

TEHNOLOGIAD HEITE PIIRVÄÄRTUSTE SAAVUTAMISEKS

Oliver Järvik

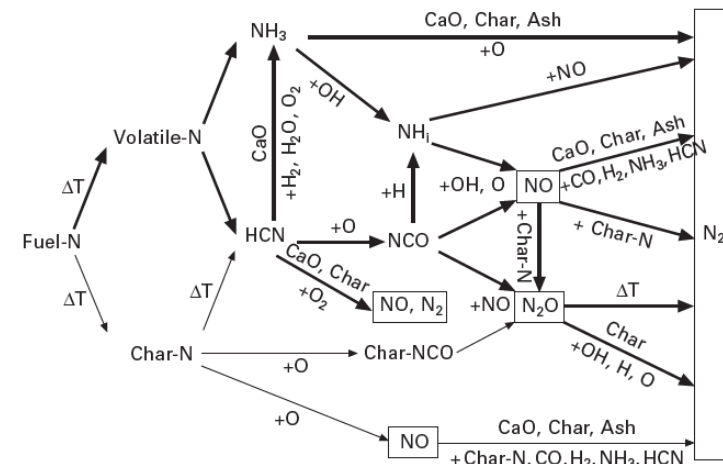
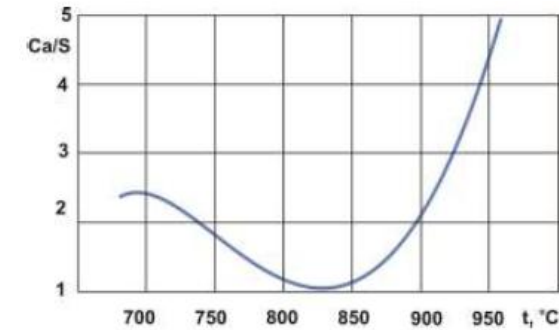
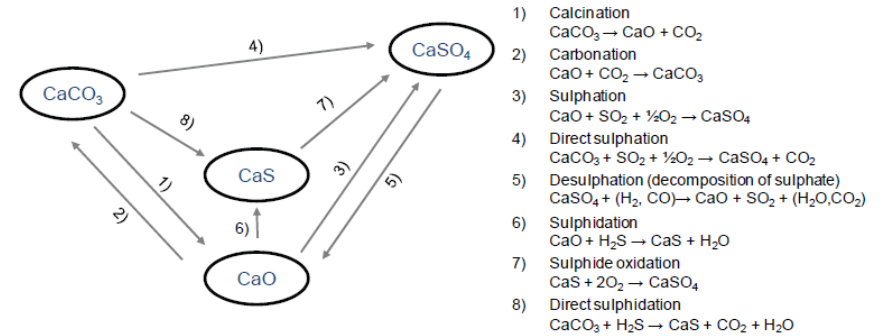
Määrus reguleerib vääveldioksiidi, lämmastikoksiidide ja osakeste emissioon

- Miks?:
 - „...saasteainete heidet õhku on möödunud kümnendite jooksul märkimisväärselt vähendatud, kuid samal ajal õhusaaste tase ikka veel probleemne mitmel pool Euroopas ning ELi elanikud puutuvad endiselt kokku õhusaasteainetega, mis võivad kahjustada nende tervist ja heaolu.“;
 - „Teadushinnangud näitavad, et ELi elanike eluiga väheneb õhusaaste tõttu keskmiselt kaheksa kuud.“;
 - „Keskmise võimsusega põletusseadmetes kütuse **põletamisel tekkiv saasteainete** heite **osatähtsus õhusaastes suureneb**, eelkõige **seetõttu, et** ajendatuna kliima- ja energiapoliitikast **kasutatakse kütusena üha rohkem biomassi.**“

SO₂ ja NO_x tegelik kontsentratsioon





- Põlemisgaasides SO₂ pärineb 100% kütusest
- NO_x tekib:
 - Valdavalt kütuses oleva lämmastiku oksüdeerimisel (suurem osa enamasti NO).
 - Kõrgetel temperatuuridel (>1300 °C) ja hapniku liias tekib NO õhulämmastiku ja hapniku oksüdeerimisel.
- Tahkete kütuste põlemisel tekib tihti aluseline tuhk
 - Tuhk seob väävlit
- Lämmastiku oksüdeerumine on keeruline keemiliste reaktsioonide jada ning sõltub:

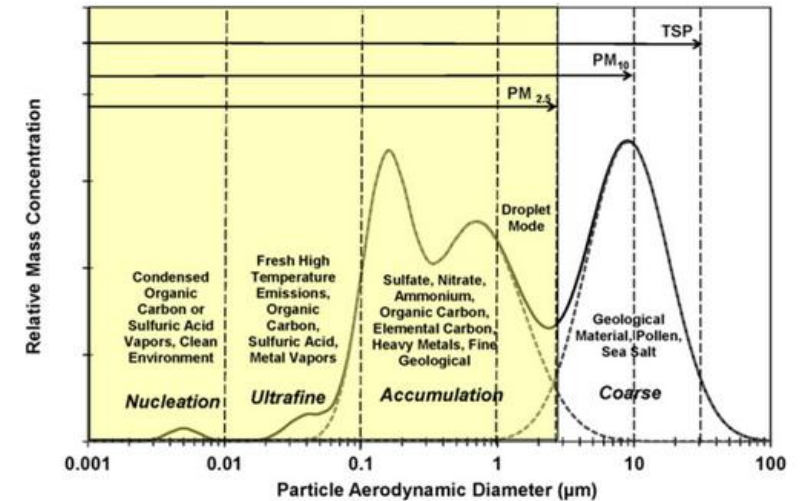
• Kütuse N-sisaldusest	• Temperatuurist
• Õhu/kütuse vahekorrast	• Seotud süsiniku ja lendosa vahekorrast
• Õhu jaotusest	• Katla koormusest
• Põletamise tehnoloogiast	



Osakeste teke

- Peamised koostisosad: sulfaadid, nitraadid, süsinik, mineraalid, kloriidid
- Põletusseadmest tulevad primaarsed osakesed:
 - PMsum
 - PM10
 - PM2,5
 - Süsinik ehk *carbon black* (PM0,1)
- Välisõhus mõõdetud tahked osakesed on kombinatsioon:
 - primaarsetest aerosoolidest ja
 - sekundaarsetest aerosoolidest

Aerosols from	Flaming Combustion			Pyrolysis
	high temperature and lack of O ₂ in the flame	- Mix -	T and O ₂ good	low temperature due to pyrolysis conditions or very high excess air
View				
PM	Soot	Salts + Soot	Salts	COC
Composition	EC / BC chemical / optical C/H > 6...8	↔	CC + Minerals carbonate C + inorg. M	OC = TC-EC-CC C/H < 2
Colour	black	grey	white	brown none
Health effect	toxicity carcinogenity inflammatory	↔	low toxicity low carcinogenity inflammatory	high toxicity high carcinogenity inflammatory



Emissioone mõjutavad

PM

Primaarsed tegurid:

- Katla ehitus ja opereerimistingimused
- Kütus ja selle kvaliteet

Sekundaarsed tegurid:

- Puhastusseadmed

NO_x

Primaarsed tegurid:

- Katla ehitus ja opereerimistingimused
- Kütus ja selle kvaliteet

Sekundaarsed tegurid:

- Puhastusseadmed

SO₂

Primaarsed tegurid:

- Opereerimistingimused
- Kütuse koostis

Sekundaarsed tegurid:

- Puhastusseadmed

Biomassi põletamisel on olulisimad PM ja NO_x (teatud juhtudel ka SO₂) emissioon, põlevkiviõli puhul NO_x ja SO₂ emissioon, gaasikatla puhul NO_x emissioon

Primaarsed meetmed: katla ehitus

- Tahke kütuse põletamisel (3T):
 - Aeg (*time*)
 - Turbulents (*turbulence*)
 - Temperatuur (*temperature*)
- Maagaasi põletamisel:
 - Temperatuur – põlemisgaaside retsirkulatsioon
 - kõrge temperatuur suurendab NO_x heitmeid

Hakkpuidu põletamise tehnoloogiate võrdlus

	Keevkihtpõletus	Restkolle
PM koormus	KÕRGE	KESKMINE
Põlemisgaaside omadused	KONSTANTSED	MUUTUVAD
PM omadused	PÜSIVAD	MUUTUVAD
Katla võimsus	Tavaliselt >30 MW	Tavaliselt <50 MW

Primaarsed tegurid: opereerimistingimused

- CO, NO_x ja PM:
 - Primaar- ja sekundaarõhu jagamine ja suhe (*air staging*) – rusikareegel 1/3 + 2/3. Primaarõhk < stöhhiomeetriline õhu kogus.
 - Liigne sekundaarõhk suurendab PM heitkoguseid
 - Vähe põlemisõhku – mittetäielik põlemine
 - Madal temperatuur – mittetäielik põlemine
- CO vs NO_x – oluline aspekt MCP direktiivi rakendamisel. NO_x heitmeid on võimalik vähendada, vähendades liigõhku. Sellega kaasneb aga mittetäielik põlemine ja CO teke.
- Primaarsete meetoditega (opereerimistingimused) on emissioonide oluline vähendamine keeruline
 - võimalik keskmise suurusega ja suurte põletusseadmete korral: optimaalne põlemiskambri disain, temperatuur
 - Esmatähtis on opereerimistingimustega tagada optimaalne põlemisrežiim – üldiselt paremini tagatud (mitte alati!) modernsete automaatkontrolliga katelde korral
 - Katla seisukord – avad peavad olema seal, kus nad projekti järgi olid!

Primaarsed tegurid: kütuse mõju

Eestis kasutatakse palju hakkpuitu, kohati ka turvast.

Kütuse tüüp:

- **Puit:** puidupelleti korral PM ja NO_x emissioonid tavaliselt madalamad kui hakkpuidu või halupuu põletamisel. Hakkpuidu kasutamisel ei ole üldiselt probleeme SO₂ ja NO_x heitmetega, küll aga PM-ga.
- **Õli:** õli põletamisel probleemiks sõltuvalt õli koostisest kas SO₂ ja/või NO_x.
- **Gaas:** gaasi korral tihti probleemiks termiline NO_x.

Kvaliteet (biomass):

- **Niiskussisaldus** – sõltuvalt väärtusest, võib mõjutada katla ja puhastusseadmete tööd. Väiksema võimsusega katlad on tundlikumad. Liiga kõrge niiskus takistab täielikku põlemist: kõrge PM, lisaks CO, tõrvad ja PAH-d.
- **Lisandid** (nt P, S, Na, K, Si) – võivad tõsta PM kontsentratsiooni. Otsene mõju ka küttepindade saastumisele, mis hakkab mõjutama emissioone.
- Peenfraktsiooni sisaldus



Primaarsed tegurid: kütuse mõju

Kütuse (kuivaine) koostis (mass%)

Puit



- Süsinik 49...51
- Vesinik 5,9...6,2
- Lämmastik 0,1...0,2
- Väävel <0,05

Turvas



- Süsinik 50...55
- Vesinik ~6
- Lämmastik 1...2
- Väävel 0,1...0,5

Kütteõli



- Väävel ~0,7%

Koostis piirväärtuses püsimiseks

N sisaldus kütuses, et ei ületataks piirnormi

- Vedelkütus 3 % O₂
 - ~0,11 mass %; uued katlad (300 mg/Nm³)
 - ~0,23 mass %; olemasolevad katlad (650 mg/Nm³)
- Tahke kütus 6 %O₂
 - ~0,13 mass %; uued katlad (300 mg/Nm³)
 - ~0,29 mass %; olemasolevad katlad (650 mg/Nm³)

S sisaldus kütuses, et ei ületataks piirnormi

- Vedelkütus 3 % O₂
 - ~0,11 mass %; uued ja olemasolevad katlad (350 mg/Nm³)
- Tahke kütus 6 %O₂
 - ~0,075 mass %; uued ja olemasolevad katlad (200 mg/Nm³)

NB! Tegelikud SO₂ ja NO_x kontsentratsioonid madalamad arvutuslikest

Sekundaarsed meetmed: puhastusseadmed

- Valik sõltub sellest, mida on vaja suitsugaasidest „eraldada“
 - Nt SO₂ – suitsugaaside pesur, absorber ...
 - NO_x – SNCR, SCR, suitsugaaside retsirkulatsioon ...
 - PM – vähendamine võib põhineda kolmel jõul:
 - Gravitatsiooni- või inertsijõud – tsüklonid, skruberid
 - Pinna või adhesioonijõud – kottfiltrid
 - Elektri jõud – elektrifiltrid
- Puhastusefektiivsust mõjutavad:
 - Puhastusseadmete tüüp
 - Puhastusseadme ehitus

PM kontsentratsiooni vähendamine

- Olemas palju erinevaid püüdeseadmeid.
- Erinevad püüdeseadmed on erineva efektiivsusega
- Lihtsamad/odavamad püüdeseadmed on efektiivsed suuremate osakeste püüdmisel (>PM10)

LCP-de korral:

BAT 26. In order to reduce dust and particulate-bound metal emissions to air from the combustion of solid biomass and/or peat, BAT is to use one or a combination of the techniques given below.

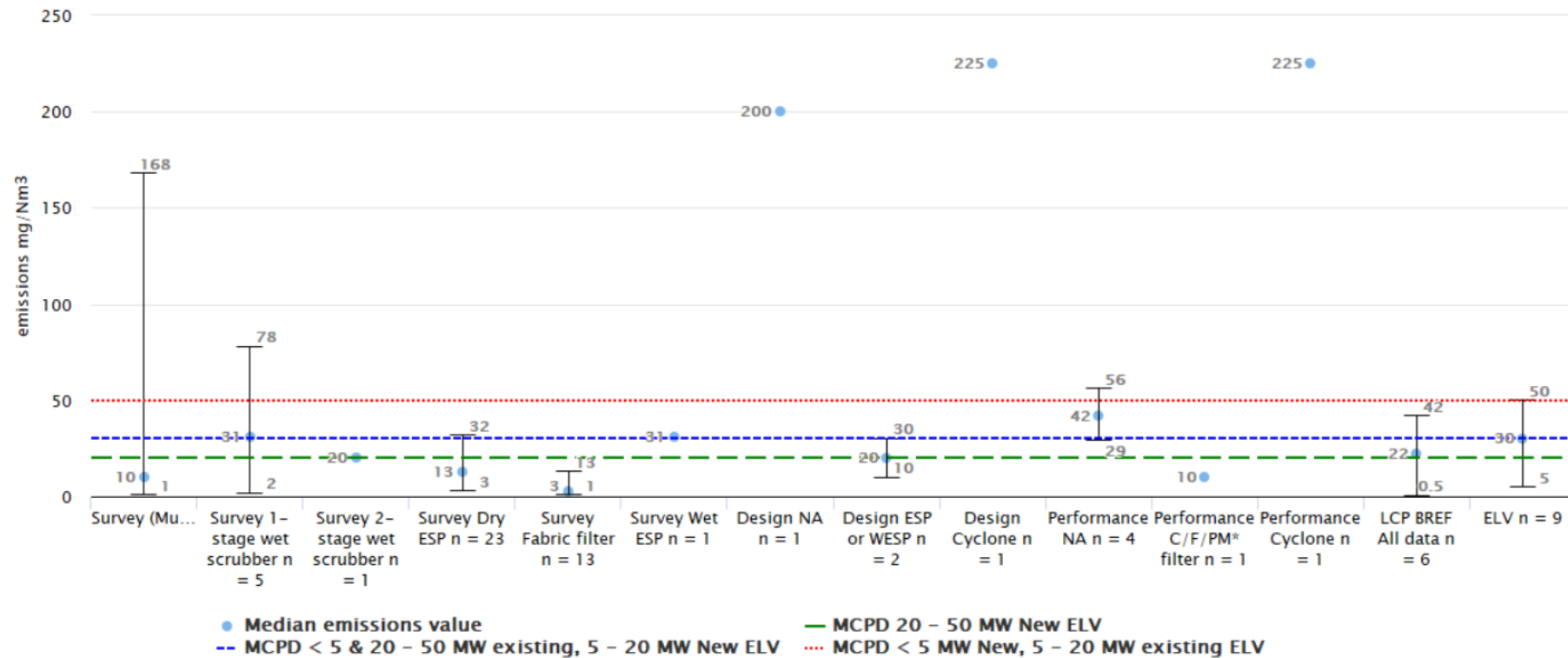
Technique		Description	Applicability
a.	Electrostatic precipitator (ESP)	See description in Section 8.5	Generally applicable
b.	Bag filter		
c.	Dry or semi-dry FGD system	See descriptions in Section 8.5 The techniques are mainly used for SO _x , HCl and/or HF control	
d.	Wet flue-gas desulphurisation (wet FGD)		
e.	Fuel choice	See description in Section 8.5	Applicable within the constraints associated with the availability of different types of fuel, which may be impacted by the energy policy of the Member State

Püüdesead	Saavutatav PM kontsentratsioon, mg/Nm ³	Minimaalne osakese suurus, µm	Efektiivsus, %	Vajalik suhteline ruum/pindala
Multitsüklon	100 kuni 300	5	65	Väike
Elektrifilter	20 - 30	2	>98	Suur
Kottfilter	<20	0,2-1*	99	Suur
Multitsüklon + pesur / kondensaator	40 - 100	0,5-10*	>95	Keskmine

PM kontsentratsiooni vähendamine

- Teoreetiliselt piirväärtus 20...50 mg/Nm³ lihtsalt saavutatav sekundaarsete meetmetega:
 - ESP + pesur/kondensaator
 - Kottfilter

Figure 3-46 Comparison of median, minimum and maximum values of various sources for dust emissions from solid biomass boilers



PM kontsentratsiooni vähendamine. Täiendavad aspektid

- Kas täiendusteks on ruumi?
- Kas täiendusteks on raha?
 - Investeeringut mõjutab kottfiltril puhul suitsugaasi vooluhulk (põlemisgaasi mahtkulu ja filtri pinna). ESP puhul aga efektiivsus, osakeste koostis
 - Kõige ökonoomsem olukord nõuab erinevate juhtumite puhul eraldi arvestust
- Millised on opereerimiskulud?
 - Üldiselt on kottfiltril puhul suurem rõhulang kui ESP-del ja need tarbivad puhastamiseks suruõhku, samas kui ESP-d tarbivad elektrit (elektriväli).
- Kottfilter on vajalik kui on vajadus lisaks PM-le eemaldada täiendavaid saasteained (nt PCDD-d ja PCDF-d, raskmetallid)
- Kottfilter võimaldab püüda ka gaasilisi saasteaineid
- Kasutatavad tavaliselt temperatuuride vahemikus kuni 250 °C. Spetsiaalsete materjalid korral võimalik kasutada ka kõrgema temperatuuri juures.

NO_x vähendamine: SNCR ja SCR

- Kui kvaliteetse puiduga töötava kaasaegse katla puhul ületatakse tavaopereerimistingimustel NO_x kontsentratsiooni on nn primaarsete meetmetega selle normidega vastavusse viimine keeruline. Sh nt temperatuuri alandamine võib tuua kaasa vastuolu eesmärgiga tagada võimalikult madal CO heitkogus.
- Sekundaarsed meetmed:
 - Selektiivne mittekatalüütiline taandamine (SNCR)
 - Selektiivne katalüütiline taandamine (SCR)
 - Mõlema meetme/protsessi puhul kasutatakse reagentina ammoniaaki (või ureat, mis laguneb ammoniaagiks) ja rakendatav üldine kemism on nii SNCR-i kui ka SCR-i puhul analoogne:

Ammoniaak	Urea
$2NO + 2NH_3 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow 2N_2 + 3H_2O$	$2NO + CO(NH_2)_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow 2N_2 + CO_2 + 2H_2O$
$2NO_2 + 4NH_3 + O_2 \rightarrow 3N_2 + 6H_2O$	$2NO_2 + 2CO(NH_2)_2 + O_2 \rightarrow 3N_2 + 2CO_2 + 4H_2O$

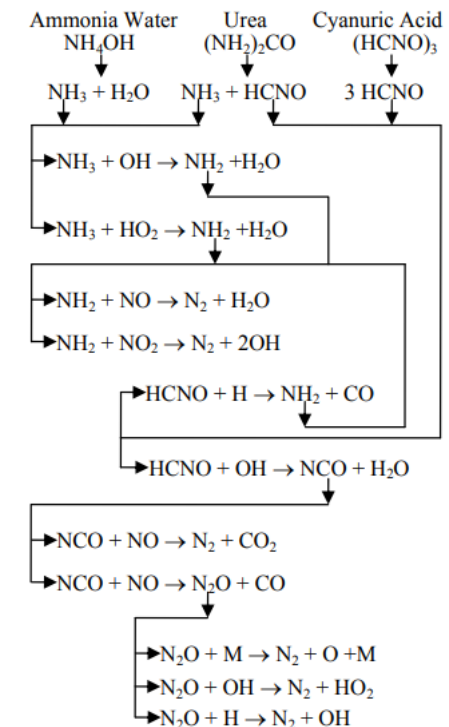
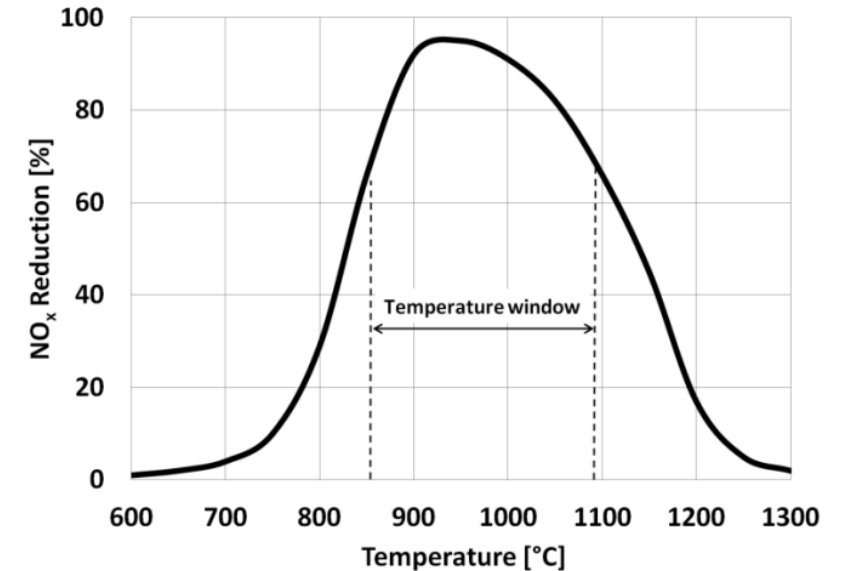
LCP-de korral:

BAT 24. In order to prevent or reduce NO_x emissions to air while limiting CO and N₂O emissions to air from the combustion of solid biomass and/or peat, BAT is to use one or a combination of the techniques given below.

Technique		Description	Applicability
a.	Combustion optimisation	See descriptions in Section 8.3	Generally applicable
b.	Low-NO _x burners (LNB)		
c.	Air staging		
d.	Fuel staging		
e.	Flue-gas recirculation		
f.	Selective non-catalytic reduction (SNCR)	See description in Section 8.3. Can be applied with 'slip' SCR	Not applicable to combustion plants operated < 500 h/yr with highly variable boiler loads. The applicability may be limited in the case of combustion plants operated between 500 h/yr and 1 500 h/yr with highly variable boiler loads.
			For existing combustion plants, applicable within the constraints associated with the required temperature window and residence time for the injected reactants
g.	Selective catalytic reduction (SCR)	See description in Section 8.3. The use of high-alkali fuels (e.g. straw) may require the SCR to be installed downstream of the dust abatement system	Not applicable to combustion plants operated < 500 h/yr. There may be economic restrictions for retrofitting existing combustion plants of < 300 MW _{th} . Not generally applicable to existing combustion plants of < 100 MW _{th} .

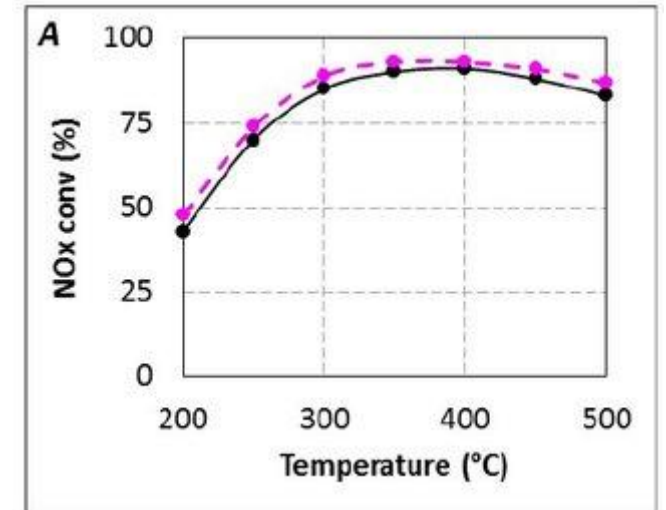
NO_x vähendamine: SNCR

- Taandamise reaktsioonide kõrvalprodukt on nt N₂O (eriti urea kasutamisel, kuni 30%)
 - Sõltub aga tingimustest (reagendi kulust ja temperatuurist)
 - Võimalik vähendada lisanditega
- Kumba reagenti valida?
 - Ammoniaak on ohtlik kemikaal
 - Urea on kallim, vähemtoksiline ja -lenduv
 - Ammoniaagilahuse pihustamisel ammoniaak hetkaurustub, mis raskendab tema ühtlast jaotamist üle terve ruumi
- Mida arvestada?
 - Tingimused – $r_{NO_x} = f(T, C_{NO_x}, C_{reagent})$; optimaalne temperatuur 950-1000°C, st tuleb leida optimaalne punkt reagendi sissepritseks, mis tagaks piisava viibimisaja ja segunemise.
 - Reagendi konversioon – ammoniaagi „slip“ – reagendi koguse suurendamisel kasvab ammoniaagi kontsentratsioon põlemisgaasis.
 - Katla efektiivsuse vähenemine, elektrienergia kulu kasv
- Efektiivsus 30-50%



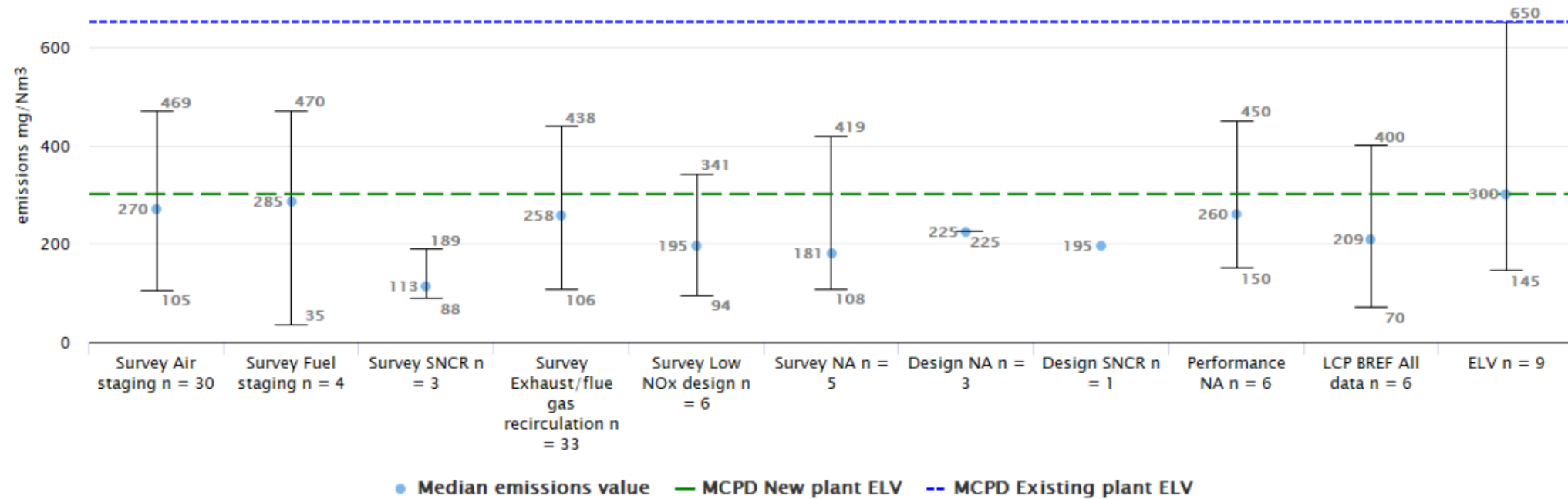
NO_x vähendamine: SCR

- Võrreldes SNCR-ga
 - Võimaldab saavutada suurema NO_x eemaldamise efektiivsuse
 - Võimaldab taandamist läbi viia oluliselt madalamal temperatuuril
 - Reagendiks ainult ammoniaak (mitte urea), kuid seda võib saada urea hüdrolüüsil
 - Vajalik katalüsaator – tänapäeval TiO₂, SiO₂, V₂O₅ jt ning nende segud. Katalüsaator talub tavalisel temperatuuri fluktuatsioonil ±100 °C
 - Tundlik leelis- ja leelismuldmetallidele
 - Oluliselt kallim (jämedalt 2x)
 - Väiksem N₂O teke
 - Suurem rõhukadu, suurem energiakulu
- Efektiivsus 70-90%



NO_x püüdeseadmed

Figure 3-45 Comparison of median, minimum and maximum values of various sources for NO_x emissions from solid biomass boilers.



Andmed Ricardo Energy & Environment aruandest Euroopa Komisjonile

SO₂ vähendamine

- Puidupõhise biomassi korral ei ole probleem
- Mittetraditsiooniliste (nt rohtsete) biokütuste põletamisel ilmselt vaja SO₂ vähendamiseks (piirväärtus 300 mg/Nm³, 6% O₂) kasutada nn sekundaarseid meetmeid
- Põlevkiviõli põletamisel vajalik
- SO₂ püüdmise seadmed (deSO_x) üldiselt kasutusel suurte põletusseadmete korral

LCP-de korral:

BAT 25. In order to prevent or reduce SO_x, HCl and HF emissions to air from the combustion of solid biomass and/or peat, BAT is to use one or a combination of the techniques given below.

Technique		Description	Applicability
a.	Boiler sorbent injection (in-furnace or in-bed)	See descriptions in Section 8.4	Generally applicable
b.	Duct sorbent injection (DSI)		
c.	Spray dry absorber (SDA)		
d.	Circulating fluidised bed (CFB) dry scrubber		
e.	Wet scrubbing		
f.	Flue-gas condenser		
g.	Wet flue-gas desulphurisation (wet FGD)		Not applicable to combustion plants operated < 500 h/yr. There may be technical and economic restrictions for retrofitting existing combustion plants operated between 500 h/yr and 1 500 h/yr
h.	Fuel choice		Applicable within the constraints associated with the availability of different types of fuel, which may be impacted by the energy policy of the Member State

DECISIONS COMMISSION IMPLEMENTING DECISION (EU) 2021/2326 of 30 November 2021 establishing best available techniques (BAT) conclusions, under Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council, for large combustion plants

SO₂ vähendamine

- Võimalikud (peamised) meetmed:
 - Kuiv sorbent:
 - Sorbendi lisamine põlemisprotsessi SO₂ sidumiseks – rakendatav keevkihtpõletuse või tolmpõletuse korral.
 - Sorbendi (NaHCO₃ või CaO) lisamine gaasikäiku – kõige lihtsamini rakendatav, kuid efektiivsus kõige madalam. Eeldab osakeste efektiivset püüdmist.
 - Poolkuiv sorbent
 - Leeliselise reagenti (tavaliselt CaO) suspensioon dispergeeritakse (pihustades) põlemisgaasi voos. Eeldab osakeste efektiivset püüdmist.
 - Märg absorbent:
 - Märja lubja protsess – CaCO₃ või lubja pulbi kasutamine skruberis - ja skruberid (pihustus- või täidiskolonn või Venturi skruber või mulliv reaktor)
 - Mõni teine sobiv absorbent (vesi või vesilahus)
 - Põlemisgaaside kondensaator

deSOx süsteemide parameetrid

- deSOx süsteeme on maailmas praktikas rakendatud >5 MW põletusseadmetele
- Temperatuurid:
 - Märgskraberite puhul on tüüpiline siseneva gaasi temperatuur 150 °C kuni 370 °C
 - Kuiva lubja protsessis puhul peab kontaktseadmest väljuvate suitsugaaside temperatuur olema 10°C kuni 15°C kõrgem adiabaatilisest küllastustemperatuurist.
 - Sorbendi lisamisel gaasikäiku või põlemisprotsessi varieeruvad optimaalsed temperatuurid sõltuvalt sorbendi omadustest vahemikus 150 °C kuni 1000 °C.
- Efektiivsused:
 - Märg protsess 90 - 99%
 - Poolkuiv protsess kuni 85 - 95%
 - Kuiv protsess 50 - 70%
 - Kondensaator 60 - 80%

Kui palju maksab?

Andmed Ricardo Energy & Environment aruandest Euroopa Komisjonile

Table 4-2 Summary of cost data provided in the questionnaires (survey)

Technology	Sample size	OPEX data		Sample size	CAPEX data	
		Average (EUR/MW)	Std dev (EUR/MW)		Average (EUR/MW)	Std dev (EUR/MW)
NOx						
Flue gas recirculation	3	180	99	3	1,198	1,402
Low NOx burner	0	-	-	7	10,364	11,424
SNCR	3	2,653	1,178	2	20,090	351
SCR	8	1,317	492	8	20,032	29,540
Other	3	168	43	3	10,273	11,424
SOx						
Wet scrubber	2	9,335	10,369	3	68,714	45,864
Dust						
Multicyclone	2	514	601	3	4,399	4,986
Bag Filter	6	763	653	8	19,658	8,561
Dry ESP	2	3,194	1,375	4	27,223	33,997

Figure 4-3 Cost for NOx emission reduction in survey and literature

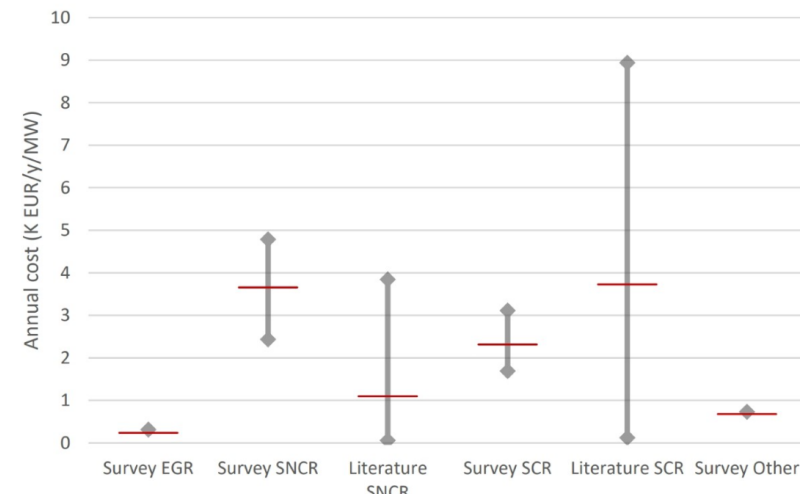
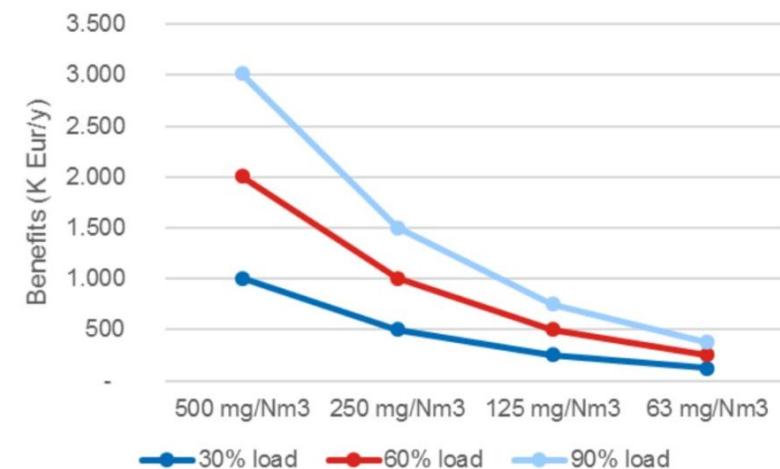


Figure 4-6 Benefits decrease with plant loads and/or emission values



Kokkuvõte

- Uued probleemid?
 - Võimalik sekundaarsete emissioonide teke
 - Võimalik täiendavate jäätmevoogude teke ja/või voogude mahtude kasv
- Majanduslikud tagajärjed?
 - Olulised kapitalikulud
 - Olulised opereerimiskulud (elekter, kemikaalid, täiendavad jäätmevood)