2005	900	Pellet	32,5	96	93,6	277

²⁵ In de publicatie staan ook emissies van ketels < 0,5 MW_{th}. Die zijn niet in de tabel opgenomen.

Bijlage C bevat een analyse van NO_x-metingen, zoals beschreven in meetrapporten van het Josephinum Institut. Dit omvat uiteenlopende metingen vanaf de jaren '90 tot 2014. Dit betreft meetrapporten van een groot aantal kleinere (<0,5 MW_{th}) houtketels op houtsnippers, ook wel houtchips genoemd, en pelletketels (Josephinum Institut, 2014). De metingen resulteren in een bandbreedte van 180 - 360 mg/Nm³ (6% O₂), zie ook bijlage C. Deze meetresultaten zijn relevant, omdat het emissieprofiel voor dergelijke kleine ketels, ook verwacht mag worden voor ketels in een wat grotere vermogensklasse, zoals 0,5 tot 1 MW_{th}.

De metingen laten zien dat er relatief veel variatie mogelijk is in de praktijkwaarde van NO_x-emissies bij biomassaketels op vaste brandstof, indien er geen nageschakelde techniek wordt toegepast. Zoals beschreven in de volgende paragraaf, zal de brandstofkwaliteit het NO_x-profiel sterk beïnvloeden.

3.3 Brandstofkwaliteit en onbestreden NO_x-emissies

In circa 9 meetrapporten voor snipperhoutketels van het Josephinum Institut wordt het stikstofgehalte in de brandstof gerapporteerd (meetperiode 1996-2011): meestal 1,6 g/kg droge stof (0,16 wt-%) en twee keer 0,13 wt% (Josephinum Institut, 2014).

In de Phyllis2 database is een grote set samenstellingen van diverse soorten biomassa opgenomen (Phyllis2, 2019). Het gemiddelde over de beschikbare analyses van diverse soorten sparrenhout (douglas fir, fir, spruce, spruce sitca, white fir) resulteert in een stikstofgehalte van ca 0,18 wt% (droog, as-vrij; standaard deviatie 0,19; resultaat over 49 samples). Overige schone houtsoorten laten een range aan stikstofgehalten zien: gemiddeld 0,24 wt% (droog, as-vrij; standaard deviatie 0,25; resultaat over 182 samples; beuk, berk, naaldhout, populier en wilg). Het valt overigens op dat wilgenhout gemiddeld meer stikstof bevat (Phyllis2, 2019).

Het gemiddelde over de beschikbare analyses van diverse soorten bast (zowel loofhout als naaldhout) resulteert in een stikstofgehalte van ca 0,35 wt% (droog, as-vrij; standaard deviatie 0,20; resultaat over 27 samples). Het gemiddelde over de beschikbare analyses van diverse soorten houtige reststromen (park waste wood; residual wood; pruning, thinning wood) resulteert in een stikstofgehalte van ca 0,58 wt% (droog, as-vrij; standaard deviatie 0,38; resultaat over 23 samples). Het gemiddelde over de beschikbare analyses van diverse soorten naald en blad resulteert in een stikstofgehalte van ca 2,12 wt% (droog, as-vrij; standaard deviatie 1,46; resultaat over 7 samples) (Phyllis2, 2019).

Deze gegevens bevestigen dat biomassastromen met veel bast, en zeker ook naald en blad, resulteert in meer stikstof in de brandstof in vergelijking met voornoemde emissie-tests en andere soorten onbehandeld hout. Het grootste deel van de stikstof, gebonden aan de brandstof, komt echter niet vrij als NO_x tijdens verbranding: dat varieert tussen 1% en 25% van de hoeveelheid stikstof, volgens studie van Houshfar (Houshfar et al, 2012a). De NO_x-emissie neemt overigens niet lineair toe met de hoeveelheid stikstof in brandstof, maar resulteert in een lagere verhouding (Houshfar et al, 2012a; Houshfar et al, 2012b; Carroll et al, 2015; Van Loo & Koppejan, 2008).

In verhouding tot de huidige norm voor NO_x-emissies resulteert verbranding van pellets en stikstof-arme snippers in een (onbestreden) lagere emissie dan de huidige normen voor installaties kleiner dan 5 MW_{th}, zie ook paragraaf 3.2. Zoals beschreven in deze paragraaf, is het daarbij van belang om rekening te houden met de kwaliteit van de biomassa (in het bijzonder het stikstofgehalte) bij het voldoen aan bepaalde NO_x-emissiegrenswaarden.

3.4 Nageschakelde technieken voor NO_x-reductie

3.4.1 Toepassing van DeNO_x voor actieve rookgasreiniging

Zoals beschreven in § 3.2 en § 3.3 is de (onbestreden) NO_x-emissie relatief variabel en hangt sterk samen met de hoeveelheid stikstof in brandstof. Overigens wordt deze conclusie niet beschreven in de studie van Ricardo (Ricardo, 2019). Daarnaast kunnen er diverse technologieën worden toegepast om de NO_x-emissie te verlagen. Dit zijn grotendeels “niet-actieve” technieken gericht op vermindering van NO_x-vorming, zoals ‘air staging’, ‘exhaust/flue gas recirculation’, ‘fuel staging’ en ‘low NO_x design’ (Ricardo, 2019). Een aantal van deze technieken, zoals ‘air staging’ en ‘fuel staging’ zijn technisch verder toegelicht in het rapport van Nussbaumer (Nussbaumer, 2010).

Actieve rookgasreiniging van NO_x, ook wel DeNO_x genoemd, wordt toegepast om een lage NO_x-emissie te realiseren, door reductie van reeds gevormd NO_x. DeNO_x kan worden uitgevoerd zowel katalytisch (SCR: Selective Catalytic Reduction) als niet-katalytisch (SNCR: Selective Non-Catalytic Reduction). Er wordt hierbij gebruik gemaakt van een reductiemiddel (meestal ammoniak of ureum) dat met NO_x reageert tot stikstof en waterdamp. Het is mogelijk dat een klein deel van het reductiemiddel niet reageert en door de katalysator slipt. Dit verlaagt het rookgaskanaal als NH₃. Dit wordt ammoniakslip genoemd en is onwenselijk, zowel vanwege de financiële kosten als om milieuhygiënische redenen.

Er zijn slechts 3 voorbeeld-installaties met SNCR ingediend voor het onderzoek van Ricardo. Toepassing van SCR is geheel niet gerapporteerd (Ricardo, 2019).

Middelgrote ketels 5-50 MW_{th}

Bij installaties >5 MW_{th} wordt SCR toegepast om aan emissie-eisen te voldoen. In Nederland is een beperkt aantal biomassa-installaties van een dergelijke omvang gerealiseerd; daarbij wordt, voor zover bekend, SCR meestal toegepast²⁶. Overigens wordt nogal eens het reductiemiddel in de vuurhaard geïnjecteerd, waardoor er feitelijk een combinatie van SNCR en SCR ontstaat. De huidige eis van 145 mg/Nm³ wordt in principe ruimschoots gehaald en de emissie ligt (meestal) beneden 100 mg/Nm³ bij 6% O₂²⁷, zie voor praktijkvoorbeelden en vergunningen ook Tabel A.1 in bijlage A.

²⁶ De 5,75 MW_{th} ketel op houtsnippers in Eindhoven heeft dankzij SCR een NO_x emissie <70 mg/Nm³ (en door een doekenfilter een stofemissie <5 mg/Nm³) (HoSt, 2019a).

²⁷ Ter vergelijking: de drie nieuwste kolencentrales in Nederland kennen een NO_x-emissie van circa 50 tot 63 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂.

Bij deze waarden is eveneens de mogelijke ammoniakslip beperkt, zowel qua vergunning als op basis van metingen, tot minder dan 5 mg NH₃/Nm³ bij 6% O₂.

In Andijk is door HoSt recent een biomassa-installatie opgeleverd van 15 MW_{th}. Dit is een WKK (=Warmte-Kracht Koppeling) met 3,4 MW_e (HoSt, 2020a; HoSt, 2020b). De NO_x-uitstoot van deze biomassa-installatie is zeer laag en wordt gegarandeerd op maximaal 30 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂ met nog aanzienlijk lagere praktijkwaarden (HoSt, 2020c). Het doel is echter ook om CO₂ uit het rookgas te gaan gebruiken voor de kassen (HoSt, 2020c). Dat levert een financieel voordeel op ten opzichte van CO₂-inkoop, maar vereist wel diepe reiniging van het rookgas. Daarnaast wordt ook geen melding gemaakt van eventueel ammoniakslip. Dergelijke diepe NO_x-reducties kunnen daarom niet leidend zijn voor algemene regels voor deze vermogenscategorie.

Middelgrote ketels 1-5 MW_{th}

Bij biomassaketels tussen 1 en 5 MW_{th} kan SCR en SNCR toegepast worden en uit contacten in de markt blijkt dat dergelijke DeNO_x-technologie, zij het incidenteel, wel wordt toegepast bij biomassaketels²⁸.

Bij een recent gerealiseerd project in Zaandam zijn twee snipperhoutketels (1,2 MW_{th} respectievelijk 2 MW_{th}) uitgerust met DeNO_x-technologie. Daarbij wordt gebruik gemaakt van een combinatie van SNCR en SCR. Maar er wordt ook bij de grootste ketel een relatief nieuwe technologie voor warmteterugwinning toegepast (in dit geval de zogeheten 'Terrao exchanger'). Het ketelvermogen stijgt hierdoor van 2 naar 2,3 MW. Naast energieteterugwinning wordt ook (gedeeltelijke) NO_x-emissiereductie gerealiseerd (ook NH₃-slip wordt afgevangen). In essentie wordt bij de 'Terrao exchanger' het rookgas (als kleine belletjes) geleid door een vloeibaar uitwisselings-medium. Hierbij wordt warmte overgedragen en wordt ook een deel van de emissie overgedragen aan het vloeibare uitwisselings-medium (TERRAO, 2019; Sefarin, 2018). De emissie-eis van dit initiatief ligt scherp, vooral ingegeven door de problematiek rondom stikstofdepositie en nabijgelegen Natura2000-gebieden: de eis in de vergunning is 100 mg/Nm³ bij 6% O₂ (zie Tabel A.1 in bijlage A). De technische verwachting is dat aan emissiegrenswaarden van 35 resp 50 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂ voldaan kan worden, waardoor zeer lage NO_x-emissies in dit project gerealiseerd worden.

De casus Zaandam is, voor zover bekend, uniek in deze vermogenscategorie. Het lijkt technisch realistischer om een mogelijke aanscherping toe te spitsen op toepassing van SNCR. Uit de markt blijkt ook dat SNCR in de categorie 1 tot 5 MW_{th} vaker voorkomt dan SCR. Daarnaast blijkt dat de ammoniakslip bij SNCR wat hoger is dan bij SCR. In het algemeen kan dit wel beperkt worden tot minder dan 10 mg NH₃/Nm³ bij 6% O₂.

Kleine ketels 0,5-1 MW_{th}

Voor zover bekend, wordt bij biomassaketels kleiner dan 1 MW_{th} geen DeNO_x-technologie toegepast²⁹ (DBFZ, 2017). Zowel de NBKL als DBFZ bevestigen dit.

²⁸ Een alternatieve methode is de verbrandingslucht in meerdere trappen aan te voeren (air staging) eventueel in combinatie met rookgasrecycling.

²⁹ Hierbij zij opgemerkt dat bij vrachtwagens, die aan de Euro 6 eisen moeten voldoen en ook een vermogen hebben in deze range (400 kW ~ 1 MW_{th}), wel standaard SCR wordt toegepast. Bij

De NBKL benoemt de kosten voor DeNO_x bij deze vermogenscategorie als de belangrijkste oorzaak dat deze techniek nauwelijks wordt toegepast. Voor een aantal vaste componenten nemen de kosten namelijk niet evenredig af met afnemend vermogen, zoals de kosten voor injectoren, de regeling van de injectie en opslag van het reductiemiddel. Doordat bij SCR de katalysator kosten (theoretisch) wel dalen, neemt het kostenverschil tussen beide technieken bij lagere vermogens af.

Extrapolatie op basis van de investeringskosten voor SCR bij gasmotoren laat zien dat de kosten per kg NO_x reductie voor 0,5 MW_{th} circa 1,5 tot 2 keer hoger zijn dan bij 1 MW_{th} installaties en circa 4 en 5 keer hoger zijn dan bij 5 MW_{th}.

VITO concludeerde in 2011 dat bij vaste fossiele brandstof SCR en SNCR BBT zijn bij installaties vanaf 1 MW_{th} (zie pag 8 in VITO, 2011)³⁰. Dit betekent dat de categorie kleiner dan 1 MW_{th} minder eenvoudig is uit te rusten met een dergelijke nageschakelde techniek. Er zijn geen goede kostengegevens over SCR bij kleine biomassaketels beschikbaar gekomen.

3.4.2 Retrofit toepassing van DeNO_x-technologie

Toepassing van SCR en/of SNCR bij bestaande installaties is mogelijk. De toepassing van SNCR bij een bestaande installatie kan gehinderd worden doordat er een ongeschikte verbrandingsruimte aanwezig is. In die gevallen is het technisch mogelijk om bestaande installaties wel van een SCR te voorzien. Een SCR kan met een extra warmtewisselaar en bijverwarming (de SCR vraagt een temperatuur van 250°C of hoger) in het rookgaskanaal geplaatst worden. Toepassing van SNCR of SCR bij een bestaande installatie brengt de nodige kosten met zich mee, zeker als de benodigde ruimte voor plaatsing een beperkende factor is. Tenslotte kan ook de resterende levensduur van belang zijn voor de operator bij een investeringsbesluit in DeNO_x-technologie.

3.5 Kosten voor SNCR of SCR

Er vinden nog diverse onderzoeken en ontwikkelingen plaats, waardoor nageschakelde technieken verbeterd en goedkoper kunnen worden. Zo is er in de markt gesproken met initiatiefnemers die goedkopere DeNO_x-technologie toepassen, namelijk SCR gedragen op glaswol. De toepassing van deze glaswoltechnologie is vooralsnog beperkt tot gasgestookte installaties. Het is onzeker of deze technologie geschikt is voor toepassing bij biomassastook, vanwege mogelijke vervuiling. Dit zou in nader onderzoek verder uitgezocht kunnen worden. Ook de DBFZ rapporteert toepassing van SCR en fijnstofverwijdering in één techniek. Er is daarbij nadrukkelijk onderzoek gedaan naar installatie-ontwerpen van een commerciële partij. Hoewel aanvullend onderzoek wenselijk is, lijken de eerste resultaten veelbelovend (DBFZ, 2017).

Door Yara Miljö AB zijn kostengegevens voor SNCR beschikbaar gesteld voor een 5 MW_{th} biomassa-installatie. Op basis van deze gegevens is berekend dat de

vrachtwagens is de onbestreden NO_x-emissie wel hoger, ook zijn productie-aantallen aanzienlijk hoger. Bij een vrachtwagen kan de SCR in de uitlaat worden geplaatst (voldoende hoge temperatuur). Bij een (nieuwe) biomassa ketel moet de SCR ergens in het juiste temperatuur traject worden geplaatst, zeer nabij de ketel.

³⁰ Rond stoffilters wordt overigens een andere conclusie geconcludeerd omdat de aandacht op emissiereductie van stof lager was dan heden het geval.

kosteneffectiviteit voor SNCR varieert voor zo'n 12 tot 16 euro/kg vermeden NO_x, zie Tabel 14. Deze gegevens zijn ook gebruikt voor Tabel 2: 38 (kosten SNCR) + 5 (aansluitingskosten), maken tezamen 43 euro/kW_{th}.

Tabel 14 Kosteneffectiviteitsberekeningen toepassing SNCR op biomassaketels o.b.v. gegevens van Yara

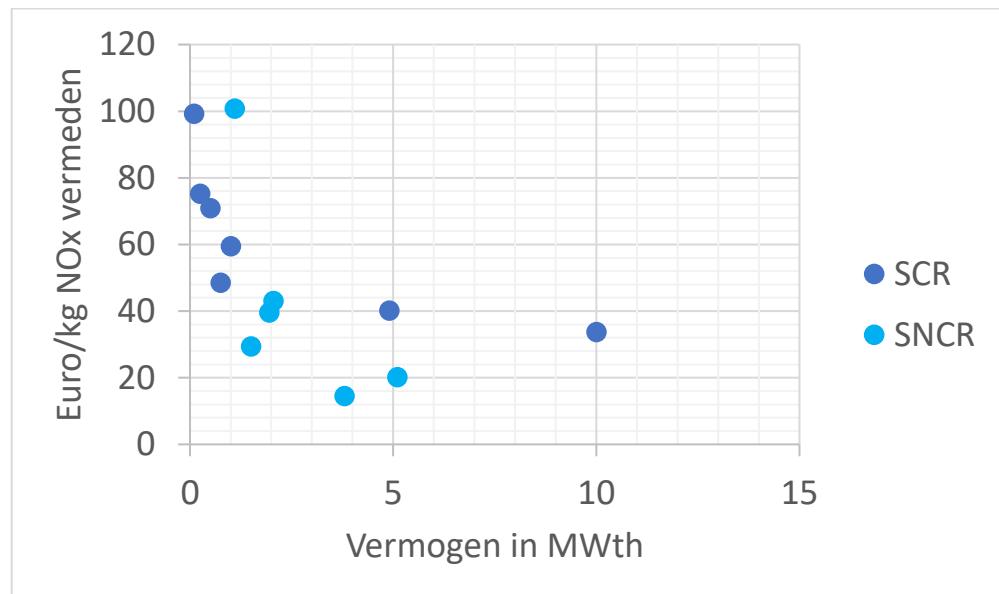
Vermogenscategorie	5 MW _{th}
Kosten SNCR (euro/kW _{th} , ingang)	38
Kosten aansluiting en installatie on-site (euro/kW _{th})	5
Prijs ureum in euro/ton (groothandelsprijs bij afname 50 ton: 150-200 euro/ton; hier is prijs bij kleinere afname verondersteld)	1000
Kosten ureum (euro/jaar)	1491
Electro-mechanische afschrijving over 10 jaar, 4% rente (euro/jaar)	26508
Electro-mechanische afschrijving over 10 jaar, 10% rente (euro/jaar)	34990
Aanname vollasturen/jaar	3000
Emissiereductie kg NO _x /jaar (van 250 naar 125 mg/Nm ³ ; 6% O ₂)	2284
Kosteneffectiviteit (euro/kg NO _x bij 10 jaar, 4% rente)	12
Kosteneffectiviteit (euro/kg NO _x bij 10 jaar, 10% rente)	16

In bijlage E zijn kosteneffectiviteitscijfers berekend op basis van een rapport voor de Europese unie uit 2012 (AMEC, 2012). Ter vergelijking: de goedkoopste manier om NO_x-emissie te reduceren, is de toepassing van verbrandingsmodificaties, zoals 'air staging', 'exhaust/flue gas recirculation', 'fuel staging' en 'low NO_x design': dit kost 2-3 euro/kg vermeden NO_x-emissie. In het algemeen zullen in Nederland verbrandingsmodificaties reeds worden toegepast, sinds de eisen in Bems (=Besluit Emissie-eisen Middelgrote Stookinstallaties) in 2010 van kracht zijn geworden (VROM, 2009). Uit de studie van Ricardo blijkt bijvoorbeeld dat voor niveaus rond de 200 mg/Nm³ er vrijwel altijd verbrandingsmodificaties toegepast worden bij middelgrote stookinstallaties (zie bijlage A; Ricardo, 2019). Het gerealiseerde emissieprofiel fluctueert echter wel relatief sterk.

Op basis van de hiervoor beschreven emissiemetingen (Ricardo, 2019; IRBEA, 2016; FNR, 2017) is een relatief lage (onbestreden) emissie van 190 mg/Nm³ bij 6% O₂ aangenomen als basis om de gegevens uit het AMEC rapport om te rekenen tot een kosteneffectiviteit. Op basis van de toepassing van SNCR bij ketels tussen de 1 en 50 MW_{th} resulteert dit in een kosteneffectiviteit van 1,5 tot 9 euro/kg vermeden NO_x-emissie. Voor SCR, een duurdere maar ook efficiëntere DeNO_x-technologie, liggen de kosten in de range van 1,5 tot 30 euro/kg NO_x-emissie vermeden³¹. De spreiding van gegevens in het AMEC rapport komt waarschijnlijk deels door de range in vermogen (1 tot 50 MW_{th}) en deels door spreiding in de kostencijfers in de gebruikte literatuur.

Ter vergelijking zijn ook kosteneffectiviteitsberekeningen gebaseerd op gegevens uit 2011 en eerder opgenomen in Figuur 3. Deze laten zien, zoals hiervoor al aangeven, dat SNCR over het algemeen goedkoper is dan SCR, wat deels gecompenseerd wordt door de grotere reductie. Ook is goed zichtbaar dat de kosten per vermeden kg NO_x dalen bij toenemend vermogen. Daarnaast laten deze kosten in vergelijking met Tabel 14 zien dat de kosten voor DeNO_x in de loop van de jaren gedaald zijn.

³¹ In een rapport van 2008 zijn de parkgemiddelde kosten voor SCR bij houtketels ingeschat op 23 tot 25 euro/kg NO_x-emissie vermeden (Kroon, 2008).



Figuur 3: NO_x-reductiekosten naar vermogen voor SCR en SNCR toepassingen. Eigen bewerking op basis van gegevens van (VITO, 2011), getoetst aan intern bekende kostengegevens uit dezelfde periode

De toepassing van SCR en SNCR bij grote stookinstallaties (>50 MW_{th}) is eveneens onderdeel geweest bij het afwegingskader voor BBT (=Best Beschikbare Techniek) bij grote stookinstallaties. Er wordt hier verwezen naar bijlage F, waar diverse observaties zijn beschreven. SNCR is bijvoorbeeld niet toepasbaar bij sterk wisselende belastingen. Voor middelgrote stookinstallaties kunnen sterk wisselende belastingen worden voorkomen door een warmtebuffer (buffervat) in de installatie op te nemen; dit komt een meer optimale verbranding ten goede. Daarnaast worden de technieken te duur geacht bij beperkte jaarlijkse bedrijfstijden, maar dat zijn situaties waarbij een biomassaketel zelf ook al duur zou zijn. Tenslotte wordt opgemerkt dat biomassa veel meer zouten en dergelijke bevatten dan kolen³². De levensduur van de SCR katalysator zal hierdoor lager uitvallen (Jensen-Holm, 2010; Olsen, 2015). Dit wordt verergerd als geen hout maar bladeren, stro, gras of andere gewassen gestookt gaan worden. Bij dergelijke brandstoffen kunnen in het algemeen aanzienlijke corrosieproblemen in de installatie ontstaan.

3.6 Mogelijke toekomstige emissie-eisen voor NO_x

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat op basis van de hiervoor beschreven observaties en meetresultaten voor middelgrote stookinstallaties dat 200 tot 225 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂ als emissie behaald kan worden op basis van verbrandingsmodificaties en de kwaliteit van de brandstof; dit betreft dus de NO_x-emissies zonder toepassing van DeNO_x.

Daarnaast wordt geconcludeerd dat vanaf 1 MW_{th} het mogelijk is om technisch betrouwbare en commercieel beschikbare, nageschakelde technologie als SNCR, eventueel in combinatie met SCR, toe te passen.

³² De deactivering komt vooral door het hoge kaliumgehalte in biomassa, wat resulteert in zeer kleine aerosolen die voornamelijk KCl en K₂SO₄ bevatten. De belangrijkste wijze van deactivering is neutralisatie van de zure plaatsen van de katalysator (Schill, 2018).

Bij installaties groter dan 5 MW_{th} is een diepe reductie met behulp van SNCR en SCR technisch toepasbaar; er zou dan een NO_x-reductie tot 80% gerealiseerd kunnen worden (in theorie ca 50 mg/Nm³). Doordat biomassa in diverse kwaliteiten wordt ingezet in deze vermogenscategorie, wordt een dergelijke diepe emissiereductie nog weleens gehinderd door degradatie van de katalysator. Voor algemene regels is een eis van 100 mg/Nm³ of bij meer ambitie, 80 mg/Nm³ bij 6% O₂ haalbaar. Mogelijk dat de inzet van biomassa met veel stikstof (bijvoorbeeld door aanwezigheid van veel blad en naald in de biomassa) gehinderd wordt bij een verdere aanscherping tot 80 mg/Nm³ bij 6% O₂: mogelijk degradeert de katalysator erg snel bij dergelijke biomassastromen. De ammoniakslip kan daarbij beperkt blijven tot 5 mg NH₃/Nm³ bij 6% O₂.

Onder aanname van circa 50% reductie door toepassing van SNCR, is een emissieniveau van 145 tot 100 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂ haalbaar. Dit kan toegepast worden in de vermogenscategorie 1-5 MW_{th}. Als de eis wordt aangescherpt tot 100 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂, zijn er mogelijk ketel- of brandstoftypen die onvoldoende reduceren op basis van SNCR alleen. Voor dergelijke situaties kan aan een scherpe emissie-eis worden voldaan door toepassing van SCR: deze techniek is beschikbaar voor deze vermogenscategorie. Bij toepassing van SNCR kan de ammoniakslip beperkt blijven tot 10 mg NH₃/Nm³ bij 6% O₂.

Voor biomassaketels kleiner dan 1 MW_{th} is het in het algemeen technisch minder eenvoudig om NO_x-reductie te realiseren met nageschakelde technologie. Voor deze categorie wordt hier een beperkte aanscherping voorgesteld. Bijlage A laat zien dat voor veel ketels <1 MW_{th} het niveau van 225 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂ met verbrandingsmodificaties en/of goede kwaliteit biomassa, ruim haalbaar is. Ook bijlage C laat zien dat bij een deel van de ketels op houtchips (20-400 kW) en de meeste op houtpellets dit niveau bereikt wordt, wat eveneens bewijst dat een dergelijke eis haalbaar is voor 0,5-1 MW_{th}. De mogelijke toepassing van DeNO_x-technologie in deze vermogenscategorie kan wel onderwerp zijn van nader onderzoek, omdat er weliswaar geen commercieel beschikbare voorbeelden zijn gevonden voor 0,5-1 MW_{th}, maar het technisch toch mogelijk geacht wordt.

Op basis van voorgaande constatering, zou het Ministerie de volgende aanscherpingen kunnen overwegen ten aanzien van de emissie-eisen voor NO_x:

- Aanscherping van de eis voor ketels groter dan 5 MW_{th} van 145 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂ naar 100 mg NO_x/Nm³ of bij meer ambitie, 80 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂. Een meer ambitieuze aanscherping zal technisch meer vergen van de toegepaste DeNO_x-technologie en zal veelal duurder zijn. Voor deze vermogenscategorie wordt in Nederland veelal SCR toegepast en het emissie-niveau van de voorgestelde eisen kan veelal worden gehaald met deze technologie.
- Aanscherping van de eis voor ketels tussen 1 en 5 MW_{th} van 275 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂ naar 145 mg NO_x/Nm³ of bij meer ambitie, 100 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂. Naar verwachting is een eis van 145 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂ haalbaar, ook met toepassing van alleen SNCR.³³

³³ Voorbeeld: 4,6 MW_{th} biomassaketelinstallatie in Horst, die in januari 2020 in gebruik wordt genomen en met SNCR aan 145 mg/Nm³ voldoet (HoSt, 2019b).

Een verdere aanscherping tot een emissie-eis van 100 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂ zal in het algemeen ook toepassing van SCR vergen (al dan niet in combinatie met SNCR). Een meer ambitieuze aanscherping zal technisch dus meer vergen van de toegepaste DeNO_x-technologie en zal veelal duurder zijn. In deze vermogenscategorie wordt thans incidenteel technologie als SCR of SNCR toegepast.

- Aanscherping van de eis voor ketels kleiner dan 1 MW_{th} van 300 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂ naar 225 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂. Dit niveau blijkt in de praktijk ook goed haalbaar voor diverse installaties, op basis van verbrandingsmodificaties en eventuele toepassing van schone biomassa (pellets of schone houtchips). Deze eis resulteert wellicht in een beperking van de toe te passen brandstoffen indien geen DeNO_x-technologie wordt toegepast, maar stikstofrijke biomassa kan beter verstoekt worden in andere (grotere) ketels waar wel DeNO_x-technologie wordt toegepast. Technisch is het waarschijnlijk mogelijk om ook bij deze kleinere vermogens DeNO_x-technologie toe te passen; er is op dit moment echter te weinig ervaring mee.

3.7 Mogelijk reductie-effect

Naar verwachting neemt de huidige NO_x-emissie uit vaste biomassaketels toe richting 2030. Hoewel er gasinzet wordt vermeden door biomassaketels, waardoor NO_x als gevolg van gasstook zal afnemen, neemt de verwachte NO_x-emissie effectief toch toe (Schoots & Hammingh, 2019; PBL et al, 2020).

Zoals beschreven in hoofdstuk 1 en Tabel 4 is het aantal ketels geïnterpreteerd, met name op basis van de subsidieregeling (SDE, 2020). De mogelijke NO_x-reductie ten gevolge van de voorgestelde aanscherping op het gerealiseerde ketelpark, is bij benadering uitgerekend (zie Tabel 15). Uitgangspunt hierbij zijn de emissieniveaus bij de huidige eisen en mogelijk toekomstige eisen (0,5 - 1 MW_{th}: 300 → 225 mg NO_x/Nm³; 1 - 5 MW_{th}: 275 → 145 mg NO_x /Nm³; 5 - 50 MW_{th}: 145 → 100 mg NO_x/Nm³, alles bij 6% O₂). Daarnaast is het aantal vollasturen aangenomen op 3000 vollasturen per jaar, dat is marginaal lager dan het parkgemiddelde (zie Tabel 4).

Tabel 15 Omvang NO_x-emissiereductiepotentieel op het bestaande, gesubsidieerde ketelpark van 0,5 - 50 MW_{th}

Vermogen (thermisch input)	Aantal ketels gerealiseerd onder SDE 2010-2019	Vermogen ketels gerealiseerd onder SDE 2010-2019	Jaarlijkse vollasturen	Ketels gerealiseerd onder SDE 2010-2018
0,5 - 1 MW	126 ketels	81 MW	3000	Reductie ca 22 ton NO _x /jaar
1 - 5 MW	27 ketels	59 MW	3000	Reductie ca 28 ton NO _x /jaar
5 - 50 MW	11 ketels	180 MW	3000	Reductie ca 30 ton NO _x /jaar

Als de voorgestelde eisen van toepassing worden op het bestaande park aan biomassaketels, dan daalt de emissie met circa 80 ton NO_x ten opzichte van het huidige emissie-niveau o.b.v. de emissie-eisen.

4 SO₂

4.1 Inleiding SO₂ uit biomassaverbranding

Biomassa bevat naast stikstof, ook andere mineralen, zoals zwavel. Zwavel wordt gerelateerd aan de vorming van fijnstof tijdens en na verbranding (Johansson et al, 2003). Een gedeelte van de zwavel in de brandstof komt uiteindelijk vrij als zwaveldioxide (SO₂) en zwaveltrioxide (SO₃) (Carroll et al, 2015; Oglesby & Blosser, 1980; Hartmann et al, 2000). Het percentage zwavel dat vrijkomt als SO₂ varieert sterk bij verbranding van biomassa, van <10% tot 60%; het resterende deel blijft grotendeels achter in de as (zowel vliegash als bodemas) (Oglesby & Blosser, 1980)³⁴. Zwaveldioxide draagt bij aan verzuring (zure regen) en heeft een negatief effect op de luchtkwaliteit (Hartmann et al, 2000; WHO, 2005).

4.2 Huidige SO₂-eisen

De huidige norm voor SO₂ bij verbranding van biomassa in middelgrote ketels is (Ab, 2020):

- 200 mg SO₂/Nm³ bij 6% O₂ voor vaste biomassa in ketels, ongeacht de vermogenscategorie (tussen 0,5-50 MW_{th}).

De huidige norm voor SO₂ voor verbranding van biomassa in grote stookinstallaties is (Ab, 2020), zie ook bijlage F:

- 60 mg SO₂/Nm³ bij 6% O₂ voor vaste biomassa in ketels (>50 MW_{th}) (artikel 5.4 van het Activiteitenbesluit)

Het Belgische kenniscentrum VITO beschrijft het volgende in 2010: *“Voor SO₂-emissies beschouwt men voornamelijk de keuze van de brandstof als belangrijkste maatregelen. Verdere reductiemaatregelen worden door geen enkele leverancier vermeld als toegepast of in het gamma”* (VITO, 2011). In Duitsland is eveneens een eis van 200 mg SO₂/Nm³ bij 6% O₂ van kracht, maar maakt hierop een uitzondering voor natuurlijk hout en houtafval (Bundesamt, 2019).

4.3 Zwavelgehalte biomassa en SO₂-emissies

Zwavelgehalte biomassa

Metingen aan de samenstelling van diverse soorten biomassa is publiek beschikbaar via de Phyllis2 database (beschikbaar via <https://phyllis.nl/>), inclusief zwavelgehalten. Het gemiddelde over de beschikbare analyses in de Phyllis2 database van diverse soorten onbehandeld hout (loof- en naaldhout, ook met naald en blad) resulteert in een zwavelgehalte van ca 0,06 wt% (droog, as-vrij; standaard deviatie 0,09; resultaat over 404 monsters) (Phyllis2, 2019). Op het totale aantal samples zijn er 16 monsters van hout die meer dan 0,25 wt-% zwavel bevatten; deze hoge zwavelgehalten kunnen niet eenvoudig verklaard worden (Phyllis2, 2019).

³⁴ Mede doordat zoveel zwavel in de as achterblijft zijn de emissies bij deze testen maar 1-13 mg/Nm³ bij 6% O₂

Het gemiddelde over de beschikbare analyses in de Phyllis2 database van diverse soorten grassen en planten is 0,17 wt-% (gemiddelde over 236 samples). Hiervan zijn 29 samples die (ruim) boven 0,25 wt-% uitkomen. Dit loopt in individuele gevallen op tot ca 2 wt-% zwavel (Phyllis2, 2019).

Het gemiddelde over de beschikbare analyses in de Phyllis2 database van diverse soorten stro is 0,16 wt-% (gemiddelde over 151 samples). Hiervan zijn 18 samples die (ruim) boven 0,25 wt-% uitkomen en ook hier kan het zwavelpercentage fors oplopen tot ca 1 wt-% zwavel (Phyllis2, 2019).

Een rapport uit 2006 stelt dat houtachtige biomassa een erg laag zwavelgehalte heeft in vergelijking met kolen, olie en turf. Het zwavelgehalte van stamhout is ongeveer 0,01 wt-%, dat van bast 0,02-0,1 wt-% en dennennaalden 0,04-0,2 wt-%, alle waarden betrokken op basis van droge massa (Huhtinen, 2006). Dit wordt bevestigd in de hiervoor beschreven analyse van de Phyllis2 database: houtachtige biomassa kent lage zwavelpercentages, maar niet-houtachtige (vaste) biomassa, zoals grassen, kan hogere zwavelpercentages bevatten.

Onder aanname van gemiddeld 0,1 wt-% zwavel in biomassa (droog, as-vrij)³⁵ en 10 wt-% verbrandingsconversie van zwavel in SO₂ (mogelijk percentage volgens Oglesby & Blosser, 1980), resulteert dit in 30 mg SO₂/Nm³ (bij 6% O₂; aannames voor omrekening: 4.747 m³ droog rookgas/kg en 19.65 MJ/kg voor droge biomassa).

Het resterende zwavel blijft gebonden in de as en verwijdering is afhankelijk van de mate van stofscheiding. Bij het stoken van hout en schors kan ongeveer 40% tot 90% van de zwavel achterblijven in de as; bij verbranding van stro en gehele planten is dit lager, namelijk 20% tot 55% (Hartmann, 2000, pag 10). Over de verbranding van houtschors is eerder gerapporteerd dat 0,7-9.6% van het zwavel als SO₂ vrijkomt (Oglesby & Blosser, 1980).

Voorgaande observaties maken duidelijk dat er geen directe relatie is tussen het zwavelgehalte van een biobrandstof en de SO₂-uitstoot. De uitstoot wordt allereerst bepaald door de hoeveelheid zwavel die achterblijft in de (vlieg)as, wat weer afhangt van de hoeveelheid en samenstelling van het asgehalte van de brandstof (Mack, 2018). Echter, door toepassing van een beperkte set biomassatypen kan voorkomen worden dat de emissie boven een bepaalde waarde uitkomt, zonder dat bij de installatie zelf metingen verricht hoeven te worden. Veel houtpellets worden onder bestaande certificatieschema's verhandeld. De certificatieschema's ENplus en DINplus omvatten in ieder geval eisen ten aanzien van het zwavelgehalte.

Middelgrote ketels 5-50 MW_{th}

Recent is door Ricardo Energy&Environment een grote inventarisatie uitgevoerd omtrent de emissieprofielen bij bestaande middelgrote stookinstallaties (1-50 MW_{th}) (Ricardo, 2019). Er is een uitsplitsing gemaakt in verschillende vermogensklassen met de volgende resultaten:

- 5-20 MW_{th}: er zijn 8 metingen aan SO₂-emissies in deze vermogensklasse beschikbaar gesteld. Deze varieerden van 0,8-22 mg SO₂/Nm³ bij 6% O₂. Het gemiddelde was 10 mg SO₂/Nm³ bij 6% O₂. Het 25 percentiel in deze vermogenscategorie ligt op 6 mg SO₂/Nm³ bij 6% O₂.

³⁵ Voor de UK overheid hanteert AEA een gemiddeld zwavelgehalte van minder dan 0,08% (AEA, 2001). Een 100 MWe installatie in Florida rapporteert voor een mix aan houtbrandstoffen een zwavelgehalte van 0,018% (ECT, 2009, pag 2-9).

- 20-50 MW_{th}: er zijn 12 metingen aan stofemissies in deze vermogensklasse beschikbaar gesteld. Deze varieerden van 1-205 mg SO₂/Nm³ bij 6% O₂. Het gemiddelde was 39 mg SO₂/Nm³ bij 6% O₂. Het 25 percentiel in deze vermogenscategorie ligt op 5 mg SO₂/Nm³ bij 6% O₂.

Er wordt toepassing van scrubbers gerapporteerd voor dit type installaties, zowel 1-stage als 2-stage scrubbers. Maar het merendeel van de installaties rapporteert geen ontzwavelingstechnologie. De installaties met hoge SO₂-emissies worden niet gestookt met houtachtige biomassa, maar met stro of een combinatie met andere brandstoffen zoals turf of stookolie, zonder toepassing van ontzwavelings-technologie.

Bij de biomassa-installatie van Attero (10 MW_{th}, gestookt op GFT-zeefoverloop) in Odiliapeel wordt injectie van bicarbonaat gecombineerd met een doekenfilter om actieve ontzwaveling toe te passen. Bij een bezoek aan deze installatie is mondeling aangegeven dat de restemissie 30 tot 40 mg SO₂/Nm³ bij 6% O₂ is. Er vindt ook kalkinjectie (en injectie van actieve kool) plaats in een 9 MW_{th} installatie in Goor; deze installatie wordt gestookt op resthout (Boersma et al, 2008).

Middelgrote ketels 1-5 MW_{th}

De studie van Ricardo Energy&Environment omvat ook een aantal emissiemetingen voor 1-5 MW_{th} biomassaketels (Ricardo, 2019). Er zijn 3 metingen aan SO₂-emissies in deze vermogensklasse beschikbaar gesteld. Deze varieerden van 1,5-15 mg SO₂/Nm³ bij 6% O₂. Het gemiddelde was 8 mg SO₂/Nm³ bij 6% O₂.

Andere beschikbare emissiefactoren houtstook

Het Europese EMEP hanteert voor biomassastook in centrales een emissiefactor van 10,8 g/GJ (range 6,45-15,1), omgerekend 32 mg SO₂/Nm³ bij 6% O₂ (Beauchemin & Tampier, 2008). Deze emissiefactor is afkomstig van de US EPA (EMEP, 2019, Table 3-7). Bij nader onderzoek in de achtergrondcijfers blijkt deze (0,025 lb/MBtu) voor "residual wood combustion" gebaseerd te zijn op 28 metingen met hoofdzakelijk natte biomassa (>20% vocht), waarvan 1 met een natte wasser en 5 zonder enig filter (USEPA, 2001)³⁶. Er worden geen stookwaarden vermeld bij de metingen en welke aanname is gemaakt, is onduidelijk. De emissiefactor is drie keer zo hoog als de EPA waarde uit 1999. Deze emissiefactor laat zich met de cijfers uit het EPA rapport³⁷ omrekenen naar een SO₂ concentratie van 31 mg SO₂/Nm³ bij 6% O₂ (range 18,5–43)³⁸.

In een rapport van Nyserda zijn emissiemetingen aan een drietal ketels gepubliceerd van 150 kW en 500 kW_{th}. Het zwavelgehalte van de gebruikte pellets lag op 0,007% en van de chips 0,02%. De SO₂-emissie was zeer laag: 1-5 mg/Nm³ bij 6% O₂ (Nyserda, 2012).

Metingen aan een 2 MW_{th} houtchips ketel in de USA resulteren in SO₂-emissies van 15 g/GJ (44 mg SO₂/Nm³ bij 6% O₂) voor houtchips inclusief bast en 5,6 g/GJ (16,5 mg SO₂/Nm³ bij 6% O₂) voor chips zonder bast (Rector, 2017). De chips bevatten ruim 40% vocht en het gehalte kalium is relatief hoog³⁹.

³⁶ <https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/index.html>

³⁷ De EPA gebruikt een iets anders luchtvolume per energie-inhoud.

³⁸ EMEP hanteert in 2017 nog een bandbreedte van 24-118 mg/Nm³ bij 6% O₂ (EMEP, 2017).

³⁹ Via de vorming van kaliumsulfaat wordt veel zwavel als vaste stof in de (vlieg)asresten vastgelegd. In theorie is 0,1 wt-% kalium genoeg om 0,082 wt-% zwavel vast te leggen. Ook calcium dat in het hout aanwezig is, of extra kan worden toegevoegd, kan zwavel binden. Ook chloor kan via deze reactie worden vastgelegd.

Voorname metingen laten zien dat de emissie van SO₂ uit middelgrote biomassaketels bij houtstook ver beneden de huidige norm van 200 mg/Nm³ ligt, zie bijvoorbeeld Figuur 6 in bijlage A. Dit komt overeen met het eerder beschreven lage zwavelpercentage in hout en het feit dat niet alle zwavel wordt omgezet in SO₂.

SO₂-emissie van niet-houtachtige biomassa

Het zwavelgehalte van grassen, planten en stro ligt relatief hoog. Dergelijke biomassasoorten, zoals stro, kunnen resulteren in hogere SO₂-emissies dan hiervoor genoemd (Hering, 2015). Een ketel in Denemarken (1,75 MW_{th}), gestookt op stro en met een nageschakelde cycloon en doekenfilter, emitteert 245 mg SO₂/Nm³ bij 6% O₂ (en gemiddeld 400 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂). Voor een andere ketel van 334 kW_{th}, gestookt op stropelleten, wordt een SO₂-emissie van circa 250 mg SO₂/Nm³ bij 6% O₂ waargenomen (en 340 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂) (Hering, 2015).

In de studie van Ricardo is een meting opgenomen voor een ketel gestookt op stro (met 0.15 wt-% zwavel); de emissie bleek 125 mg SO₂/Nm³ bij 6% O₂.

4.4 Mogelijke toekomstige emissie-eisen voor SO₂

Er is geconstateerd dat de huidige norm van 200 mg/Nm³ ver boven de emissie van reguliere houtverbranding ligt⁴⁰. De definitie van biomassa in het Activiteitenbesluit is opgenomen in onderdeel bijlage B. Deze definitie is vrij ruim en stro, grassen en planten vallen daar ook onder. Een aanscherping van de SO₂-eis lijkt dan zinvol om te voorkomen dat dergelijke typen biomassa verstoekt gaan worden zonder nageschakelde technieken.

Op basis van voorgaande constatering, zou het Ministerie de volgende aanscherping kunnen overwegen:

- Aanscherping van de eis naar 60 mg SO₂/Nm³ bij 6% O₂ voor alle vermogenscategorieën

De huidige norm voor grote biomassaketels, namelijk 60 mg SO₂/Nm³ bij 6% O₂, is ruimschoots haalbaar voor kleine en middelgrote biomassaketels die worden gestookt op houtachtige biomassa. De emissie-eis voor kleine en middelgrote biomassaketels kan daaraan gelijk getrokken worden.

Deze eis is met de meeste typen houtachtige biomassa haalbaar⁴¹. Uit bijlage A blijkt dat vele installaties tussen de 1 en 50 MW_{th} hier al aan voldoen, zonder dat een vorm van nageschakelde technologie wordt vermeld. Dit is ook in lijn met bijvoorbeeld de gemiddelde emissiefactor van 31 mg/Nm³ van EMEP en USEPA.

⁴⁰ De ruime emissie-eis is vermoedelijk bedoeld om extremen te voorkomen, door geen soepeler eis te geven dan voor andere, gebruikelijke brandstoffen. Het besluit zwavelgehalte brandstoffen ging voor gasolie (huisbrandolie) per 1-1-2008 naar 0,1%, ofwel 163 mg/Nm³ bij 3% O₂.

⁴¹ Brandstoffen die hier niet aan voldoen, kunnen ingezet worden bij (grotere) installaties met een betere rookgasreiniging. Ook is het mogelijk om via kalkinjectie de SO₂ emissie te beperken (20-30%).

In bijlage C wordt duidelijk dat houtpellets wel voldoen, maar dat dit niet geldt voor andere biomassastromen waarvan pellets geperst kunnen worden, zoals stro of gras.

Voor handhaving zou eventueel volstaan kunnen worden door houtpellets en niet-verontreinigde houtsnippers (d.w.z. houtachtige biomassa, waarbij geen blad, naald, veegvuil en dergelijke tussen de houtsnippers aanwezig is) te beoordelen op de brandstofkwaliteit, omdat deze brandstoffen vrijwel per definitie voldoen aan de voorgestelde emissie-eisen. Brandstofpellets worden veelvuldig onder een certificeringssysteem verkocht (met name ENplus en DINplus certificatieschema's); mogelijk kan hier gebruik van worden gemaakt voor handhaving, zodat metingen aan het rookgas niet in alle gevallen noodzakelijk zijn.

4.5 Kosten voor zwavelafvangst

In bijlage E zijn kosteneffectiviteitscijfers berekend op basis van een rapport voor de Europese Unie uit 2012 (AMEC, 2012). Voor SO₂-verwijdering via droge rookgasontzwaveling is de kostenrange ca 3 tot 8 euro per kg vermeden SO₂-emissie. Rookgasontzwaveling kan worden uitgevoerd met een aparte installatie in het rookgaskanaal, maar is ook mogelijk via injectie van kalk in combinatie met een doekenfilter.

Omvang en effect

Ruim 2/3 van de biomassastook in Nederland in de vermogenscategorie kleiner dan 50 MW_{th} is houtachtige biomassa, op grond van de rapportages hernieuwbare energie: 7,6 PJ is hout of houtachtige biomassa op een totaal 11,5 PJ biomassa (CBS, 2019). De overige biomassa, te weten 3,9 PJ, is overige vaste of vloeibare biomassa (CBS, 2019). Het is niet duidelijk wat de exacte samenstelling hiervan is, er wordt melding gemaakt van papierslib en slachtafval. Het is onduidelijk of de categorie 'overige vaste of vloeibare biomassa' hoge zwavelgehalten heeft en of daarbij eventueel nageschakelde reinigingstechnologie wordt toegepast. De SO₂-emissiereductie is daarmee erg onzeker en niet te bepalen.

5 Referenties

Ab (2020): *Activiteitenbesluit Milieubeheer, § 3.2.1 (m.n. artikelen 3.10 en 3.10b) en § 5.1.5 (m.n. artikel 5.44a)*. Geldend van 1 oktober 2019 t/m heden.

<https://wetten.overheid.nl/BWBR0022762/2019-10-01>

AEA (2001): *Determination of Atmospheric Pollutant Emission Factors at a Small Industrial Wood-Burning Furnace*. AEAT/R/ENV/0518 Issue 1, AEA Technology Environment, Abingdon, UK, March 2001.

[https://uk-](https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/empire/AEAT0518issue1_v2.pdf)

[air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/empire/AEAT0518issue1_v2.pdf](https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/empire/AEAT0518issue1_v2.pdf)

AEA (2010): *The assessment of flue gas particulate abatement in wood burning boilers*. AEA reference ED56285- Issue Number 3, 3 December 2010. Authors: S. Hamilton, S. Fleming, R. Stewart.

AMEC (2012): *Collection and analysis of data to support the Commission in reporting in line with Article 73(2)(a) of Directive 2010/75/EU on industrial emissions from the combustion of fuels in installations with a total rated thermal input below 50 MW*. AMEC Environment & Infrastructure UK, London, September 2012.

Beauchemin, P, M. Tampier (2008): *Emissions from Wood-Fired Combustion Equipment*. Report by Envirochem Services for the Ministry of Environment, British Columbia.

Boersma, A.R., P. Lako, R. van der Linden, J. van Doorn, B. Jansen, H.G.J. Kok, D.C. Heslinga (2009): *Air pollutant emissions from stationary installations using bioenergy in the Netherlands BOLK Phase 2*. ECN-E--09-067, ECN, Petten, November 2009.

Bor (2019): *Besluit omgevingsrecht*. Met name Bijlage 1 onderdeel C categorie 1.4 met definitie standaard brandstoffen. Geldend van 01-07-2019 t/m heden.

<https://wetten.overheid.nl/BWBR0027464/2019-07-01>

Buijsman, E., et.al. (2005): *Fijnstof nader bekeken; De stand van zaken in het dossier fijnstof*. Rapport 500037008, Milieu- en Natuurplanbureau, Bilthoven 2005. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/500037008.pdf>

Bundesamt (2019): *Vierundvierzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über mittelgroße Feuerungs- Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen - 44. BImSchV)*. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Bonn, 13 juni 2019.

[https://www.gesetze-im-](https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_44/index.html#BJNR080410019BJNE000300000)

[internet.de/bimschv_44/index.html#BJNR080410019BJNE000300000](https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_44/index.html#BJNR080410019BJNE000300000)

Carroll, J.P., J.M. Finnan, F. Biedermann, T. Brunner, I. Obernberger (2015): *Air staging to reduce emissions from energy crop combustion in small scale applications*. Fuel, 155, 37-43, 2015. BIOENERGIE 2020+.

CBS (2019): *Hernieuwbare energie in Nederland 2018*. Centraal Bureau voor de Statistiek, september 2019.

DBFZ (2012): *Production and combustion of mixed biomass pellets at Pusch AG within the "agrarSTICK®" concept*. Online brochure, laatst bezocht april 2020.

DBFZ (2015): *Staubabscheider in häuslichen Feuerungen*. ISBN: 978-3-9817707-4-2, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum, Leipzig, 1 August 2017.

DBFZ (2017): *Demonstration von Verfahren zur kombinierten Reduktion von Stickoxiden und Feinstaub an Biomassefeuerungen „SCR-Filter“*. Authors: König, M., Matthes, M., Hartmann, I., Döhling, D., Pomraenke, A., Zettl, R. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum, Projectnummer 3130026, Leipzig, 27 August 2015.

EC (2008): *Richtlijn betreffende luchtkwaliteit en schonere lucht voor Europa*. 20 mei 2008, Richtlijn 2008/50/EG.

ECT (2009) *Gainesville Renewable Energy Center. Prevention of Significant Deterioration/Air Construction Permit Application*. Environmental Consulting & Technology, Inc., Gainesville, Florida, November 2009.

EGTEI (2010): *Options for limit values for emissions of dust from small combustion installations < 50 MWth*. UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, Subgroup on Small Combustion Installations under EGTEI, June 2010.

EMEP (2017): *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016* – Last update July 2017.

EMEP (2019): *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook Emission guidebook 2019, NFR 1.2.1 Energy industries, SNAP 01 Combustion in energy and transformation studies*. European Environment Agency, Copenhagen, Denemarken, 2019.

<https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-1-energy-industries/view>

Eneco (2020): *Emissie-eisen BWI Lage Weide*. Website, laatst bezocht februari 2020.

<https://www.eneco.nl/over-ons/wat-we-doen/in-de-praktijk/bwi-lage-weide/emissie-eisen-en-meetverplichtingen/> of <https://www.eneco.nl/over-ons/wat-we-doen/in-de-praktijk/bwi-lage-weide/projectinformatie-biowarmte-installatie-lage-weide/>

EPA (2019): *AP-42 Compilation of Air Emission Factors, Chapter 1 External Combustion Sources*, Website, laatst bezocht september 2019.
<https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/index.html>

EU (2010): *Richtlijn 2010/75/EU van het Europese Parlement en de Raad van 24 november 2010 inzake industriële emissies (geïntegreerde preventie en bestrijding van verontreiniging)*. Publicatieblad van de Europese Unie, L334, 17 december 2010.

EU (2015a): *Verordening (EU) 2015/1189 van de commissie van 28 april 2015 tot uitvoering van Richtlijn 2009/125/EG van het Europees Parlement en de Raad wat de eisen inzake ecologisch ontwerp voor verwarmingsketels voor vaste brandstoffen betreft*. Publicatieblad van de Europese Unie, L193, 21 juli 2015.

https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2015.193.01.0100.01.ENG

EU (2015b): *Richtlijn (EU) 2015/2193 van het Europees Parlement en de Raad van 25 november 2015 inzake de beperking van de emissies van bepaalde verontreinigende stoffen in de lucht door middelgrote stookinstallaties*. Publicatieblad van de Europese Unie, L 313, 28 november 2015.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L2193&from=EN>

EU (2015c): *Verordening (EU) 2015/1185 van de commissie van 24 april 2015 tot uitvoering van Richtlijn 2009/125/EG van het Europees Parlement en de Raad wat eisen inzake ecologisch ontwerp betreft voor toestellen voor lokale ruimteverwarming die vaste brandstoffen gebruiken*. Publicatieblad van de Europese Unie, L193, 21 juli 2015.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015R1185&from=EN>

FNR (2013): *Pelletheizungen Marktübersicht Bestell-Nr. 269 7., überarbeitete Auflage*, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow-Prüzen, Duitsland, januari 2013

FNR (2017): *Hackschnitzelheizungen Marktübersicht*. Bestell-Nr. 293 5., aktualisierte Auflage, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow-Prüzen, Duitsland, 2017.

http://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Hackschnitzel-Heizungen_web_neu.pdf
https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/mu_pellet_web.pdf

Froeling (2018): *Lambdamat 750 - 1.500 kW*. Brochure, Fröling, Grieskirchen, Oostenrijk, juni 2018.

https://www.froeling.com/fileadmin/content/produkte/Prospekte_Flyer/EN/EN_Prospekt_Lambdamat.pdf

Hartmann, H., T. Böhm, L. Maier (2000): *Naturbelassene biogene Festbrennstoffe umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten*. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU), München, Duitsland, September 2000.

https://www.lfu.bayern.de/energie/biogene_festbrennstoffe/doc/festbrennstoffe.pdf

HDG (2019): *Projektkatalog gültig ab 1. April 2019*. HDG Bavaria GmbH, Heizsysteme für Holz, Massing, Duitsland, maart 2019.

http://e-sol-diffusion.com/download/hdg_projektkatalog_2019.pdf

Hering, Th (2015a): *Heizwärme aus stroh für die Thüringer Landesanstalt für Landwirts. Thüringer*. Mitteldeutscher Bioenergietag 2015, Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena, 11 mei 2015.

http://www.tll.de/www/daten/veranstaltungen/materialien/bioenergietag/08_Hering_1_051115.pdf

Hering, Th (2015b): *Stroh als Brennstoff: Einfluss der Strohqualität auf den Anlagenbetrieb und Grundlagen eines Brennstoff- Qualitätsmanagements*. Mitteldeutscher Bioenergietag 2015, Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena, 11 mei 2015.

http://www.tll.de/www/daten/veranstaltungen/materialien/bioenergietag/09_Hering_2_051115.pdf

HERZ (2019): *HERZ Filtertechnik*. Brochure., HERZ Energietechnik GmbH, Pinkafeld, Oostenrijk, februari 2019.

https://www.herz-energie.at/tl_files/members/Werbung%20=%20Advertising/Prospekte%20=%20Brochures/German%20=%20Deutsch/Filtertechnik_Deutsch_%28d02-2018%29_V1.0.pdf

HoSt (2019a): *Eindhoven (Meerhoven), Nederland*. Website bericht van HoSt, laatst bezocht juni 2020.

<https://www.host.nl/nl/case/meerhoven/>

HoSt (2019b): *Kassen in Horst (NL) duurzaam verwarmd met snoeihout uit Horst en omgeving*. Website bericht, laatst bezocht juni 2020.

<https://www.host.nl/nl/case/horst-nederland/>

HoSt (2019c): *Lelystad, Nederland*. Nieuwsbericht over 15 MW houtgestookte installatie met doekenfilter en SNCR, laatst bezocht juni 2020.

<https://www.host.nl/nl/case/lelystad-bioenergiecentrale/>

HoSt (2020a): *Andijk (NL): collectieve hernieuwbare warmteafname door zes kassen*. Website bericht, laatst bezocht juni 2020.

<https://www.host.nl/nl/case/andijk/>

HoSt (2020b): *HoSt levert hernieuwbare warmte aan glastuinbouwbedrijven Het Grootslag in Andijk*. Andijker Nieuws, 25 april 2019.

<https://andijkernieuws.net/2019/04/25/host-levert-hernieuwbare-warmte-aan-glastuinbouwbedrijven-het-grootslag-in-andijk/>

HoSt (2020c): *Unieke biomassacentrale in Andijk: 90% lagere NO_x-emissie dan aardgasketels en gasmotoren*. Andijker Nieuws, 16 juni 2020.

<https://andijkernieuws.net/2020/06/16/unieke-biomassacentrale-in-andijk-90-lagere-nox-emissie-dan-aardgasketels-en-gasmotoren/>

Houshfar, E., T. Løvås, Ø. Skreiberg (2012a): *Experimental investigation on NO_x reduction by primary measures in biomass combustion: straw, peat, sewage sludge, forest residues and wood pellets*. *Energies* (2012), 5, 270-290, doi:10.3390/en5020270.

Houshfar, E., Ø. Skreiberg, D. Todorović, L. Sørum (2012b): *NO_x emission reduction by staged combustion in grate combustion of biomass fuels and fuel mixtures*. *Fuel* 98, 29-40, August 2012, DOI: 10.1016/j.fuel.2012.03.044.

Huhtinen M, (2006): *Wood Energy and Environment*. Materials for 5EURES Training Sessions; NCP, Finland, 2009, 19 januari 2006.
http://agricultura.gencat.cat/web/.content/06-medi-natural/gestio-forestal/enllacos-documents/biomassa-forestal/fixers-binaris/2_ncp.pdf

IFK (2017): *Methodische Bewertung von Sekundärmaßnahmen für kleine Biomassefeuerungen*. Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK), Universität Stuttgart, Stuttgart, Mai 2017.
http://fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/125865/U40-U84-N05-IFK-Bericht_mit_Anhaengen_07032018.pdf?command=downloadContent&filename=U40-U84-N05-IFK-Bericht_mit_Anhaengen_07032018.pdf

Infomil (2019): *Hulpmiddel regelgeving en emissie-eisen*. Internetpagina met link naar Excel bestand. Laatst geraadpleegd 23 december 2019.
<https://www.infomil.nl/onderwerpen/lucht-water/stookinstallaties/hulpmiddel/>
https://www.infomil.nl/publish/pages/93252/abees_v6d.xls

Ionitec (2019): *Filter*. Website bericht, laatst bezocht september 2019.
<http://ionitec.co.at/en>

IRBEA (2016): *Project report for biomass combustion emissions study*. Irish Bioenergy Association. October 2016.

Jensen-Holm, H., F. Castellino, T. N. White (2010): *SCR DeNOX catalyst considerations when using biomass in power generation*. Haldor Topsøe, Power Plant Air Pollutant Control "MEGA" Symposium, Washington DC, USA, 2010.
https://www.topsoe.com/sites/default/files/scr_deNOX_catalyst_considerations_when_using_biomass_in_power_generation_2012.ashx_0.pdf

Johanssona, L.S., C. Tullina, B. Lecknerb., P. Sjöwalla (2003): *Particle emissions from biomass combustion in small combustors*. Biomass and Bioenergy, 25, pag. 435 – 446, 2003.
<http://www.zf.uni-lj.si/data/datoteke/acam21/damjank/Seminarji/14.pdf>

Josephinum Institut (2014): *Prüfbericht, Holzhackgut*. 110 meetrapporten van 1996 tot en met 2014. *Prüfbericht, Pelletsfeuerungen*. 150 meetrapporten van 2006 tot en met 2014. BLT, Wieselburg, Oostenrijk.

Kroon, P., W. Wetzels (2008): *Onderbouwing actualisatie BEES B; Kosten en effecten van de voorgenomen wijziging van het besluit emissie-eisen stookinstallaties B*. ECN-E—08-020, ECN, Petten, April 2008.

Kroon, P., A.J. Plomp (2013): *Evaluatie Besluit emissie-eisen middelgrote stookinstallaties*. ECN-E--13-025, ECN, Petten, Juni 2013.

KWIN (2016-2017): *KWantitatieve INformatie voor de Glastuinbouw*. Bleiswijk, Wageningen UR Glastuinbouw, 2016-2017, (Rapport GTB 5121).

Larrivee, J. T. Hopek (2018): *Stappenplan houtstookinstallaties. Door en voor tuinders*. Website de kas als energiebron, januari 2018.

https://www.kasalsenergiebron.nl/content/docs/Bio-energie/Stappenplan_houtstook.pdf

Loo, S. van, J. Koppejan (2008): *The Handbook of Biomass Combustion and C-firing*. ISBN: 978-1-84407-249-1.

Maas, R., Fischer, P., Wesseling, J., Houthuijs, D., Cassee, F.R. (2015) *Luchtkwaliteit en gezondheidswinst*. RIVM, 21 april 2015.

Mack, R., H. Hartmann (2016): *Performance of Catalytic and Non-Catalytic Foam Ceramic Elements in Log Wood Stoves*. 24th European Biomass Conference and Exhibition, Amsterdam, 6-9 juni 2016.

Mack, R., D. Kuptz, C. Schön, H. Hartman (2018): *Combustion behaviour and slagging tendencies of kaolin additivated agricultural pellets and of wood straw pellet blends in a small scale reactor*. 26th European Biomass Conference, Copenhagen, Denmark, 14-17 mei 2018.

MOB (2019): *Biomassacentrale van Bio Forte BV aan de Pascalstraat te Zaandam*. Zienswijze 26 maart 2019. Referentie: ZaandamVerzoekActBMCVergunning. Mobilisation for the Environment.

Morgenstern, P.P., Groot, G.M. (2010): *Bio-energiecentrales; Inventariserend onderzoek naar milieuaspecten bij diverse energieopwekkingstechnieken met behulp van biomassa*. Rapport 609021104/2010, RIVM, Bilthoven, 2010.

Nescaum (2008): *Controlling emissions from wood boilers, Draft*. Northeast States for Coordinated Air Use Management (NESCAUM), Boston, 10 September 2008. http://www.nescaum.org/documents/controlling_emissions_from_wood_boilers.pdf/download

Nussbaumer, T (2003): *Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction*. Energy & Fuels, 2003, 17, 1510-1521.

Nussbaumer, T (2006): *Stand der Technik und Kosten der Feinstaubabscheidung für automatische Holzfeuerungen von 100 kW bis 2 MW*, Verenum, Zürich, 24 August 2006, ISBN 3-908705-13-4.

Nussbaumer, T. (2010): *Overview on Technologies for Biomass Combustion and Emission Levels of Particulate Matter prepared for Swiss Federal Office for the Environment (FOEN)*. Ingenieurbüro für Verfahrens-, Energie- und Umwelttechnik (Verenum), Zürich, June 2010.

Nussbaumer, T. (2017): *Aerosols from Biomass Combustion*. Technical report on behalf of the IEA Bioenergy Task 32. IEA Bioenergy, 2017. ISBN 3-908705-33-9.

Nyserda (2012): *Evaluation of the Performance and Emission from Commercial Scale. Advanced Wood Combustion Systems*. No. 13-01, New York State Energy Research and Development Authority, Final Report, August 2010, Revised June 2012.

ODBN (2016): *Besluit vergunning ingevolge de Natuurbeschermingswet*. 7 juni 2016, Omgevingsdienst Brabant Noord, Registratienummer 31706/PRO, kenmerk Z/004548.

ODNZKG (2019): *Milieuaspecten Activiteitenbesluit milieubeheer voor de biomassaïnstallatie aan de Pascalstraat te Zaandam*. Memo februari 2019, Omgevingsdienst Noordzeekanaalgebied.

Oglesby H.S., R. O. Blosser (1980): *Information on the Sulfur Content of Bark and its Contribution to SO₂ Emissions when Burned as a Fuel*. Journal of the Air Pollution Control Association, 30:7, 769-772, DOI: 10.1080/00022470.1980.10465107.

Olsen, B. K. (2015). *Deactivation of SCR catalysts in biomass fired power plants*. Technical University of Denmark, 2015.

PBL et al (2020): *Emissieramingen luchtverontreinigende stoffen. Rapportage bij de Klimaat- en Energieverkenning 2019*. PBL, Den Haag, 2020. Publicatienummer 4067.

Phyllis2 (2019): *ECN Phyllis Database*. Online beschikbaar via <https://phyllis.nl/>, Laatst bezocht september 2019.

Plomp, A.J., Kroon, P. (2013): *De mogelijke aanscherping van vijf eisen in het Besluit emissie-eisen middelgrote stookinstallaties*. ECN-E-13--029. Energieonderzoek Centrum Nederland, mei 2013.

Rector, L., P. J. Miller, S. Snook, M. Ahmadi (2017): *Comparative emissions characterization of a small-scale wood chip-fired boiler and an oil-fired boiler in a school setting*. Biomass and Bioenergy 107 (2017) 254–260.

Reichert, G., C. Schmidl, W. Haslinger, H. Stressler, R. Sturmlechner, M. Schwabl, M. Wöhler, C. Hochenauer (2018): *Catalytic Efficiency of Oxidizing Honeycomb Catalysts Integrated in Firewood Stoves Evaluated by a Novel Measuring Methodology under Real-Life Operating Conditions*. Renewable Energy 117 (March).

Ricardo (2019): *Final Technology Report MCP Information exchange*. ENV.C.4/FRA/2015/0042, Ricardo Energy&Environment, Umweltbundensamt Austria en VITO, 26 Sept 2019.
<https://ec.europa.eu/environment/industry/stationary/mcp.htm>

RoyalHaskoningDHV (2020): *Warmte uit aardgas of uit biomassa? Klimaatimpact over de keten en effecten op luchtkwaliteit vergeleken voor warmtelevering aan industrie en bebouwde omgeving*. In opdracht van Nederlandse Vereniging voor Duurzame Energie. Referentie: BH1516I&BRP001F01. 26 februari 2020.

Schill, L., R. Fehrmann (2018): *Strategies of Coping with Deactivation of NH₃-SCR Catalysts Due to Biomass Firing*. Catalysts 2018, 8, 135; doi:10.3390/catal8040135.

Schoots, K. & P. Hammingh (2019): *Klimaat- en Energieverkenning 2019*. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

Schröder (2017a): *AL-TOP Der Partikelfilter für automatisch beschickte Biomasse-Feuerungsanlagen*. Brochure, Maart 2017.
https://www.schraeder.com/images/PDF/Broschuere_Partikelabscheider_AL-TOP.pdf

Schröder (2017b): *Elektrostatische Feinstaub- abscheider für Holzfeuerungen*. Brochure, Schröder, Kamen, Duitsland, maart 2017.
https://www.schraeder.com/images/PDF/Uebersicht_Filtersysteme_2017.pdf

Schröder (2017c): *Partikelabscheider, preisliste 2017*. Brochure, Schröder, Kamen, Duitsland, maart 2017.

Schröder (2020): *Schröder Abgastechnologie*. Website bericht, laatst bezocht mei 2020.
<https://www.schraeder.com/>

SDE (2020): *Projecten in beheer SDE(+), peildatum april 2020*. RVO, Feiten en Cijfers SDE(+), beschikbaar via www.rvo.nl.

Serafin, A. (2018): *Heating buildings with factory fumes*. Internet nieuwsbericht, thehindubusinessline.com, 3 december 2018.
<https://www.thehindubusinessline.com/scaling-up/heating-buildings-with-factory-fumes/article25598015.ece#>

Struschka M., Kilgus D., Springmann M., Baumbach G. (2008): *Effiziente Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Luftreinhaltung*, Forschungsbericht 205 42 322, Un. Stuttgart, 2008, ISSN 1862-4804.

Tama Aernova (2019): *Air filtration systems*. Laatst bezocht september 2019.
<https://www.tamaaernova.com/>

TERRAO (2019): *The terrao exchanger*. Website Terrao, Wavrin, Frankrijk, laatst geraadpleegd 1 januari 2020.
<http://www.terrao-exchanger.com/en/>

Turner J.A., P A. Lawless, T. Yamamoto, D. W. Coy, G.P. Greiner, J. D. McKenna, W. M. Vataavuk (1988): *Sizing and Costing of Electrostatic Precipitators*. JAPCA, 38:5, 715-726).
<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/08940630.1988.10466413>

Tytgat, T., G. Walpot, J. Cools, S. Lenaerts (2017): *Literature review of emissions of modern wood combustion devices and emissions reducing technologies, under real-life conditions FINAL REPORT*. University of Antwerp voor het Vlaamse milieumaatschappij, 2017.

Umweltbundesamt (2010): *Biomassefeurlingsanlagen im Leistungsbereich von 400 kW bis 10 MW*. Report rep 0282, Umweltbundesamt, Wien, Oostenrijk, 2010.
<https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0282.pdf>

USEPA (2001): *Background documents report on revisions to 5th edition AP-42 Section 1.6 Wood Residue Combustion In Boilers*. U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina, USA, juli 2011.
<https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/bgdocs/b01s06.pdf>USEPA

VITO (2011): *Beste Beschikbare Technieken (BBT) voor nieuwe, kleine en middelgrote stookinstallaties, stationaire motoren en gasturbines gestookt met fossiele brandstoffen*. Auteurs: Dils, E., D. Huybrechts. ISBN: 9789081690287, BBT-kenniscentrum VITO, MOL, België, september 2011.

VROM, (2009): *Besluit van 7 december 2009, houdende nieuwe regels voor de emissie van middelgrote stookinstallaties (Besluit emissie-eisen middelgrote stookinstallaties milieubeheer)*. Staatsblad 547, 21 december 2009.

WHO (2005): *Air quality guidelines, Particulate matter, ozone, nitrogen oxide and sulfur dioxide, global update 2005*. World Health Organization 2006, ISBN 92 890 2192 6.

WHO (2013): *Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE project. Recommendations for concentration-response functions for cost-benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide*. World Health Organization 2013.

Woltersdorf, N., A. Kather (2012): *Feldmessungen zum Emissionsverhalten von Biomassekleinfeuerungsanlagen*. Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“ 09, Konferenzband Energetische Biomassenutzung Neue Technologien und Konzepte für die Bioenergie der Zukunft Energetische Biomassenutzung, 05 - 06 November 2012.

Woltersdorf, N., A. Kather (2013): *Feinstaubemissionen aus biomassebefeuelten Kleinfeuerungsanlagen*. Schlussbericht, Institut für Energietechnik (IET), Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH), Hamburg, Duitsland, 30 september 2013.
<https://docplayer.org/storage/54/33160826/1578133451/OEhKD1e08PGtYAuXP7Bkag/33160826.pdf>

Woonstede Nesland (2013): *Melding activiteitenbesluit*. Betreft twee ketels van 150 en 300 kW voorzien van een ESP. Brief van gemeente Texel aan Woonstede Nesland in Den brug, 18 juni 2013.

6 Ondertekening

Petten, 9 juli 2020

TNO



Jorien Strijk
Pieter Kroon



Arjan Plomp

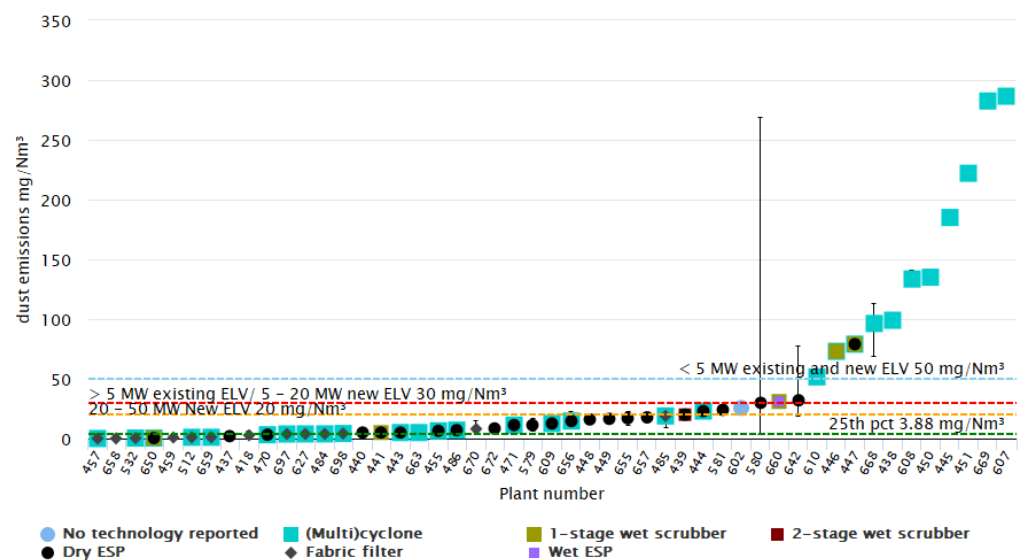
Auteurs



A Emissies van middelgrote stookinstallaties

In het kader van nieuwe wetgeving voor middelgrote stookinstallaties⁴² is door Ricardo onderzoek gedaan aan de huidige emissie en de huidige en toekomstige (emerging technologies) reductiemethoden bij middelgrote stookinstallaties. Van 53 ketels op vaste biomassa zijn emissiegegevens verkregen. De gegevens hadden 47 keer betrekking op stof, 51 keer op NO_x en 25 keer op SO₂. Ook waren er gegevens over de CO uitstoot (45 keer) en de energie-efficiency van installaties. Het beeld dat naar voren komt lijkt veel op dat van grote stookinstallaties (>50 MW_{th}) in bijlage F. In deze bijlage van installaties tussen de 1 en 50 MW_{th} zijn echter ook emissiereducerende technieken opgenomen.

Stofemissie bij ketels van 1-50 MW_{th}



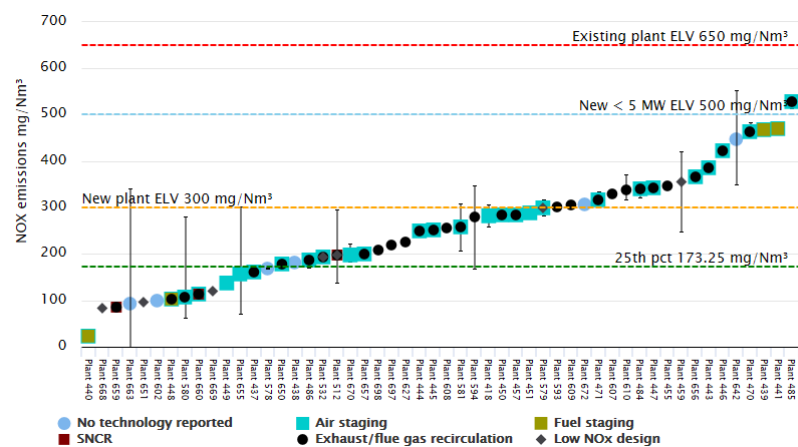
Figuur 4 Stofemissies van ketels (1 - 50 MW_{th}) op vaste biomassa

Van de biomassagestookte installaties in dit onderzoek heeft 25% een stofemissie beneden de 4 mg/Nm³ zie Figuur 4⁴³. Vrijwel alle installaties met een lagere emissie hebben een ESP of een doekenfilter. Er mag gesteld worden dat dergelijke filters, ook voor bestaande installaties, stand der techniek is.

Zoals uit Figuur 5 blijkt, voldoet ongeveer 10% van de installaties al aan een emissie-niveau van 100 mg NO_x/Nm³. Volgens dit overzicht is SNCR toegepast op drie installaties van alle installaties die emissie-gegevens hebben aangeleverd. Ook met andere technieken worden lage emissies bereikt. In deze inventarisatie is geen installatie aanwezig die SCR toepast.

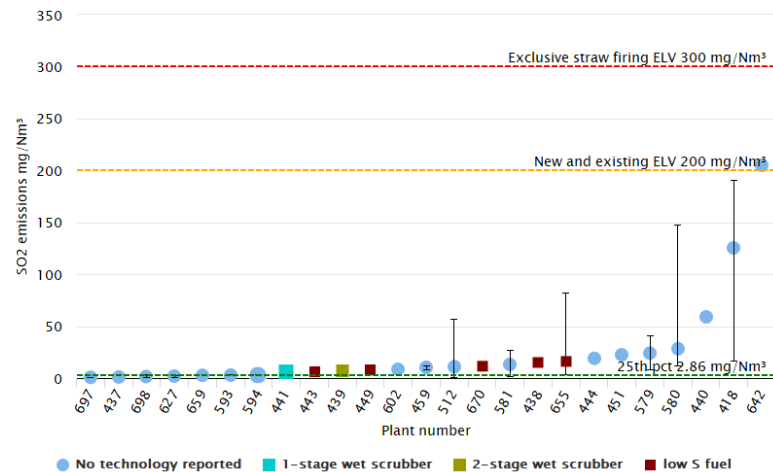
⁴² The Medium Combustion Plant (MCP) Directive is sinds 18 december 2018 van kracht en diende op 19 december 2017 te zijn omgezet in nationale wetgeving.

⁴³ In deze studie van Ricardo zijn alle emissiecijfers van installaties op vaste brandstof omgerekend naar 6% zuurstof (Ricardo, 2019, zie pag 21).



Figuur 5 NO_x-emissies van ketels (1 - 50 MW_{th}) op vaste biomassa

De SO₂-emissies van ketels op vaste biomassa is weergegeven in Figuur 6. Bij de 25% installaties die het best presteerden (< 3 mg/Nm³) werd geen reductie techniek gerapporteerd. Het bestand bevatte verder 2 scrubbers en 5 keer werd een brandstof met een laag zwavelgehalte gerapporteerd. Er waren drie installaties (12%) die een emissie tussen de 50 en 210 mg/Nm³ rapporteerden⁴⁴. Hieruit kan geconcludeerd worden dat hoge emissies kunnen voorkomen, bijvoorbeeld door het stoken van stro.



Figuur 6 SO₂-emissies van ketels (1 - 50 MW_{th}) op vaste biomassa

In Tabel A.1 is een overzicht opgenomen van een aantal Nederlandse emissiegrenswaarden en emissiefactoren, zoals deze uit diverse bronnen naar voren komen: studies, vergunningen en andere bronnen van informatie.

⁴⁴ Twee van dit type installaties rapporteren eveneens een sterk verhoogde NO_x-emissie. Opmerkelijk is dat de derde installatie, met 60 mg SO₂/Nm³, juist een zeer lage NO_x-emissie rapporteert heeft; mogelijk is hier een rapportage-fout gemaakt.

Tabel A.1 Waarden conform recente studie van RoyalHaskoningDHV, vergunningen en andere bronnen van informatie

	NO _x (mg/Nm ³ , 6% O ₂)	Totaal stof (mg/Nm ³ , 6% O ₂)	SO ₂ (mg/Nm ³ , 6% O ₂)	NH ₃ (mg/Nm ³ , 6% O ₂)
Praktijk restemissies volgens (Tabel 8 in RoyalHaskoningDHV, 2020)	30 - 80	0,5 - 3	2 - 10	<1 - 2
Recent afgegeven vergunningen volgens (Tabel 8 in RoyalHaskoningDHV, 2020)	80 - 100	4,5 - 5	30 - 50	4
Vergunning maandgemiddelde emissie - BiomassaWarmte Installatie Utrecht, – Eneco Lage Weide, 2 x 30 MW _{th} (Eneco, 2020)	100	4,5	50	4,5
Berekeningen voor vergunning Natuur-beschermingswet – Attero, Odiliapeel, 10 MW _{th} (ODBN, 2016)	145	NA	NA	5
Praktijk restemissies (mondelinge informatie) – Attero, Odiliapeel, 10 MW _{th} (ODBN, 2016)	40	1-2	30-40	NA
Vergunning Bio Forte, Zaandam, totaal 3,5 MW _{th} (ODNZKG, 2019; MOB, 2019). Toepassing van SCR, SNCR en rookgascondensor	100	10	100	NA
Garantiewaarden leverancier HoSt – Biomassacentrale Andijk (HoSt, 2020a, 2020b, 2020c)	<30	<2	NA	NA

B Definitie biomassa in het Activiteitenbesluit en het BOR

biomassa:

- a. producten die bestaan uit plantaardig landbouw- of bosbouwmateriaal dat gebruikt kan worden als brandstof om de energetische inhoud ervan te benutten;
- b. de volgende afvalstoffen:
 - 1°. plantaardig afval uit land- of bosbouw;
 - 2°. plantaardig afval van de levensmiddelenindustrie, indien de opgewekte warmte wordt teruggewonnen;
 - 3°. vezelachtig plantaardig afval afkomstig van de productie van ruwe pulp en van de productie van papier uit pulp, indien het op de plaats van productie wordt meeverbrand en de opgewekte warmte wordt teruggewonnen;
 - 4°. kurkafval;
 - 5°. houtafval, met uitzondering van houtafval dat ten gevolge van een behandeling met houtbeschermingsmiddelen of door het aanbrengen van een beschermingslaag gehalogeneerde organische verbindingen dan wel zware metalen kan bevatten.

C Emissiemetingen aan kleinere ketels

Van installaties groter dan 0,5 MW_{th} zijn niet op grote schaal emissiemetingen beschikbaar. Veel biomassaketels kleiner dan 0,5 MW zijn wel op basis van een standaardprocedure doorgemeten. Dit is relevant, omdat emissies voor kleine ketels veelal ook representatief zijn voor grotere ketels.

Metingen aan de stofemissie van snipperhout- en pelletketels

Er is een grote set van 110 metingen van het Josephinum Instituut geraadpleegd, waarin emissies van snipperhoutketels met vermogens die variëren tussen 20 en 400 kW_{th} zijn gemeten. Deze metingen zijn meestal uitgevoerd met snippers (houtchips) van sparrenhout (slechts enkele metingen met beukenhout). Het vochtpercentage van de snippers varieerde sterk over de diverse metingen, maar het merendeel is uitgevoerd met 0,18-0,30 kg vocht/kg brandstof. De ketels zijn niet uitgerust met stoffilters, zoals een ESP (Josephinum Institut, 2014). De resultaten van de metingen staan in Tabel C.1. De metingen zijn gerapporteerd bij 13% O₂ en hier omgerekend naar 6% O₂. Uit de metingen kan niet geconcludeerd worden dat deze ketels zeer hoge uitschieters ten aanzien van stofemissies laten zien. Ook niet dat het vochtgehalte, binnen de genoemde bandbreedte, grote invloed heeft.

Tabel C.1 Stofemissiemetingen aan snipperhout en pelletketels ESP (Josephinum Institut, 2014)

Omschrijving	Stofemissie in mg/Nm ³ bij 13% O ₂	Stofemissie in mg/Nm ³ bij 6% O ₂
Snipperhoutketels		
Normale range	13 - 45	24 - 84
Uitschieters (vooral bij < 75 kW _{th})	> 58	>110
Meeste snipperhoutketels	20 - 25	38 - 47
Pelletketels		
Normale range	5 - 30	9 - 56
Meeste pelletketels	< 20	< 38
Ecodesign eisen per 1-1-2022		
≤ 500 kW _{th} automatisch gestookt		54 (seizoensgemid.)

Daarnaast zijn 150 metingen aan pelletketels geanalyseerd (zie ook Tabel C.1). Deze waren meestal kleiner dan 100 kW_{th}. Uit de tabel kan geconcludeerd worden dat het stoken op pellets in het algemeen in minder stof-emissie resulteert dan het stoken op snipperhout.

De lagere uitstoot wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de betere kwaliteit van de pellets (meer constante kwaliteit, een lager vochtgehalte en mogelijk ook minder bast dan bij houtchips het geval is) en mogelijk ook door een meer stabiele brandstoftoevoer naar de ketel, waardoor de brandstof-luchtverhouding beter te regelen is. Ketels en kachels waarbij de gebruiker, handmatig, de brandstof en luchttoevoer regelt kunnen tot een aanzienlijk (tot substantieel) hogere stofemissie

leiden. Het gaat dan vooral over stookhoutketels en -kachels in de huishoudelijke sector. Deze categorie valt echter buiten de context van dit rapport.

Ecodesign eisen fijnstof

In de Ecodesign richtlijn voor lokale ruimteverwarmingstoestellen op vaste brandstof is de stofemissie-eis op 40 mg/m³ bij 13 % O₂ gesteld, maar voor installaties op pellets 20 mg/m³ bij 13 % O₂ (EU, 2015c). Omgerekend is dat 38 respectievelijk 75 mg/Nm³ bij 6% O₂. Deze eisen gaan in per 1 januari 2022. Voor ketels is de seizoensgebonden eis voor automatisch gestookte ketels op 40 mg/m³ bij 10% O₂ gesteld en voor handmatig gestookte ketels op 60 mg/m³ bij 10% O₂ (EU, 2015a). Omgerekend is dat 54 respectievelijk 82 mg/Nm³ bij 6% O₂. Deze eisen treden inwerking per 1 januari 2020. De eis voor automatisch gestookte ketels is ook aan Tabel C.1 toegevoegd.

Metingen aan de NO_x-emissie van metingen aan snipperhoutketels en pelletketels

Van de genoemde 110 snipperhoutketels van 20 tot 400 kW_{th} is ook de NO_x-emissie geïnventariseerd. De gevonden emissiebandbreedte is opgenomen in Tabel C.2. Ook de resultaten voor de 150 gemeten pelletketels staan in deze tabel (Josephinum Institut, 2014). Hieruit kan dus worden geconcludeerd dat het stoken op pellets in het algemeen resulteert in minder NO_x-emissies dan het stoken op snipperhout.

Daarnaast blijkt uit deze metingen dat de huidige NO_x-eisen voor biomassaketels, kleiner dan 5 MW_{th}, niet aan de onderzijde van de emissie-range voor biomassaketels ligt. Ook de metingen van snipperhoutketels laten zien dat een onbestreden emissie van 225 mg NO_x/Nm³ voor een groot deel van de ketels haalbaar is.

Tabel C.2 Metingen NO_x-emissies aan kleinere snipperhout en pelletketels ESP (Josephinum Institut, 2014)

Omschrijving	NO _x -emissie in mg/Nm ³ bij 13% O ₂	NO _x -emissie in mg/Nm ³ bij 6% O ₂
Snipperhoutketels		
Range	95 - 195	180 - 360
Pelletketels		
Range	50 - 150	94 - 282
Ecodesign eisen per 1-1-2022		
≤ 500 kW _{th}		272 (seizoensgemid.)

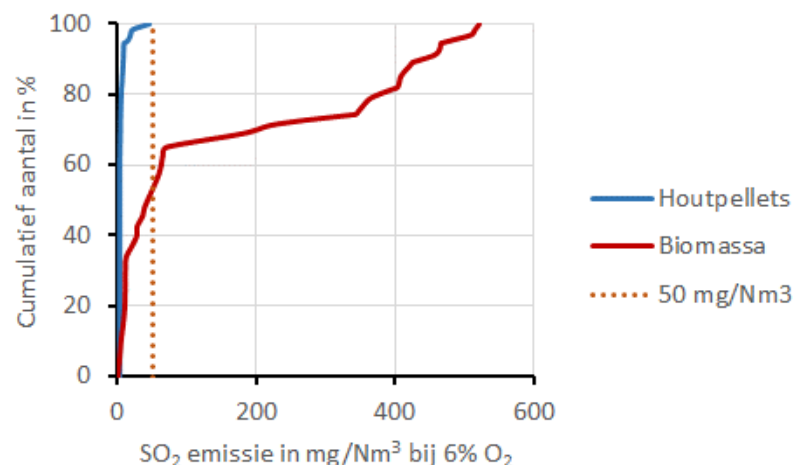
Ecodesign NO_x-eisen

Voor ketels op biomassa is de seizoensgebonden NO_x-emissie-eis 200 mg/m³ bij 10 % O₂ (EU, 2015a). Omgerekend is dat 272 mg/Nm³ bij 6% O₂. Deze eis gaat in per 1 januari 2020 en is ook aan Tabel C.2 toegevoegd. Er is geen onderscheid bij NO_x tussen automatisch of handmatig gestookte ketels. Er zijn in deze verordening geen eisen aan de emissie van SO₂, wel aan de emissie van gasvormige organische verbindingen (OGC) en koolmonoxide (CO). Deze emissiegrenswaarden zijn relevant om volledige verbranding te stimuleren.

Hoewel dit rapport over ketels gaat, kan nog wel opgemerkt worden dat de Ecodesign richtlijn ook voor ruimteverwarmingstoestellen (zoals kachels) op biomassa NO_x -emissie-eisen stelt. Deze zijn $200 \text{ mg NO}_x/\text{m}^3$ bij 13 % O_2 voor toestellen met een gesloten voorzijde en $300 \text{ mg NO}_x/\text{m}^3$ bij 13 % O_2 bij een open voorzijde (EU, 2015c). Omgerekend is dat 375 respectievelijk $564 \text{ mg NO}_x/\text{Nm}^3$ bij 6% O_2 . De hoge emissie bij een open voorzijde komt omdat hier feitelijk geen enkele vorm van luchtregeling mogelijk is. Deze eisen gaan in per 1 januari 2022. Ook voor deze installaties zijn emissie-eisen ten aanzien van OGC en CO van toepassing.

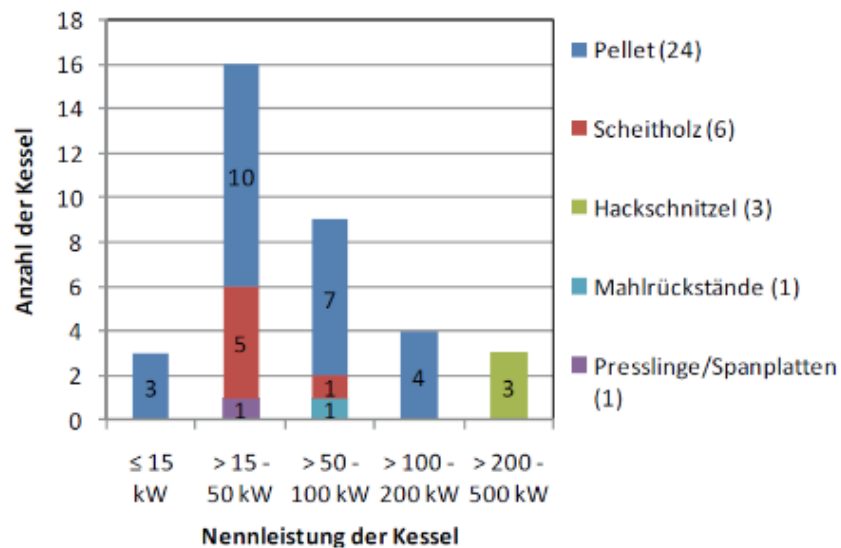
SO₂-emissies, metingen in Duitsland

Er zijn gegevens uit een presentatie uit 2012 geanalyseerd omtrent de SO_2 -emissie van een groot aantal kleinere stookinstallaties op hout en diverse andere biobrandstoffen (Woltersdorf, 2012; Woltersdorf, 2013). Van de SO_2 -emissies is in Figuur 7 een curve gemaakt (het zuurstofgehalte is hier van 13% in de oorspronkelijke presentatie omgerekend naar 6%). Hierin is het percentage installaties dat onder een bepaalde SO_2 -emissie blijft uitgezet tegen de betreffende SO_2 -emissie. Hieruit blijkt dat alle houtpellets gestookte installaties onder de $50 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ (bij 6% O_2) blijven, maar dat dit van de installaties op andere biomassa maar voor 50% het geval is.



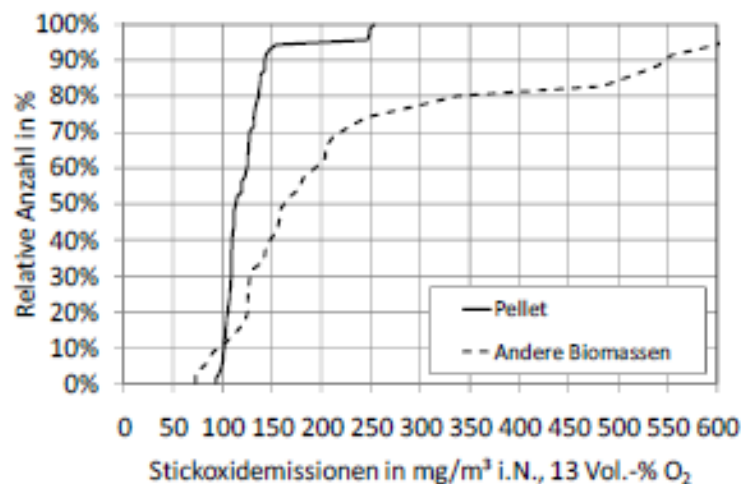
Figuur 7 SO₂-emissie van kleine stookinstallaties in meetprogramma.

De gemeten brandstoffen staan in Figuur 8. De hoogste SO_2 -emissie is afkomstig door het stoken van pellets geproduceerd uit maalrestanten (Woltersdorf, 2013). Het is echter niet duidelijk in de presentatie van welk proces deze restanten afkomstig zijn. Dit kan bijvoorbeeld afkomstig zijn uit de Voeding- en Genotmiddelenindustrie, maar bijvoorbeeld ook Afvalverwerking kan een bron hiervoor zijn.



Figuur 8 Grootte verdeling van het meetprogramma en brandstof (Woltersdorf, 2012)⁴⁵.

Voor de volledigheid zijn ook de NO_x-gegevens opgenomen in Figuur 9; deze gegevens zijn niet omgerekend naar 6% O₂. Om de emissies naar 6% te vertalen moet nog met 1,88 vermenigvuldigd te worden. Een niveau van 133 mg NO_x/Nm³ in de figuur is gelijk aan 250 mg NO_x/Nm³ bij 6% O₂. De hoogste NO_x-emissies zijn afkomstig van het stoken van spaanplaat. Ook maalrestanten en houtsnippers hebben hoge emissies (Woltersdorf, 2013). Het is duidelijk dat het type biobrandstof een fors effect op de NO_x-emissie kan hebben: spaanplaat bevat veel stikstof in de toegepaste lijm, waardoor de NO_x-emissie bij deze brandstof veelal hoog is.



Figuur 9 NO_x-emissie van kleine stookinstallaties in meetprogramma (Woltersdorf, 2012).

⁴⁵ Pellets (Pellets), Scheitholz (brandhout/blokken hout), Hackschnitzel (houtsnippers/chips), Mahlrückstände (maalrestanten), Presslinge/spanplatten (geperst zaagsel van spaanplaten)

D Beschikbaarheid van filters in Duitsland

In Duitsland wordt op grote schaal filters geplaatst achter houtgestookte installaties, ook als retrofittoepassing bij bestaande installaties. Het Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) van de Universität Stuttgart heeft in 2017 een overzicht gemaakt van diverse leveranciers. Er is onderscheid gemaakt in ESP-filters en doekenfilters (inclusief hittebestendige metaalvezelfilters) (IFK, 2017). Ook voor installaties groter dan in dit overzicht opgenomen, zijn filters beschikbaar.⁴⁶

Tabel D.1 Overzicht van ESP-filters voor retrofit of als onderdeel van een nieuwe ketel (IFK, 2017)

Typ	Hersteller	Installationsort	Reinigung	Brennstoffe	Einzelraumfeuerungen Nennwärmeleistung	Heizkessel Nennwärmeleistung	Entwicklungsstand
Elektrofilter zur Nachrüstung							
OekoTube QT2 ¹⁾	Schröder Abgastechnologie *	Schornsteinmündung	Schornsteinfeger	Stückholz / Hackschnitzel / Pellets	bis 50 kW	bis 50 kW	DEB-Zulassung
OekoTube inside	Schröder Abgastechnologie *	nach Heizkessel	Schornsteinfeger	Stückholz / Hackschnitzel / Pellets	-	bis (25) 50 kW	DEB-Zulassung
U-Filter	Schröder Abgastechnologie *	nach Heizkessel	Nassabreinigung	Stückholz / Hackschnitzel / Pellets	-	bis 180 kW	markterhältlich
AL-Top	Schröder Abgastechnologie *	nach Heizkessel	Nassabreinigung	Feststofffeuerungen	-	bis 300 kW	DEB-Zulassung
Filterbox	Schröder Abgastechnologie *	nach Heizkessel	Nassabreinigung	Holzfeuerungen	-	300 - 600 kW	markterhältlich
Filterbox-S ²⁾	Schröder Abgastechnologie *	nach Heizkessel	Vibration	keine Angaben	-	bis 300 kW	markterhältlich
OekoRona	Schröder Abgastechnologie *	nach Heizkessel	Schieber	Stückholz / Hackschnitzel / Pellets	-	bis 300 kW	DEB-Zulassung
Airjekt 1 ³⁾	Kutzner+Weber *	Verbindungsrohr	Schornsteinfeger	Stückholz / Pellets	bis 25 kW	bis 50 kW	DEB-Zulassung
Airjekt 25-50	Kutzner+Weber *	nach Heizkessel	Nassabreinigung	keine Angaben	-	bis 100 kW	DEB-Zulassung beantragt
Carola Baureihe CCA ⁴⁾	Carola Clean Air GmbH *	nach Heizkessel	rotierende Bürste	Stückholz / Hackschnitzel / Pellets	-	bis 200 kW	DEB-Zulassung
Dry ESP	Robert Bosch GmbH **	Verbindungsrohr	Schornsteinfeger	Stückholz, Pellets	bis 25 kW	bis 50 kW	Prototyp
Ruff-Kat	Ruff-Kat GmbH *	Schornsteinmündung	Vibration	Stückholz, Pellets	bis 25 kW	bis 25 kW	Prototyp
KFK-Mini Box ⁵⁾	TH Alternative Energie *	nach Heizkessel	Nassabreinigung	Stückholz / Hackschnitzel / Pellets	-	bis 50 kW	Prototyp
Elektrofilter als Bestandteil der Feuerungsanlage							
Airbox	Spartherm GmbH *	Aufsatzmodul	manuell	Stückholz	bis 15 kW	-	Prototyp
Elektrofilter ESPF	Prödl Ges.m.b.H. *	nach Heizkessel	Nassabreinigung	Hackgut	-	bis 150 kW	markterhältlich
EC Filter 24/85/250 kW	Quintamatic Heiztechnik GmbH *	nach Heizkessel	Klopfabreinigung	Stückholz / Hackschnitzel / Pellets	-	bis 250 kW	markterhältlich
Filterbox 25 / 50 / 150	GES gGmbH *	im / nach Heizkessel	manuell	Stückholz / Hackschnitzel / Pellets	-	bis 50 kW	Prototyp

¹⁾ Nachfolgemodell des Typs "Future Refine" (DEB-Zulassung Z-7.4-3471 vom 5.3.2013 (Geltungsdauer: 5.3.2018))

²⁾ Weiterentwicklung der Typenreihe SF der Spanner Re² GmbH

³⁾ Nachfolgemodell des Typs "Zumiklort" (DEB-Zulassung Z-7.4-3442 vom 14.3.2011 (Geltungsdauer: 14.3.2016))

⁴⁾ Baureihe Carola CCA-25, CCA-50, CCA-100 und CCA-200

⁵⁾ es wurden noch weitere Prototypen unter den Bezeichnungen KFK-NH 200, KFK-Box M200 und KFK-Box M500 für größere Kesselleistungen bis 500 kW entwickelt

* Herstellerangaben (Prospekte zu Produkten oder Vorträge, siehe Quellenverzeichnis: Name des Herstellers)

** Mandl et al., 2010

Tabel D.2 Overzicht van doekenfilters voor retrofit of als onderdeel van een nieuwe ketel (IFK, 2017)

Typ	Hersteller	Installationsort	Reinigung	Brennstoffe	Einzelraumfeuerungen Nennwärmeleistung	Heizkessel Nennwärmeleistung	Entwicklungsstand
filternde Abscheider zur Nachrüstung							
Pure Heat	MAHLE Industriefiltration GmbH *	Abgasanlage	Handabreinigung ¹⁾	Stückholz	bis 12 kW ³⁾	bis 12 kW ³⁾	DEB-Zulassung ³⁾
Glasfaserblende ¹⁾	KIT *	nach Feuerungsanlage	prozelbedingt	Hölzer	k.A.	k.A.	Prototyp
Feinstaubfilter ¹⁾	RWTH Aachen *	Schornsteinmündung	Einwegfilter	Stückholz / Hackschnitzel / Pellets	bisher < 15 kW	bisher < 15 kW	Prototyp
regenerierbarer Filter	TU Wien *	nach Feuerungsanlage	prozelbedingt	k.A.	k.A.	k.A.	Labortyp
filternde Abscheider als Bestandteil der Feuerungsanlage							
Metallgewebefilter	Köb Holzheizsysteme GmbH * ⁴⁾	nach Heizkessel	Druckluft	Hackschnitzel, Pellets	-	100 bis 540 kW	markterhältlich ⁵⁾
Metallgewebefilter MF	Wirtschaftliche Verbrennungs-Technik GmbH *	nach Heizkessel	Druckluft	Biomasse	-	100 bis 1.000 kW	markterhältlich ⁶⁾

¹⁾ für den Prototypen wurde noch keine Typenbezeichnung genannt

²⁾ Filter kann mit Hand (Rüttleinrichtung) abgereinigt werden, außerdem erfolgt bei hohen Temperaturen eine Selbstreinigung (Nachverbrennung von Ruß)

³⁾ DEB-Zulassung (Geltungsdauer bis 13.11.2019) nur für handbeschickte raumluftunabhängige Feuerstätten, der Filtertyp ist am Markt nicht erhältlich

⁴⁾ Köb Holzheizsysteme GmbH (A-Wolfrut) wurde 2007 von der Viessmann Group (D-Altenhof) übernommen, in 2015 wurde die Marke Köb vom Markt genommen

⁵⁾ nur von Köb Holzheizsysteme GmbH. Die Firma Viessmann bietet den Filter aktuell nicht mehr an

⁶⁾ Insolvenzantrag der Wirtschaftliche Verbrennungs-Technik GmbH Ende 2016: Service + Ersatzteilgeschäft durch Lasa-energy GmbH, Neuanlagengeschäft durch Kooperation mit Firma Herz (A-Bämbach)

* Herstellerangaben (Prospekte zu Produkten oder Vorträge, siehe Quellenverzeichnis: Name des Herstellers)

k.A. es liegen keine Angaben vor

⁴⁶ Leveranciers van grote ESP's voor bijvoorbeeld kolencentrales zijn: GE; Feida; Balcke-Dürr; Longking; Siemens; Babcock and Wilcox; FLSmidth; Tianjie Group; Sinoma; Hamon; Foster Wheeler; BHEL; Ducon Technologies; Sumitomo; KC Cottrell; Hitachi; Hangzhou Tianming; Kelin; Trion; Elex; Fuel Tech; Geeco Enercon;Thermax.

E Kosteneffectiviteit volgens het AMEC rapport

In het rapport van AMEC zijn reductiepercentages en jaarlijkse kosten opgenomen voor diverse technieken (AMEC, 2012, pag 53). Voor biomassa en andere vaste brandstoffen zijn deze ingedeeld in drie categorieën: 1 - 5 MW_{th}, 5 - 20 MW_{th} en 20 - 50 MW_{th}.

Er is geen vermogen en brandstofverbruik weergegeven waarvoor de kosten precies zijn berekend. Daarom is hier van het lineair gemiddelde vermogen uitgegaan (3, 12,5 en 30 MW_{th}) en van de bedrijfstijd zoals op pagina 41 is opgenomen (AMEC, 2012, pag 41) respectievelijk, 2100, 3100 en 1850 uur. De grootste categorie maakt volgens gegevens van AMEC dus minder vollasturen dan de middelste. Op basis van deze vermogens en bedrijfstijd kan een gemiddeld brandstofverbruik berekenend worden van 22,7, 140 en 233 TJ per jaar.

Tenslotte is de onbestreden emissie voor de berekening als volgt aangenomen: fijnstof op 100 mg/Nm³ (aanneمة dat cycloon afwezig is), NO_x op 190 mg/Nm³ en SO₂ op 100 mg/Nm³ bij 6% O₂.⁴⁷

Onzekerheden

Omdat het AMEC rapport vaste kostencijfers per vermogensklasse geeft moet opgemerkt worden dat voor groepen installaties kosteneffectiviteit anders kan liggen.

- Kosten bij bestaande installaties zijn over het algemeen hoger;
- Kosten bij kleinere installaties zijn over het algemeen hoger;
- Worden hogere onbestreden emissies aangenomen dan hier verondersteld, dan dalen de kosten per kg;
- Wordt een hogere bedrijfstijd aangenomen dan dalen de kosten per kg.

Bij de opgenomen technieken zijn het vooral de investeringen en de standaard onderhoudskosten die de kosten bepalen. Een andere bedrijfstijd heeft daardoor minder effect op de jaarlijkse kosten.

De kostencijfers van AMEC bevatten een lage en een hoge inschatting. Deze kostenbandbreedtes zijn overgenomen. In de laatste twee kolommen zijn de kosten nog omgerekend naar Euro/GJ brandstof, dit als indicatie van de gevolgen voor de kostprijs van energie uit installatie. In de SDE+ berekeningen voor 2019 is gerekend met een prijs voor houtpellets van 10 euro/GJ en voor snoei- en dunningshout van 5 euro/GJ. Een kostenstijging van 1 euro/GJ is vergelijkbaar met een stijging van de brandstofkosten met 10 tot 20%.

⁴⁷ Voor omrekening van g/GJ (LHV) naar mg/Nm³ bij 6% O₂ is een vermenigvuldigingsfactor van 1/0,34 verondersteld (34 g/GJ=100 mg/Nm³ bij 6% O₂)

Tabel E.3 Kosteneffectiviteiten berekend op basis van kosten uit het AMEC rapport. Gegevens afkomstig uit (AMEC, 2012). Reductiekosten voor 20 - 50 MW_{th} zijn in het algemeen hoger dan voor 5 - 20 MW_{th} in deze studie, hoewel er overlap is in de kostenbandbreedte. In het AMEC rapport is een grote bandbreedte aan kosten gevonden voor de grote vermogenscategorie. Daarnaast verschillen de aangenomen bedrijfstijden, waarbij de categorie 20-50 MW_{th} een lagere bedrijfstijd heeft dan de categorie 5-20 MW_{th}.

Vermogen [MWth)	Reductie [%]	Rest emissie [mg/Nm³]	Kosten per jaar [keuro]		Kosten per kg reductie euro/kg		Kosten uitgedrukt in Euro/GJ brandstof	
			min	max	min	max	min	max
Fijnstof optie: cyclooon								
1 - 5	65%	35	2,7	2,9	5,4	5,8	0,12	0,13
5 - 20	65%	35	3,6	3,6	1,2	1,2	0,03	0,03
20 - 50	65%	35	6,9	6,9	1,3	1,3	0,03	0,03
Fijnstof optie: doekenfilter								
1 - 5	95%	5	3,7	9,9	5,0	13,5	0,16	0,44
5 - 20	99%	1	18,5	44,7	3,9	9,5	0,13	0,32
20 - 50	99%	1	44,8	101,1	5,7	12,9	0,19	0,43
NO _x optie: lage NO _x aanpassingen branders en verbrandingskamer								
1 - 5	30%	133	0,9	0,9	2,1	2,1	0,04	0,04
5 - 20	30%	133	5,6	5,6	2,1	2,1	0,04	0,04
20 - 50	30%	133	14,5	14,5	3,2	3,2	0,06	0,06
NO _x optie: selectieve niet katalytische reductie (SNCR)								
1 - 5	35%	124	3,0	4,5	5,8	8,8	0,13	0,20
5 - 20	40%	114	4,9	12,5	1,4	3,5	0,04	0,09
20 - 50	45%	105	12,3	42,5	1,8	6,3	0,05	0,18
NO _x optie: selectieve katalytische reductie (SCR)								
1 - 5	80%	38	4,1	19,7	3,5	16,8	0,18	0,87
5 - 20	85%	29	10,1	98,5	1,3	12,9	0,07	0,71
20 - 50	90%	19	32,8	394,0	2,4	29,1	0,14	1,69
SO ₂ optie: Droge rookgasontzwaveling								
1 - 5	70%	30	2,1	2,6	3,8	4,8	0,09	0,11
5 - 20	75%	25	10,4	13,1	2,9	3,7	0,07	0,09
20 - 50	80%	20	41,5	52,1	6,5	8,2	0,18	0,22

Toelichting per stof

Bij stof zijn ter vergelijking de kosten van een cycloon opgenomen. Een doekenfilter kost 4 - 13 euro/kg vermeden stofemissie. Indien wordt verondersteld dat de onbestreden emissie niet op 100 maar op 40 mg/Nm³ ligt, dan stijgen de kosten per

kilogram vermeden stofemissie naar 24 - 32 euro/kg. Met een doekenfilter wordt dan in alle gevallen een emissie van 2 mg/Nm³ bereikt.

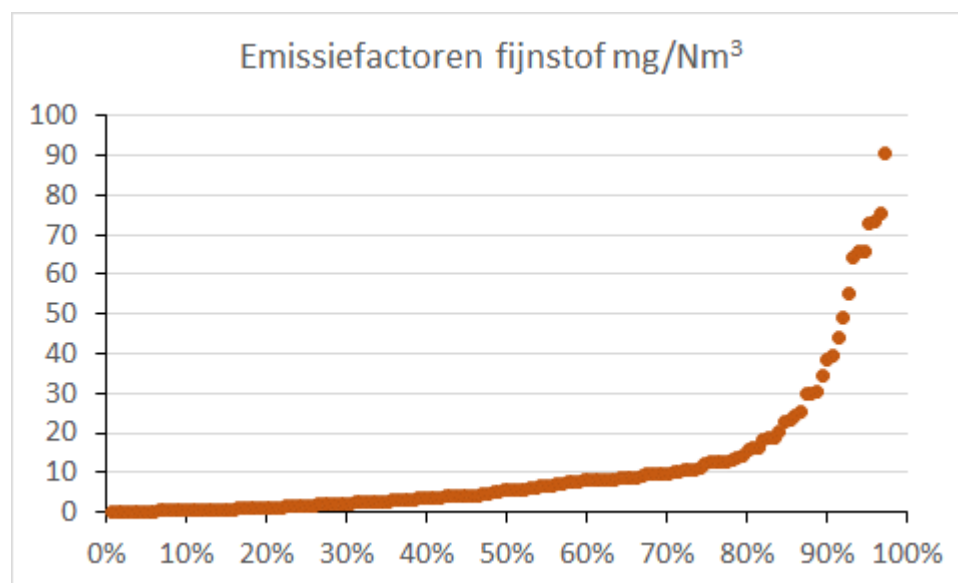
Bij NO_x zijn ter vergelijking ook de kosten voor verbrandingsmodificaties opgenomen. Deze kosten zijn, met 2 - 3 euro/kg vermeden NO_x-emissie, aanzienlijk lager dan toepassing van SNCR of SCR. Voor SNCR of SCR is feitelijk reeds verondersteld dat verbrandingsmodificaties zijn toegepast en de onbestreden emissie hierdoor al is gedaald naar 190 mg/Nm³. Voor SNCR komen de kosten uit in de range van 1,5 tot 9 euro/kg NO_x-emissie vermeden. Voor SCR, waarbij behalve de injectie van een reductiemiddel ook in de juiste temperatuurrange katalysator pakketten moeten worden geplaatst, liggen de kosten in de range van 1,5 tot 30 euro/kg NO_x-emissie vermeden. Met SCR worden echter ook veel lagere emissieniveaus bereikt.

Bij SO₂ is alleen de optie droge rookgasontzwaveling opgenomen. Dit kan met een aparte installatie in het rookgaskanaal, maar dit is ook mogelijk middels injectie van kalk voor een doekenfilter. De kosten liggen in de orde van 3 tot 8 euro per kg SO₂-emissie vermeden.

F Emissies van grote stookinstallaties

In het kader van de Europese richtlijn rond industriële emissies (IED) wordt jaarlijks gerapporteerd over de emissies van stookinstallaties die groter zijn dan 50 MW_{th}⁴⁸. In de jaarlijkse rapportage is tevens het brandstofverbruik opgenomen. Uit het bestand over 2017⁴⁹ is een selectie gemaakt van installaties die tenminste 90% biomassa stoken. Uit de installatielijst die dit opleverde zijn ook de installaties verwijderd die in het resterende deel veel andere brandstof (als kolen of turf) of olie stoken. Dit leverde uiteindelijk een lijst van 151 installaties op. Van deze installaties werd de emissie per energie-eenheid bepaald in g/GJ en dit werd met een factor 1/0,34 omgerekend naar mg/Nm³ bij 6% O₂. Een overzicht van de installaties is aan het eind van deze bijlage opgenomen. Er wordt hier opgemerkt dat veel biomassa gestookte installaties te vinden zijn bij de stadsverwarming of bij grote industriële bedrijven die een eigen biomassa reststroom hebben.

De verkregen lijst van biomassa-installaties met emissiefactoren zijn geordend op emissieniveau en dat leverde de volgende figuren op.

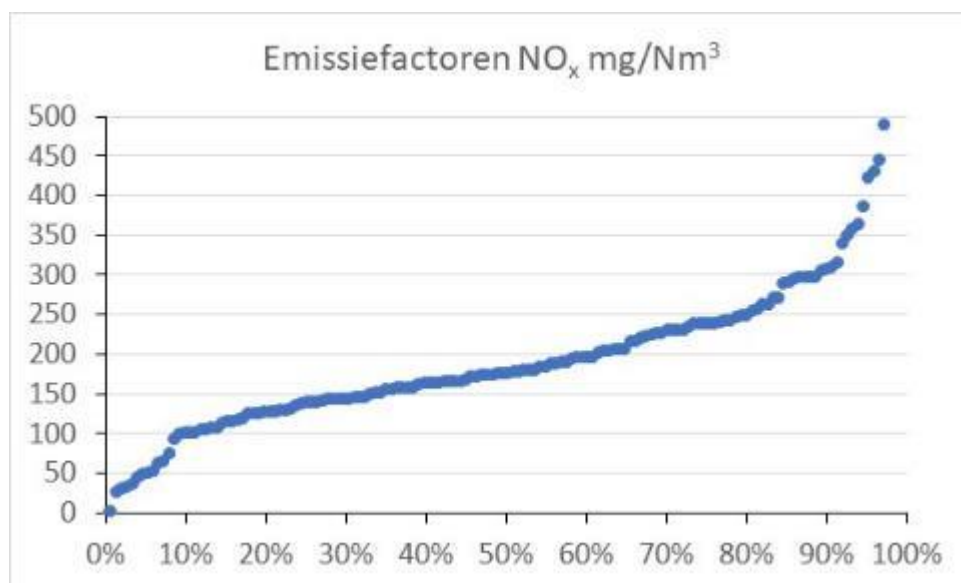


Figuur 10 Stofemissiefactoren 2017 EU stookinstallaties >50 MW_{th} op >90% biomassa

Uit Figuur 10 kan geconcludeerd worden dat van de installaties > 50 MW_{th} ongeveer de helft een fijnstofemissie heeft die lager ligt dan 5 mg/Nm³. Er zijn ook 4 installaties met een fijnstofemissie boven de 100 mg/Nm³, deze zijn niet zichtbaar in deze figuur.

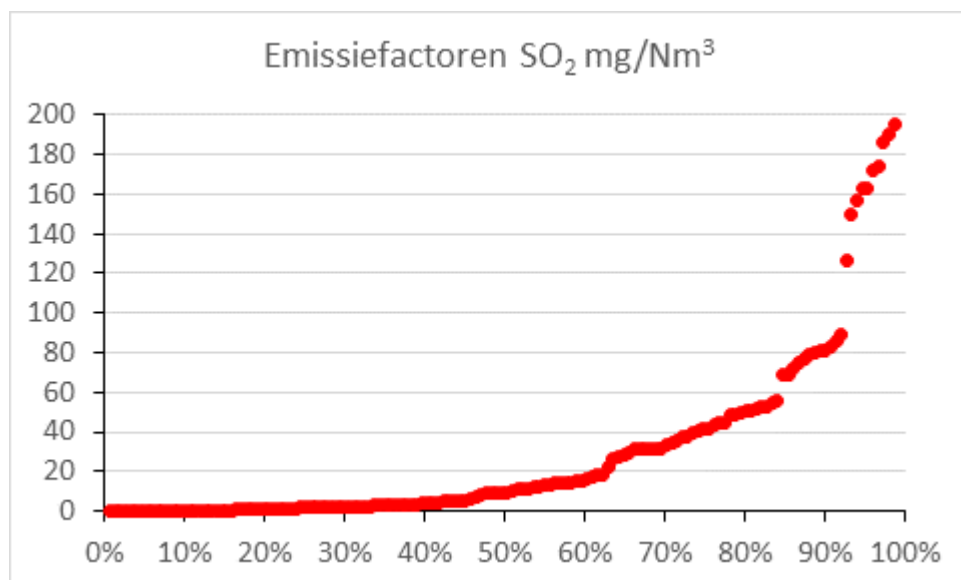
⁴⁸ Reported data on large combustion plants covered by the Industrial Emissions Directive (2010/75/EU) te vinden via <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/lcp-9>

⁴⁹ https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/lcp-9/user-friendly-tables-in-excel/lcp_extract_xlsx.zip/at_download/file



Figuur 11 NO_x-emissiefactoren 2017 EU stookinstallaties >50 MW_{th} op >90% biomassa

Uit Figuur 11 kan geconcludeerd worden dat 10% van de installaties een gemiddelde NO_x-emissie heeft die lager ligt dan 100 mg/Nm³. Ongeveer 60% heeft een gemiddelde emissies die lager is dan 200 mg/Nm³. Niet in de figuur zichtbaar zijn 4 installaties met een NO_x-emissie boven de 500 mg/Nm³.



Figuur 12 SO₂-emissiefactoren 2017 EU stookinstallaties >50 MW_{th} op >90% biomassa

Uit Figuur 12 kan geconcludeerd worden dat 60% van de installaties een gemiddelde SO₂-emissie heeft die lager ligt dan 20 mg/Nm³. Ongeveer 80% heeft een gemiddelde emissies die lager is dan 50 mg/Nm³. 7% van de installaties emitteert meer dan 100 mg/Nm³. Er zijn twee installaties met een SO₂-emissie

boven de 200 mg/Nm³. Dergelijke hoge SO₂-emissies kunnen veroorzaakt worden door stook van bijvoorbeeld biomassa-afval of stro.

De Europese Unie hanteert en handhaaft in het kader van de referentiedocumenten voor Best Beschikbare Technieken voor grote stookinstallaties (BREF LCP) zogeheten BBT conclusies; deze zijn in 2017 opnieuw vastgelegd⁵⁰. De BBT conclusies zijn veelal het resultaat van compromissen met zeer diverse EU-lidstaten.

Eisen voor stof

Rond de toepassing van een ESP of een doekenfilter bij de verbranding van vaste biomassa en/of turf worden geen beperkingen genoemd.

In de BREF LCP worden de volgende ranges voorgesteld die per 17 augustus 2021 ook voor bestaande installaties gaan gelden, zie Tabel F.1. Er wordt verwezen naar de gepubliceerde tekst voor de originele voetnoten.

Tabel F.1 Stofeisen in de BREF LCP voor installaties groter dan 50 MW_{th}

Totaal nominaal thermisch ingangsvermogen van de stookinstallatie (MW _{th})	BBT-GEN's (mg stof/Nm ³ bij 6% O ₂)			
	Jaargemiddelde		Daggemiddelde of gemiddelde over de bemonsteringsperiode	
	Nieuwe installatie	Bestaande installatie	Nieuwe installatie	Bestaande installatie
< 100	2-5	2-15	2-10	2-22
100-300	2-5	2-15	2-10	2-18
>=300	2-5	2-15	2-10	2-16

NO_x eisen

In het BREF LCP document wordt voor de toepassing van SNCR opgemerkt bij de verbranding van vaste biomassa en/of turf:

- Niet toepasbaar op stookinstallaties die < 500 uur/jaar in bedrijf zijn met zeer variabele ketelbelastingen.
- De toepasbaarheid is mogelijk beperkt in het geval van stookinstallaties die tussen 500 en 1500 uur/jaar in bedrijf zijn met zeer variabele ketelbelastingen.
- Voor bestaande stookinstallaties toepasbaar binnen de beperkingen in verband met het vereiste temperatuurbereik en de verblijftijd van de geïnjecteerde reagentia

Voor toepassing van SCR wordt opgemerkt bij de verbranding van vaste biomassa en/of turf:

- Niet van toepassing op stookinstallaties die < 500 uur/jaar in bedrijf zijn.
- Er kan sprake zijn van economische beperkingen op de aanpassing van bestaande stookinstallaties van < 300 MW_{th}.

⁵⁰ UITVOERINGSBESLUIT (EU) 2017/1442 VAN DE COMMISSIE van 31 juli 2017 tot vaststelling van BBT-conclusies (beste beschikbare technieken) op grond van Richtlijn 2010/75/EU van het Europees Parlement en de Raad, voor grote stookinstallaties
Publicatieblad van de Europese Unie, L212, pag 1 -82, 17-8-2017.

- Niet algemeen toepasbaar op bestaande stookinstallaties van < 100 MW_{th}

In de BREF LCP worden de BBT-ranges voorgesteld, die in 2021 ook voor bestaande installaties gaan gelden, zoals weergegeven Tabel F.2. Er wordt verwezen naar de gepubliceerde tekst voor de originele voetnoten.

Tabel F.2 NO_x-eisen in de BREF LCP voor installaties groter dan 50 MW_{th}

Totaal nominaal thermisch ingangsvermogen van de stookinstallatie (MW _{th})	BBT-GEN's (mg NO _x /Nm ³ bij 6% O ₂)			
	Jaargemiddelde		Daggemiddelde of gemiddelde over de bemonsteringsperiode	
	Nieuwe installatie	Bestaande installatie	Nieuwe installatie	Bestaande installatie
50-100	70-150	70-225	120-500	120-275
100-300	50-140	50-180	100-200	100-220
>=300	40-140	40-150	65-150	95-165

SO₂-eisen

Rond de toepassing van natte rookgasontzwaveling (wet Flue Gas Desulfurization) wordt opgemerkt bij de verbranding van vaste biomassa en/of turf:

- Niet van toepassing op stookinstallaties die < 500 uur/jaar in bedrijf zijn.
- Er kan sprake zijn van technische en economische beperkingen op de aanpassing van bestaande stookinstallaties die tussen 500 en 1500 uur/jaar in bedrijf zijn

In de BREF LCP worden de volgende ranges voorgesteld die in 2021 ook voor bestaande installaties gaan gelden, Tabel F.3. Er wordt verwezen naar de gepubliceerde tekst voor de originele voetnoten.

Tabel F.3 SO₂-eisen in de BREF LCP voor installaties groter dan 50 MW_{th}

Totaal nominaal thermisch ingangsvermogen van de stookinstallatie (MW _{th})	BBT-GEN's (mg SO ₂ /Nm ³ bij 6% O ₂)			
	Jaargemiddelde		Daggemiddelde of gemiddelde over de bemonsteringsperiode	
	Nieuwe installatie	Bestaande installatie	Nieuwe installatie	Bestaande installatie
< 100	15-70	15-100	30-175	30-215
100-300	<10-50	<10-70	<20-85	<20-175
>=300	<10-35	<10-50	<20-70	<20-85

Nederlandse wetgeving

De vaststelling van de BREF LCP waarden in 2017 heeft alleen voor SO₂ geleid tot andere emissie-eisen in het Activiteitenbesluit voor vaste brandstoffen. Voor stof en NO_x liggen de eisen al binnen de BBT range. Voor de SO₂-eisen is dit niet het geval⁵¹. De emissie-eis is, middels een overgangsregime, aangescherpt van 200 of 150 mg/Nm³ voor vaste brandstoffen naar 60 mg/Nm³. Dit betekent dat het

⁵¹ De SO₂-eis is in Nederland vooral van belang voor de kolencentrales. Deze hebben al een emissie die lager ligt dan de oude eis in het activiteitenbesluit.

bevoegde gezag, voor een nieuwe grote biomassa ketel, een eis in de BBT range vast kan stellen. In Tabel F.4 zijn de huidige Nederlandse eisen voor grote stookinstallaties opgenomen. Deze emissie-eisen zijn bedoeld als een vangnetbepaling (Ab, 2020). Voor individuele installaties maakt het bevoegd gezag de afweging of op basis van de BBT-conclusies een scherpere eis passender is.

Tabel F.4 Huidige Nederlandse eisen voor grote stookinstallaties in mg/Nm³ bij 6% O₂

	Emissie-eis	Opmerking
Stof	5	Vaste en vloeibare brandstoffen
NO _x	100	Vaste brandstoffen
SO ₂	200 (50-300 MW _{th}) 150 (>=300 MW _{th})	Vaste en vloeibare brandstoffen (tot 17-aug-2021)
SO ₂	60	Vaste biomassa Per 14 juni 2019 voor nieuwe installaties en voor bestaand per 17-aug-2021
SO ₂	150 (of 80)	Bestaande installaties (met vergunning voor 30 oktober 1999) met vaste brandstoffen (geen biomassa) en vloeibare brandstoffen. Waarde van 80 is voor overig (dus nieuwe en korter bestaande installaties van deze soort)

Tabel F.5 Tabel Europese stookinstallaties op >90% biomassa >50 MW_{th} met 2017 emissiefactoren

Land	Naam van de installatie	Vermogen MW _{th}	Emissiefactoren in mg/Nm ³ bij 6% O ₂		
			SO ₂	NO _x	Stof
SE	B-block	50	43	364	30,4
RO	SC BIOENERGY SUCEAVA SRL nr.2	50	32	238	65,8
RO	SC BIOENERGY SUCEAVA SRL nr. 1	50	32	238	65,8
FR	FR061.04447A.Part	52	84	548	10,4
SE	Arctic Paper Grycksbo AB	55	0	98	0,5
SE	Panna 4	55	11	163	10,7
LT	SC "Pagiriu Siltnamiai"	55	0	1	0,0
DK	VEKS Køge Kraftvarmeværk	56	5	237	6,7
DK	Dalum Kraftvarme	56	49	173	29,9
FR	FR052.09637A.Part	56	0	242	0,2
FR	FR058.04127A.Part	57	0	172	6,7
HU	DBM Dél-Nyírségi Bioerőmű	58	2	158	1,7
SE	Önafors värmeverk	60	38	298	16,3
RO	SC BIO ELECTRICA TRANSILVANIA SRL	60	0	305	4,2
	Vilnius Electric Power Plant No 2, Installation				
LT	No 3	60	32	29	0,3
IT	Sper	60	1	262	5,7
HU	Bunge Martfűi Gyára	61	3	309	4,3
FR	FR051.06868A.Part	62	1	430	6,0
SE	STORA ENSO FORS AB Panna 3	63	0	156	8,4
	SICET - Società Italiana Centrali				
IT	ElettroTermiche S.r.l.	63	3	161	5,5
IT	Biomasse Olevano	64	1	92	0,6
SE	Lextorps Värmeverk	65	69	158	4,1
	Metsä Board Oyj, Kaskinen BCTMP mill, bark				
FI	boiler	65	187	444	12,7
FI	Adven Oy, Heinolan voimalaitos - LCP	65	51	316	7,0
SE	Barkpanna	67	190	115	39,4
NL	AVR, Biomassa Energie Centrale (BEC)	68	16	118	0,7
SE	Ångpanna; barkpanna	68	17	231	13,9
	locatie Boeldershoek, Biomassa Elektriciteits				
NL	Centrale (BEC)	70	23	100	1,3
BE	BIOSTOOM Oostende	70	0	190	0,0
SE	Idbäcken	70	2	143	0,8
BE	Industrie du bois Vielsalm	74	45	239	22,9
UK	Cramlington Biomass Plant	75	0	31	0,1
IT	BioPower Sardegna S.r.l. (camino 1)	75	1	216	8,2
IT	BioPower Sardegna S.r.l. (camino 2)	75	3	215	8,6
EE	Fortum Eesti AS, Pärnu koostootmisjaam	76	18	175	2,0
	ENERGA Kogeneracja Sp. z o.o. -				
PL	Elektrociepłownia Elbląg - Plant 2	77	49	226	12,5
LV	Fortum Latvia, Rupniecības iela 73A, No 1	77	196	297	10,2
SE	HVC Granskär	77	42	131	8,3
BE	A & S ENERGIE	80	3	128	0,8
NL	BECC B.V., Ketel BEC	80	10	48	1,7
SE	Ångpanna 3	80	1	135	12,5
IT	SAN MARCO BIOENERGIE	81	0	271	3,0
SE	Ångcentralen	81	2	176	7,9
FI	Stora Enso Oyj, Sunila Mill, Bark Boiler 2	83	55	423	7,2
SE	Norsa värmecentral	84	1	101	4,2
FR	FR051.06614A.Part	86	0	288	3,0
SE	Årsta värmeverk	89	15	202	3,7
SE	Skogås Värmeverk	90	150	206	3,9
SE	KVV Djuped	90	2	64	3,6
FR	FR058.00540A.Part	90	12	581	15,7
	Fortum Power and Heat Oy, Kivenlahti, Boilers				
FI	1+2	90	31	178	1,5
BE	Biowanze_LCP2	91	127	225	2,5
SE	Sulfitlutanpanna 8	93	425	308	90,5
SE	Sulfitlutanpanna 9	93	334	297	64,1

Land	Naam van de installatie	Vermogen MWth	Emissiefactoren in mg/Nm ³ bij 6% O ₂		
			SO ₂	NO _x	Stof
DE	IKW Papier-Herzberg	93	3	179	3,5
SE	Simpan	93	52	166	8,0
PT	Central Termoeléctrica Biomassa Figueira Foz	95	15	233	12,5
DE	IKW Bitterfeld GWRK	95	1	118	8,0
FR	FR061.10901A.Part	95	0	164	0,3
SE	Stallbacka Värmeverk	96	81	243	9,5
IT	Biomasse Crotone	96	28	386	6,9
SE	Kraftvärmeverket	97	69	166	18,2
SE	Moskogens kraftvärmeverk	99	0	104	1,1
SE	Panna 7	100	38	257	14,4
SE	Barkpanna 9	104	2	204	8,7
	STORA ENSO OYJ, ENOCELLIN TEHDAS,				
FI	Boiler	104	12	248	16,3
BE	Cellardennes 70 m	104	52	570	23,2
SE	HP3	105	3	151	0,8
UK	EPR Ely	107	157	220	3,1
DE	HKW Rudow II	107	52	230	1,7
HU	Pannon-Hő 2. sz. biomassza tüzelésű kazán	110	34	143	9,0
SE	Rya VC	110	90	191	9,9
FR	FR065.06939A.Part	111	5	297	2,7
SE	Draken hetvattencentral	113	4	145	1,1
IT	Tampieri Energie	114	16	108	2,7
UK	Biomass Power Plant	116	81	206	2,2
SE	P1	116	1	101	0,4
	Fjernvarme Fyn Produktion A/S, Fynsværket,				
DK	FYV 8	118	11	26	0,4
UK	Brigg Renewable Energy Plant	118	72	187	0,7
SE	KVV	120	5	139	2,0
FI	Metsä Fibre Oy, Kemi Mill, Boiler 10	120	14	262	4,0
	ETELÄ-SAVON ENERGIA OY, PURSIALAN				
FI	VOIMALAITOS - Pursiala II	120	49	349	8,1
SE	BillerudKorsnäs Frövi	120	18	107	8,4
SE	HVC Turbingatan	121	0	74	3,0
SE	Allöverket	122	2	143	3,5
SE	KVVT2	124	3	139	0,4
IT	S.F.I.R. Raffineria di Brindisi	125	3	105	7,7
NL	Eneco Bio Golden Raand C.V., Wervelbedoven	127	26	62	0,3
SE	Björksåtra Kraftvärmeverk	128	0	155	2,1
SE	Igelsta värmeverk	130	163	141	0,1
IT	ENEL PRODUZIONE AA - camino 1	134	1	187	1,6
	Navigator Pulp Setúbal, SA - Caldeira de				
PT	Biomassa (Ex: Portucel Setúbal)	134	29	339	72,9
SE	Angereds panncentral	135	80	248	30,0
DE	BHKW Wittenberg	135	14	196	2,2
SE	Lövängsverket	136	1	151	1,0
UK	Snetterton Biomass Plant	138	45	295	1,8
DE	IKW Münchsmünster	140	0	126	0,9
FR	FR052.08848A.Part	140	3	221	1,4
BG	TPP "St.K Stamboliiski"	145	2	126	3,4
SE	Sundbybergsverket	149	40	166	3,2
SE	Säbyverket	150	40	240	6,3
IT	Biomasse Italia	150	0	146	2,8
UK	Biomass CHP	154	4	114	0,3
FI	Oy Alholmens Kraft Ab, AK1 Bark Boiler	155	0	489	49,2
HU	Pannon Hőerőmű P3 source	158	0	231	11,0
SE	Biobränslepannor	160	14	205	1,1
SE	Vallviks Bruk Sodapanna	170	5	157	34,4
DE	HKW Kassel Mittelfeld	175	79	51	0,4
HU	Bakonyi Bioenergia Erőmű	176	86	168	18,7
PL	ZE PAK S.A. - Elektrownia Konin - Plant 2	179	2	196	10,8

Land	Naam van de installatie	Vermogen MWth	Emissiefactoren in mg/Nm ³ bij 6% O ₂		
			SO ₂	NO _x	Stof
SE	Bomhus Energi	190	0	44	0,2
SE	Värmeverket, VV	195	5	128	4,9
FR	FR052.02000A.Part	197	174	163	326,4
SE	Hedenverket	200	0	53	0,3
SE	Hammarbyverket	200	163	184	1,3
	PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna S.A. - Oddział Zespół Elektrowni Dolna Odra -				
PL	Elektrownia Szczecin	204	13	183	9,7
FR	FR052.01691A.Part	211	3	173	9,8
PL	Mondi Świecie S.A. - Plant 1	233	33	231	8,9
SE	Sodapanna 3	240	2	129	25,5
FR	FR052.00420A.Part	250	9	113	2,5
DK	Verdo Produktion A/S, Randers	258	2	255	4,8
PL	Mondi Świecie S.A. - Plant 3	260	75	195	10,7
SE	LHVC	268	36	178	13,3
SE	Akalla panncentral	270	51	174	5,7
FR	FR068.02548A.Part	276	172	195	55,0
SE	Mottryckskraftverket	276	42	157	4,0
SE	SCA Ortiken	295	31	162	20,4
DK	Dong Energy A/S Herningværket	296	3	290	5,6
SE	BillerudKorsnäs Karlsborg	299	1	136	73,4
SE	Sodapanna 8	301	1	148	75,3
DK	Dong Energy A/S Skærbækværket	320	3	358	2,7
SE	Hässelbyverket KVV	330	29	179	4,6
SE	Skoghalls Bruk Sodapanna	340	4	129	8,1
	HOFOR Energiproduktion A/S Amagerværket,				
DK	Blok 1	347	1	36	0,6
SE	Fittjaverket	352	16	172	12,2
BE	Centrale Elec. Electrabel Awirs t4	368	10	175	5,6
SE	Smurfit Kappa Piteå	370	5	166	131,6
SE	Solnaverket	373	55	146	2,2
SE	Västhagensverket	375	32	144	1,3
SE	BillerudKorsnäs Sweden AB, Skärblacka bruk	418	0	180	19,0
SE	Barkpanna P7	500	1	143	5,3
FR	FR060.00385A.Part	501	6	239	44,0
SE	Östrands massafabrik	555	13	247	38,5
SE	Skutskärs Bruk	595	7	226	121,0
SE	Iggesunds Bruk	595	9	204	9,7
SE	Södra Cell Mönsterås	669	77	1304	171,7
BE	ELECTRABEL CENTRALE RODENHUIZE	745	9	139	7,6
DE	Holzwerk Eberswalde	790	2	271	0,0
DE	IKW Papier-Arneburg Lauge	832	1	195	24,3
DK	Dong Energy A/S Avedøreværket, Hovedkedel	1005	9	125	1,1
	TAURON Wytwarzanie S.A. - Oddział				
PL	Elektrownia Jaworzno III w Jaworznie -				
	Elektrownia II - Plant 2	1120	10	125	2,6