

Metanemissioner fra biogasmotorer i Danmark

Kunderapport

Kolofon

Titel: Metanemissioner fra biogasmotorer i Danmark
Rapportkategori: Kunderapport
Forfatter: Per G. Kristensen
QA: Torben Kvist
Dato for udgivelse: 21.12.2023
Copyright: Dansk Gasteknisk Center a/s
Sagsnummer: D-0135
Sagsnavn: Analyse emissioner biogasmotorer
Emneord: Biogas, emissioner, metankrav
Arkivering: GO/EMNESAG/Dokument1

Indholdsfortegnelse

1.	Indledning	1
2.	Resume og konklusion	2
3.	Indledning, baggrund og rammer for opgaven	3
4.	Biogasforbrænding og emissioner	4
4.1.	Biogaskvalitet	4
4.2.	Biogas forbrænding	4
5.	Emissionsdata for eksisterende biogasmotorer	8
5.1.	Metaemission for eksisterende driftstilstand	8
5.2.	Metanemission analyseret på tværs af biogasmotorerne	9
5.3.	NO _x og metanemission	12
5.4.	Støkiometriens indflydelse på metanemissionen	16
5.5.	NO _x emission i forhold til kravene	18
6.	Mulighed for anvendelse af primære reduktionsforanstaltninger	20
6.1.	Øvrige forhold til driften	22
6.2.	Vurdering af mulighederne med primære tiltag	23
7.	Sekundære metoder til reduktion af NO _x	25
7.1.	Kort procesbeskrivelse af SCR-processen	25
7.2.	Økonomi for SCR anlæg	25
8.	Sekundære metoder til reduktion af metan	27
9.	Referencer	28

1. Indledning

Dansk Gasteknisk Center har for Energistyrelsen og Miljøstyrelsen analyseret emissionerne af metan fra biogasmotorer i Danmark. Opgaven er gennemført for at klarlægge mulighederne for at biogasmotorerne kan overholde et politisk ønske om ikke at have mere end 1 % af det indfyrede metan som emission i røggassen.

Arbejdet er gennemført i andet halvår 2023.

2. Resume og konklusion

Metantabet fra de danske biogasmotorer ligger på et energivægtet gennemsnit på 1,85 % gennem årene 2019 til 2021. Dette svarer til en reduktion på 0,3 % point fra 2007, men ligger en del over den politiske målsætning om et maksimalt tab af metan på 1 % af den indfyrede mængde. Kun ca. 5 % af de opstillede biogasmotorer i Danmark kan honorere kravet om maksimalt 1 % metantab. Der er ingen tydelig forskel på performance, hvad angår parametre som størrelse, motormærke og typer, og der er kun en svag afhængighed af motorens installationsår.

Der er gennemført forsøg med primære metoder til reduktion af metanemissionen på tre biogasmotoranlæg. Ved at justere motorindstillingen, hvad angår støkiometri og tændvinkel, er det muligt at reducere metanemissionen, men det sker dog på bekostning af øget produktion af NO_x.

Når der tages hensyn til det reguleringsrum for NO_x, maskinerne har i deres aktuelle driftspunkter, vurderes det realistisk, at der i gennemsnit vil kunne opnås en metanreduktion ved ændret indregulering, som samlet set vil bringe 10 % af maskinerne inden for kravet om et maksimalt metantab på 1 % af indfyret mængde.

Fjernes begrænsningen fra miljøreguleringens krav for NO_x-emissionen, så NO_x'en fra motoren tillades at stige udover emissionskravet, vurderes det, at et sted mellem 20 og 50 % af maskinerne kan bringes til at overholde et krav om maksimalt metantab på 1 %. Dette vil så kræve NO_x-reduktion efterfølgende for at overholde kravene til endelig NO_x-emission fra anlægget.

Der vil således fortsat være en restgruppe på mellem 50-80 % af maskinerne, der ikke med primære tiltag kan bringes ned under 1 % i metantab.

Der er fra leverandører af NO_x-reduktionsudstyr indhentet informationer og priser for installation og drift af NO_x-reduktion på danske biogasmotorer.

Endelig er der foretaget en screening af mulighederne for at anvende rensningsteknologier til direkte reduktion af metanemissionen. Konklusionen er, at muligheder eksisterer, men det er store og dermed investeringstunge anlæg.

Der er på ønske fra Energistyrelsen og Miljøstyrelsen tilføjet et støtteværktøj til regelfastsættelsen, så konsekvenserne af en fastsat grænseværdi kan vurderes i forhold til hvor mange maskiner, der kan overholde kravet. Dette er vedlagt som bilag.

3. Indledning, baggrund og rammer for opgaven

Politisk er der et ønske om at mindske emissionen af metan fra den voksende biogasproduktion. I den anledning har Energistyrelsen udarbejdet regler for biogasproducenternes arbejde for reduktion af emissionen fra produktionsanlæg og opgraderingsenheder /1/. I samme anledning er der et ønske om at begrænse emissionen af metan fra de biogasmotorer, der optræder på biogasanlæg, hvor biogassen anvendes direkte til produktion af el og varme.

Energistyrelsen og Miljøstyrelsen har derfor bedt Dansk Gasteknisk Center a/s (DGC) analysere, hvilke metanemissioner de danske biogasmotoranlæg har, dels i forhold til den eksisterende miljølovgivning dels i forhold til gældende krav til NO_x-emissionen. Da miljølovgivningen er i en overgangsfase, er der en række forskellige krav til motorerne alt efter deres installationstidspunkt og deres størrelse. Bekendtgørelserne /2-3/ stiller i dag ikke krav til emission af metan, der alene har været at betragte som en klimagas, og derfor er reguleret via afgiftsbestemmelser /4/, hvor SKAT opkræver afgift for biogasforbrug i gasmotorer svarende til en standardemission på 323 g metan/GJ indfyret biogas, og anlægsejerne kan derefter søge refusion, hvis de kan dokumentere lavere emissioner.

Gasmotorer er underlagt NO_x emissionskrav i /2-3/. Kravene er styrende for indreguleringen af motorerne, der generelt i dag optimeres i forhold til højest mulig elvirkningsgrad under samtidig overholdelse af NO_x kravet. Det er velkendt, at der på den enkelte motor er et trade-off imellem lavere NO_x og lavere metanemission.

Opgaven skal således søge at afklare følgende forhold for biogasmotoranlæggene:

- Hvilken metanemission vurderes opnåelig for biogasmotoranlæg under samtidig overholdelse af NO_x-kravene i /2-3/.
- Fastlægge emissionsfaktorer for metan fra biogasmotoranlæg dels i g metan/MJ indfyret dels opgjort som % af indfyret metan.
- Beregne emissionsgrænseværdier i mg C/m³_n tør røggas ved 15 % O₂ som modsvarer bestemte procentvise tab af indfyret metan.
- Vurdere hvilken NO_x-emission der opnås, såfremt motorerne kan indreguleres til overholdelse af kravet om maksimalt tab af metan på 1 %.
- Vurdere hvilke primære og sekundære emissionsreduktionsforanstaltninger for NO_x der er nødvendige for overholdelse af såvel gældende NO_x-krav og nyt krav om tab af maksimalt 1 % af indfyret metan.
- Vurdering af kapitalomkostninger og årlige driftsomkostninger til ovenstående NO_x-reduktion.
- Give en kort vurdering af mulige sekundære metoder til reduktion af metanemissionen.

Opgaven løses med udgangspunkt i DGC's viden om emissionsforholdene for de danske biogasanlæg og ved en dialog med motorleverandørerne omkring mulighederne og rammerne for indregulering af anlæggene og dialog med leverandører af sekundære emissionsreduktionsudstyr.

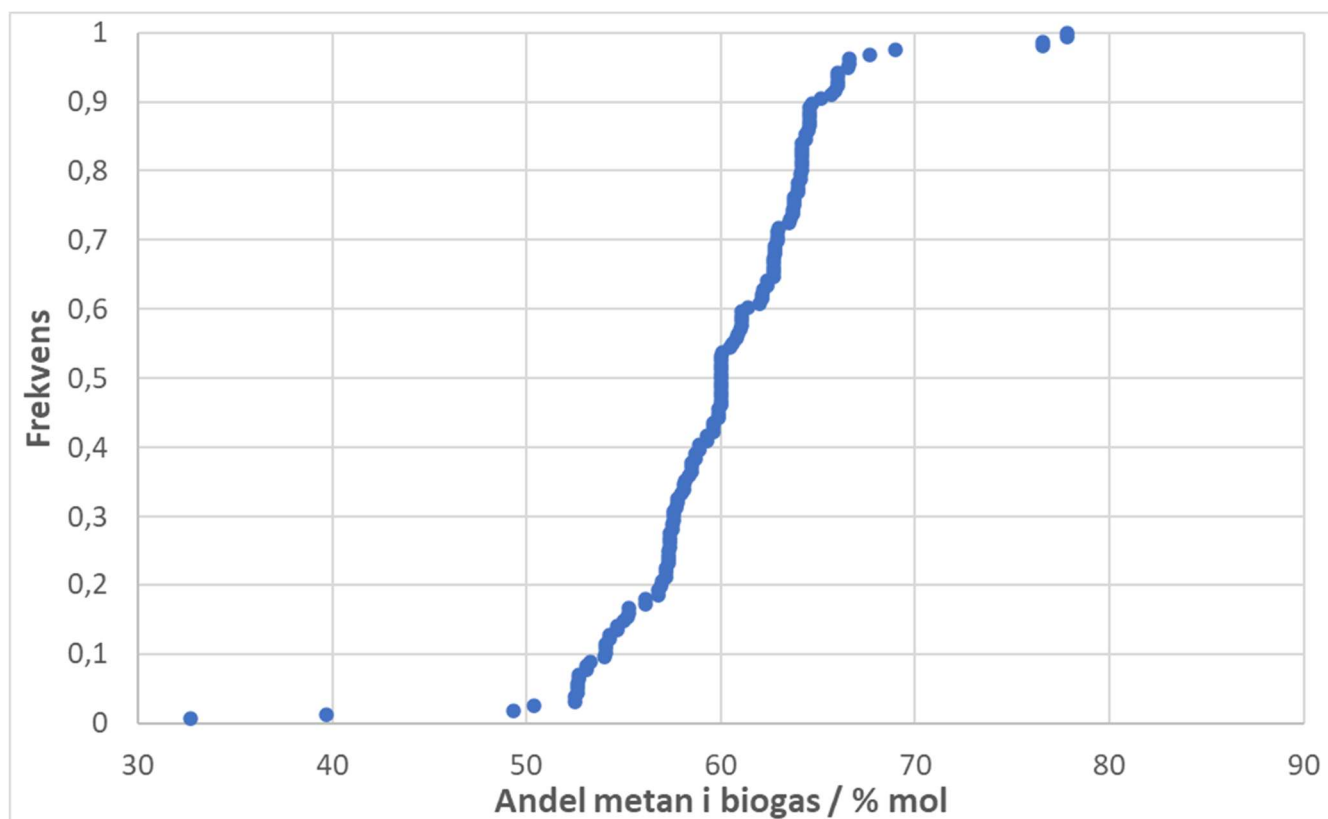
Opgaven tager udgangspunkt i det typiske variationsområde for dansk biogas.

4. Biogasforbrænding og emissioner

4.1. Biogaskvalitet

Dansk biogas har på tør basis typisk et indhold af metan mellem 52 og 66 %, og hovedparten af resten er CO₂ eventuelt med en mindre del iblandet luft. En undtagelse herfra er såkaldt deponigas, som udvindes fra gamle affaldsdeponier, her er der tale om et lavere metanindhold i gassen, typisk 30-40 %. De øvrige komponenter i biogassen består normalt af CO₂ og nitrogen/ilt. Deponigas er ikke omfattet af den planlagte regulering af metantab for biogasanlæg.

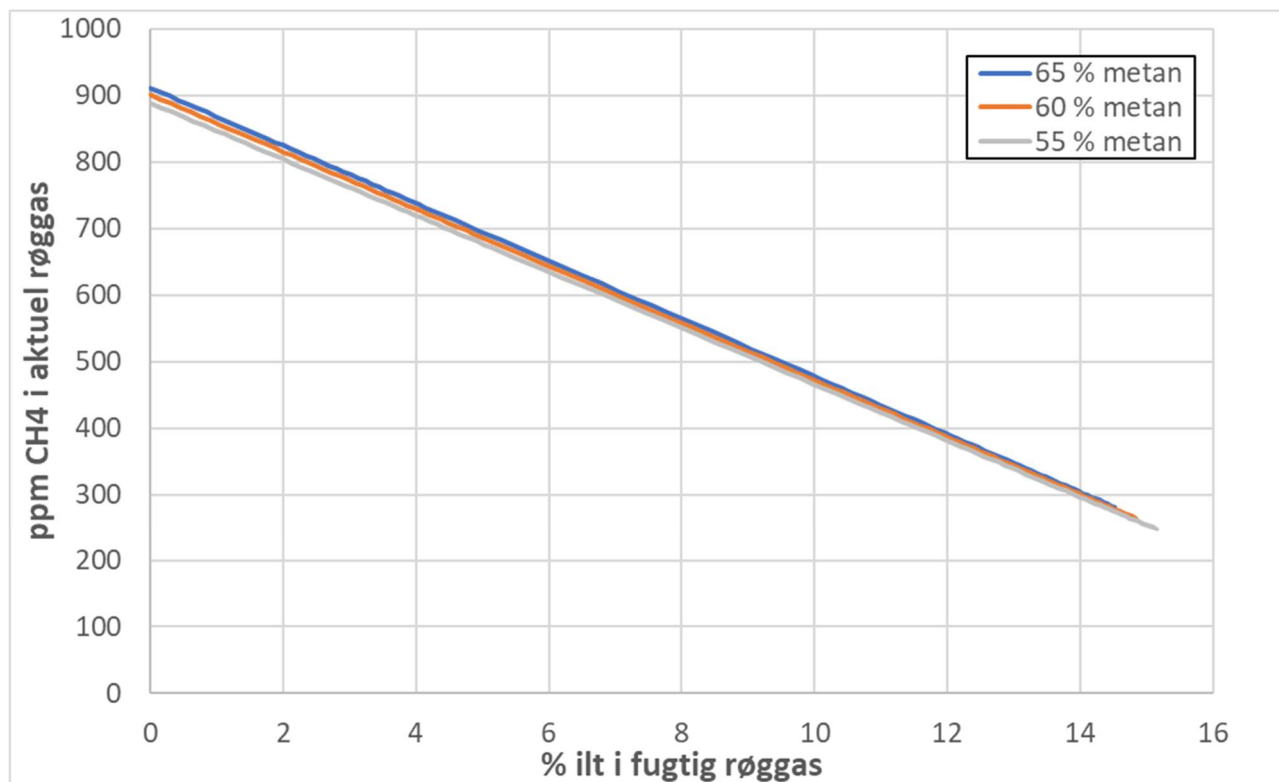
Figur 1 viser en samling af biogasdata fra 156 målinger, som DGC har med sammenhørende emissionsdata for gasmotorer på biogas.



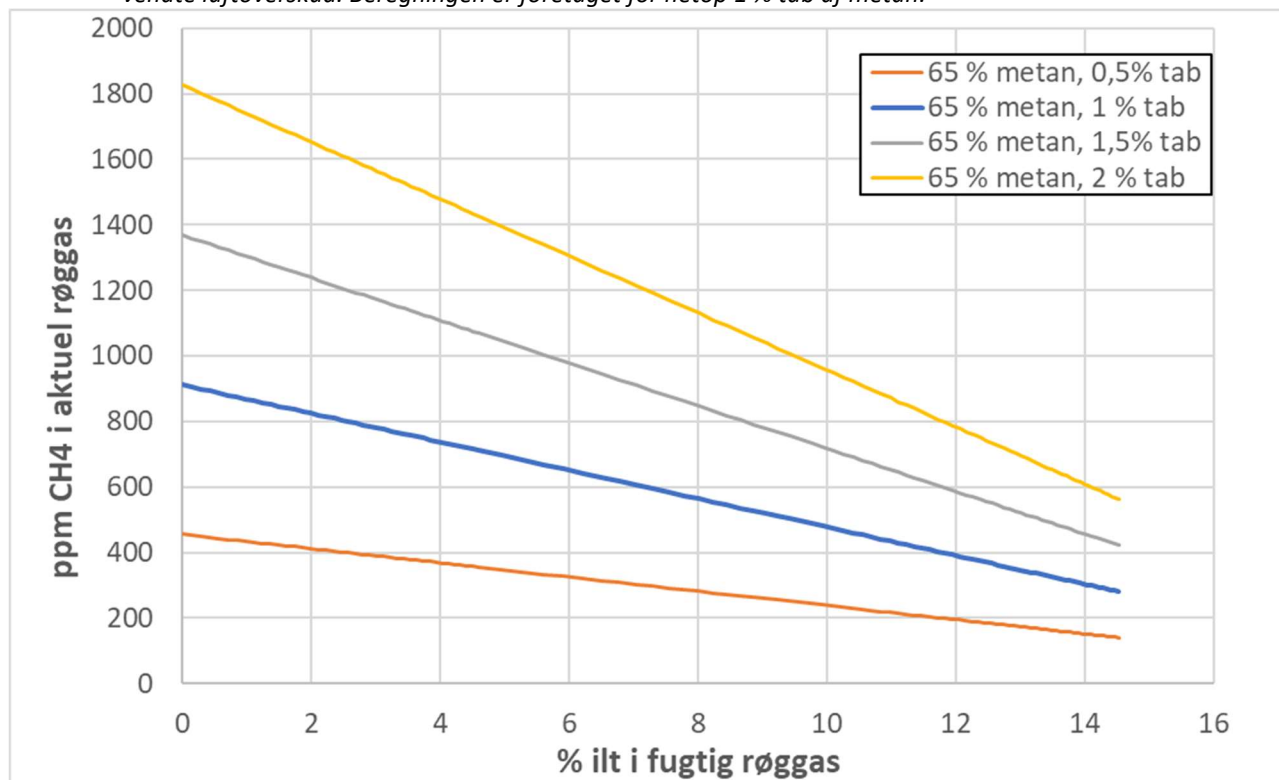
Figur 1: Fordelingen af sammensætning af biogasser på danske gasmotoranlæg.

4.2. Biogas forbrænding

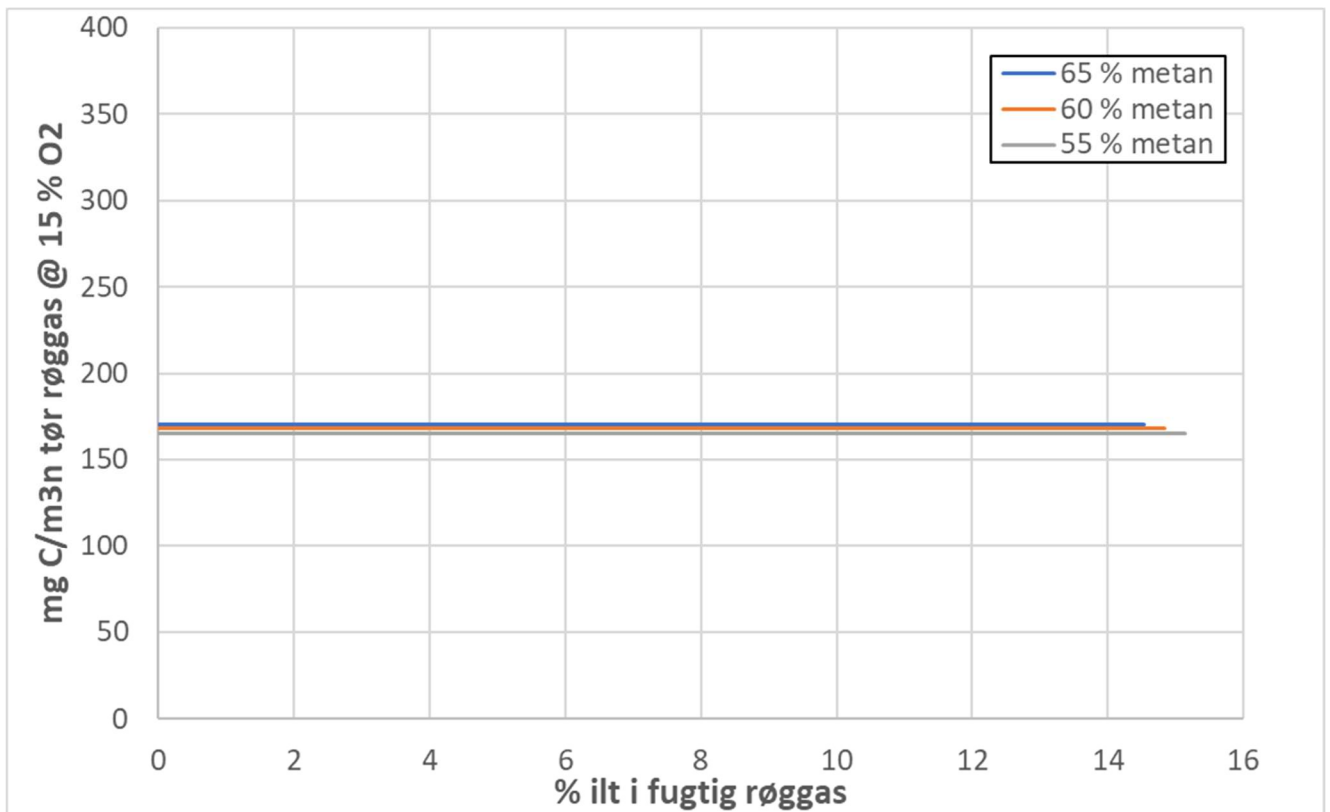
Når biogassen forbrændes i en gasmotor, sker det som regel ved et stort luftoverskud. Luft og metan omsættes ved støkiometri i et forhold på ca. 1 del metan til 9½ del luft, hvorfor den varierende mængde anden gas end metan i den anvendte biogas ikke har stor indflydelse på røggasmængden og røggassens slutsammensætning. Dertil er fortyndingen med luft under forbrændingen for stor. Dette er illustreret i Figur 2 der viser ppm metan i fugtig røggas, når 1 % af det indfyrede metan forefindes som emission i røggassen beregnet for tre typiske biogaskvaliteter.



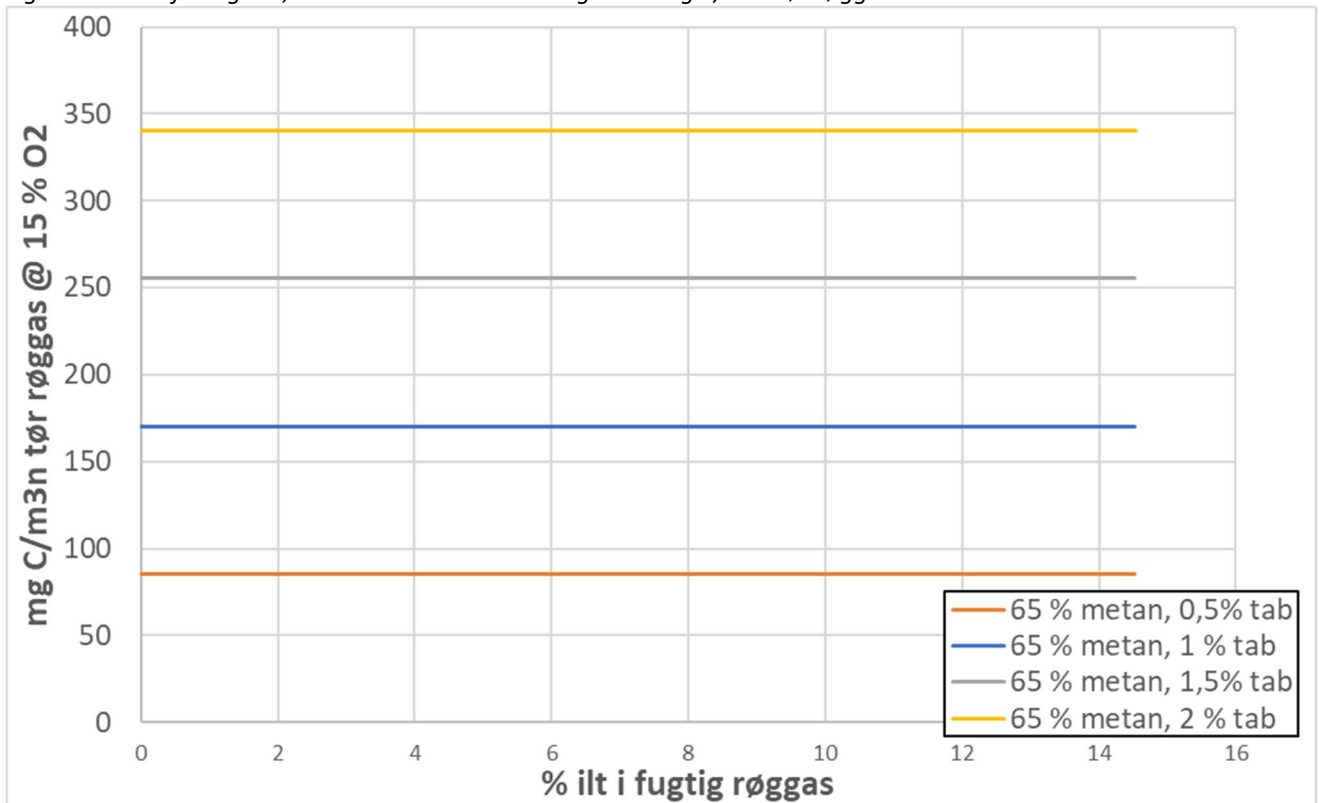
Figur 2: Emission af metan i ppm i røggas fra forbrænding af tre typiske biogaskvaliteter som funktion af det anvendte luftoverskud. Beregningen er foretaget for netop 1 % tab af metan.



Figur 3: Emission af metan i ppm i røggas fra forbrænding af en biogaskvalitet for forskellige tab af metan i røggas.



Figur 4: Som for Figur 2, men metanemission omregnet til mg C/m3n tør røggas ved 15 % O₂.



Figur 5: Som for Figur 3, men metanemission omregnet til mg C/m3n tør røggas ved 15 % O₂.

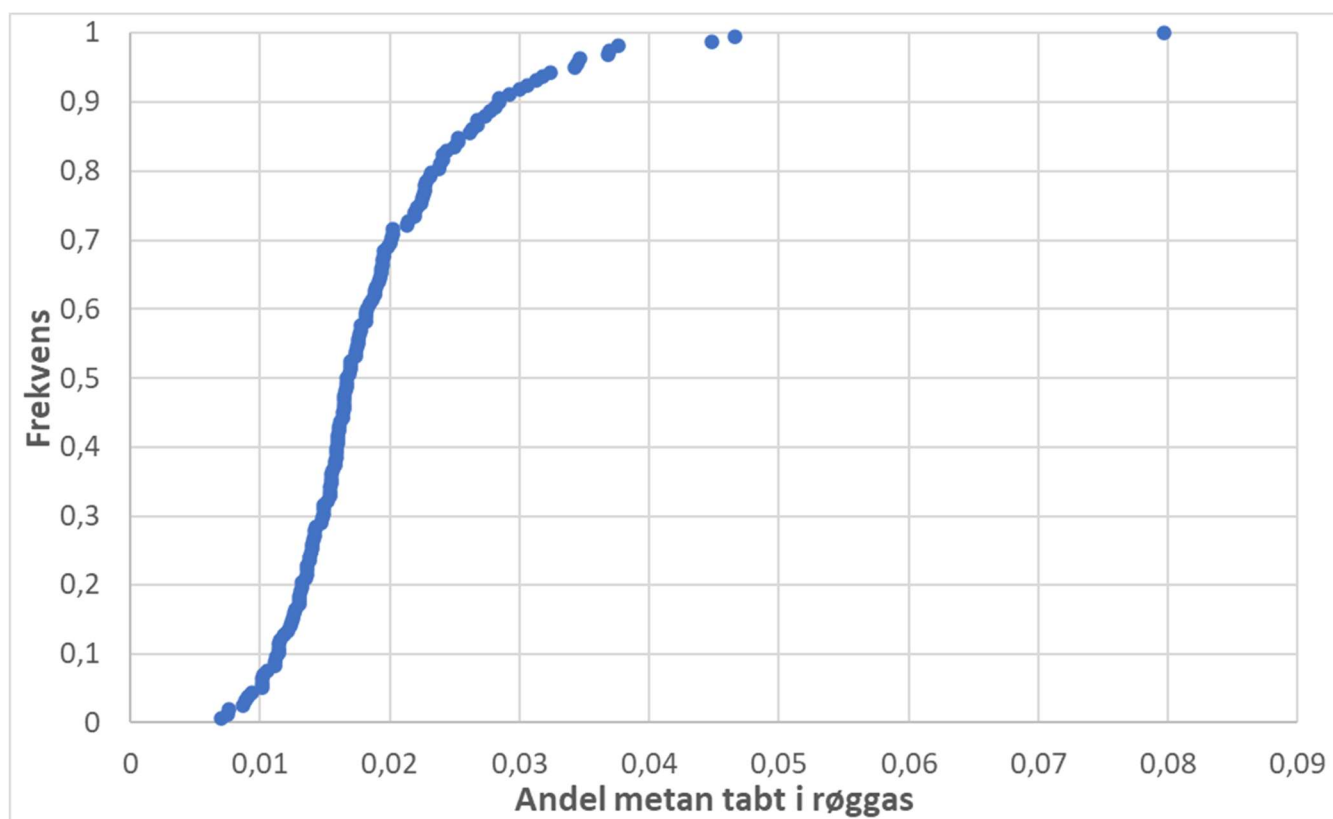
Figur 3 viser variationen for en anvendt biogas med 65 % metan og med forskellig udnyttelse af brændslet i gasmotoren. Når der omregnes til enheden for emissionsgrænseværdier ved en fastholdt fortynding med luft og til mg C/m^3 tør røggas, bliver emissionen uafhængig af luftfortyndingen, men fortsat også meget ens for de forskellige gaskvaliteter (Figur 4), hvorimod der er en signifikant variation i forhold til forbrændingens effektivitet, vist i Figur 5. Variationen i Figur 4 for de tre anvendte gaskvaliteter ligger fra 165 til 170 mg C/m^3 tør røggas ved 15 % O_2 . Såfremt der regnes på en deponigas med 35 % metan vil 1 % tab modsvarer af en grænseværdi på 149 C/m^3 tør røggas ved 15 % O_2 . Såfremt der fastlægges en grænseværdi for metantab, der svarer til 1% af den indfyrede metanmængde, vil denne alt efter den anvendte gaskvalitet svarer til et krav mellem 148 og 170 mg C/m^3 tør røggas ved 15 % O_2 .

Metan har en nedre brændværdi på 50 MJ/kg, hvilket direkte kan omregnes til emissionsfaktorer. 10 g metan tabt pr. kg indfyret svarer til 1 % tab og vil svare til en emissionsfaktor på 10 g/50 MJ indfyret eller 0,2 g/MJ indfyret. I det seneste store kortlægningsstudie /5/ blev der fundet, at biogasmotorer dengang (2007) havde en emission på 434 g metan/GJ indfyret, svarende til 2,17 % af den indfyrede mængde metan. Det blev fundet, at biogasmotorerne dengang havde en lidt lavere emission af metan end tilsvarende naturgasmotorer, idet naturgasmotorer havde en lidt skarpere regulering på NO_x . Emissionsfaktorerne for NO_x var således hhv. 202 g/GJ og 135 g/GJ for biogas- og naturgasmotorer.

5. Emissionsdata for eksisterende biogasmotorer

5.1. Metaemission for eksisterende driftstilstand

Ud fra eksisterende målinger - under den normale driftsindstilling på biogasmotorer - DGC har gennemført de seneste 10 år, er fordelingen af metanemissionen fra biogasfyrede gasmotorer analyseret. Der indgår i alt 158 datasæt, hvor der udover de efter lovgivningen pligtige emissioner også er bestemt metanemission. I beregningen af andel tabt metan indgår den aktuelle gaskvalitet. I de to tilfælde, hvor gaskvaliteten er ukendt, er der antaget en gennemsnitlig gaskvalitet ud fra de øvrige målinger. Data repræsenterer samlet set 90 individuelle motorer, så der er nogle motoranlæg, hvor der er målt mere end en gang. Fordelingen for metanemission kan ses i Figur 6 nedenfor.



Figur 6: Fordeling af metanemission på 158 måleserier som andel af indfyret gasmængde.

Der ses i Figur 6, at de fleste biogasmotorer ligger med en emission på 1-3 % af den indfyrede metan, hvilket svarer godt til de tidligere fundne resultater /5/. Der er ganske få maskiner (ca. 5 % antalsmæssigt), der har en lav emission under 1 %, og ca. 10 % af maskinerne har en emission over 3 % af den indfyrede metan.

Tabellen nedenfor giver yderligere statistiske data for fordelingen.

Table 1: Statistiske parametre for metanemission fra biogasmotorer baseret på antal motorer.

Parameter	Andel metan emission
Middel	0,0190
Minimum	0,0070
Maksimum	0,0797
Standardafvigelse	0,0086
10 % fraktil	0,011
25 % fraktil	0,014
50 % fraktil	0,017
75 % fraktil	0,022
90 % fraktil	0,028

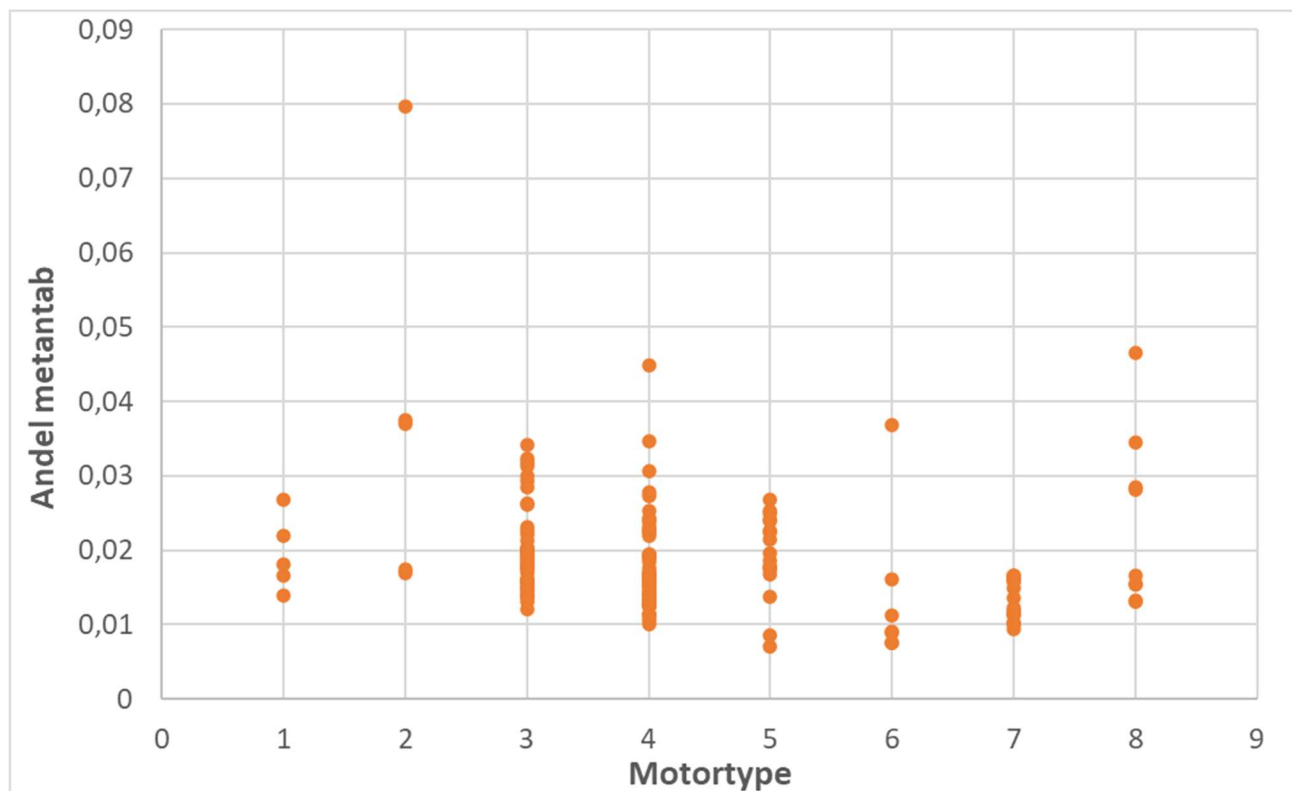
Energistyrelsen har venligt stillet et biogastræk i Energiproducenttællingen /6/ til rådighed for studiet. Herudfra kan det ses, at energiomsætningen på de motoranlæg, hvor DGC råder over data i perioden 2019 til 2021, svarer til hhv. 46,2 %, 45,5 % og 47,3 % af den årligt omsatte energimængde biogas på biogasmotorerne i Danmark. Datagrundlaget for analysen er således en forholdsvis stor stikprøve.

Opgøres energivægtede emissionsfaktorer, findes med DGC-data fra biogasmotoranlæg at hhv. 1,81 %, 1,84 % og 1,88 % metan tabes igennem årene 2019 til 2021. Dette indikerer et fald i forhold til opgørelsen fra 2010 /5/, som viste 2,17 % tab. Der er dog ikke i opgørelsen her foretaget en fordeling på motortyperne, og DGC datasæt kan være lidt skævt repræsenterende i forhold til, at det vil være de større anlæg, der får foretaget emissionsmålinger i forhold til krav herom. Kravet om periodisk præstationskontrol gælder for biogasmotorer med mere end 1 MW indfyret effekt.

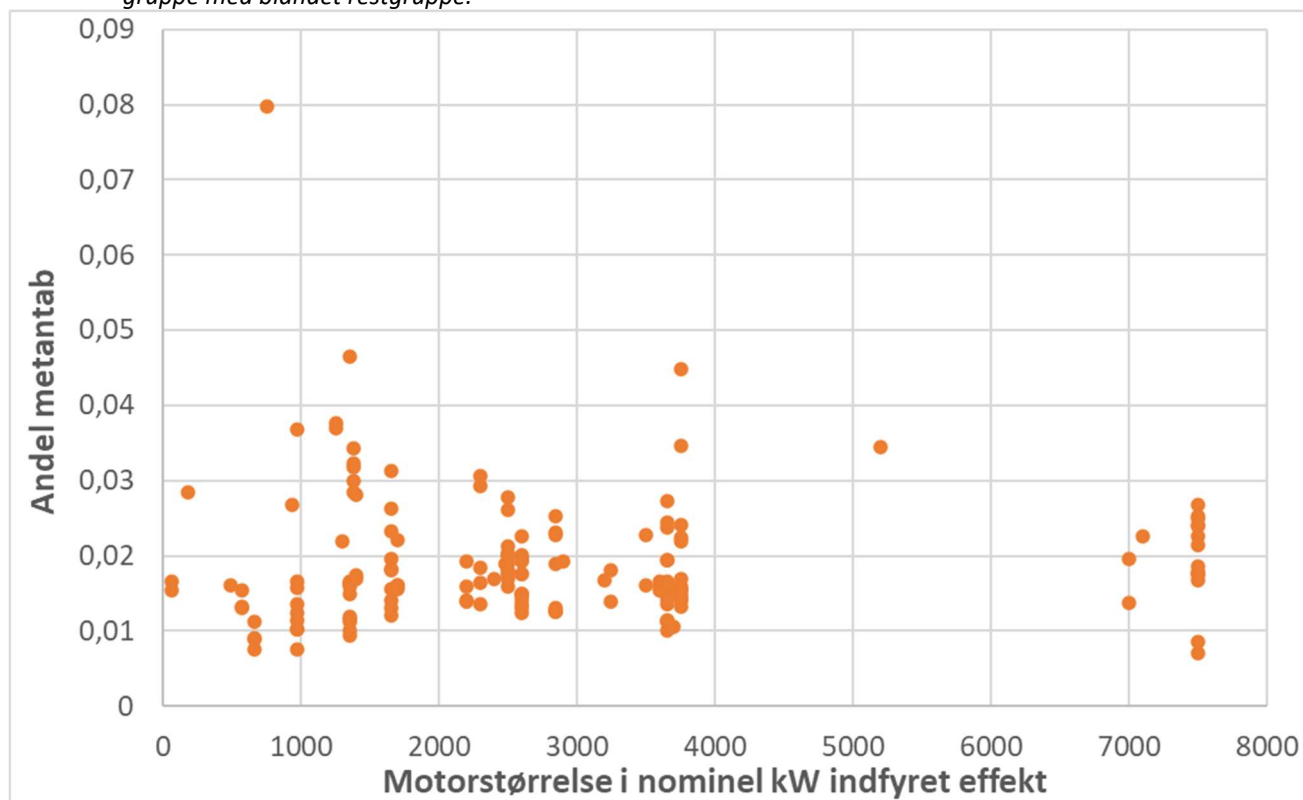
5.2. Metanemission analyseret på tværs af biogasmotorerne

Figur 7 viser fordelingen af metanemission på grupper af motormodeller. Gruppe 8 er en blandet restgruppe. Der er ikke signifikant forskel på maskinernes metanemission, lige bortset fra motortype 7 der i forhold til de øvrige har et lavt niveau og mindre spredning i emissionen fra maskine til maskine.

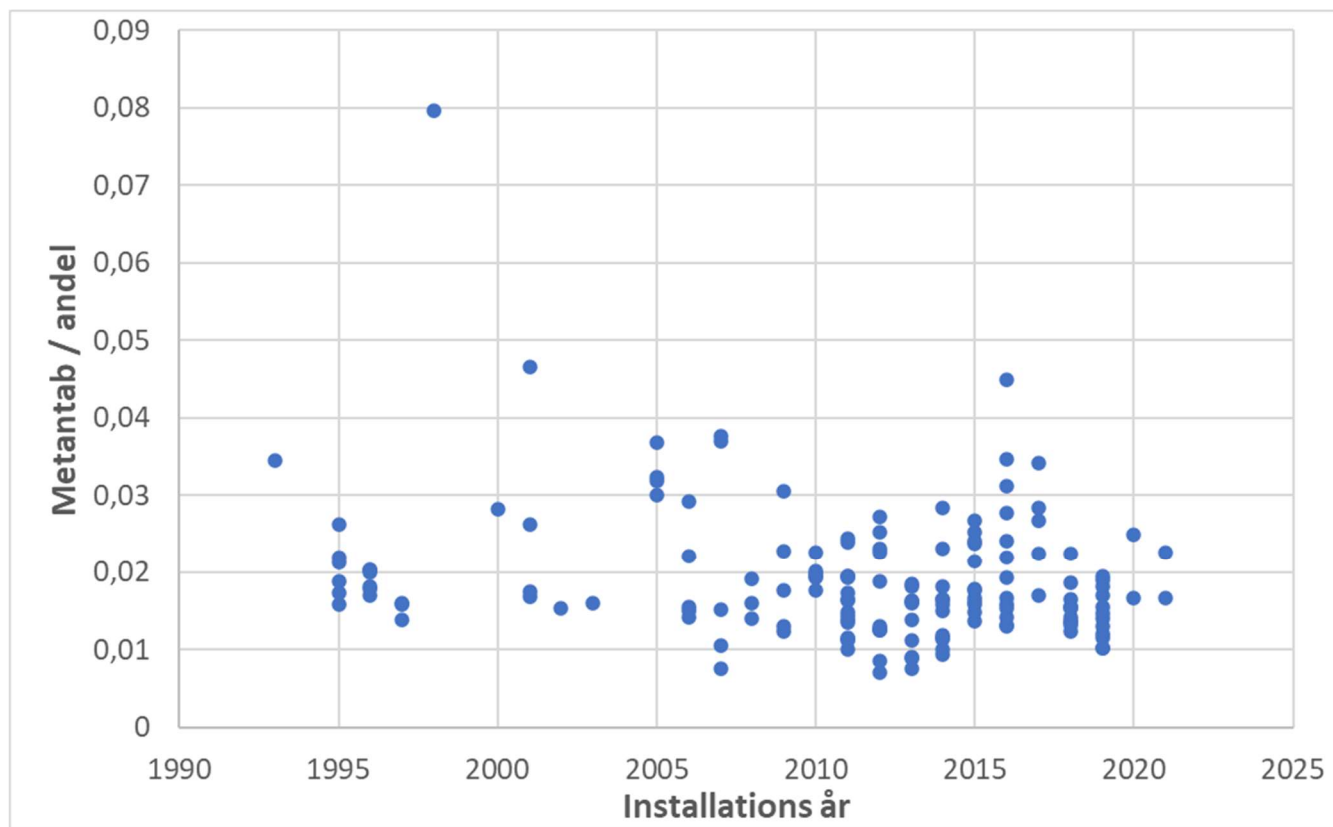
Figur 8 viser på samme vis metantabet som funktion af deres størrelse. Der er stor spredning i data, og ikke nogen tydelig tendens. Det ser således ud til, at metanemissionen er ligeligt fordelt, og dermed uafhængig af motorstørrelsen.



Figur 7: Fordeling af metanemission på 7 forskellige motortyper (mærke og model), gruppe 8 repræsenterer en gruppe med blandet restgruppe.



Figur 8: Fordeling af metanemission på motorstørrelse (indfyret effekt).

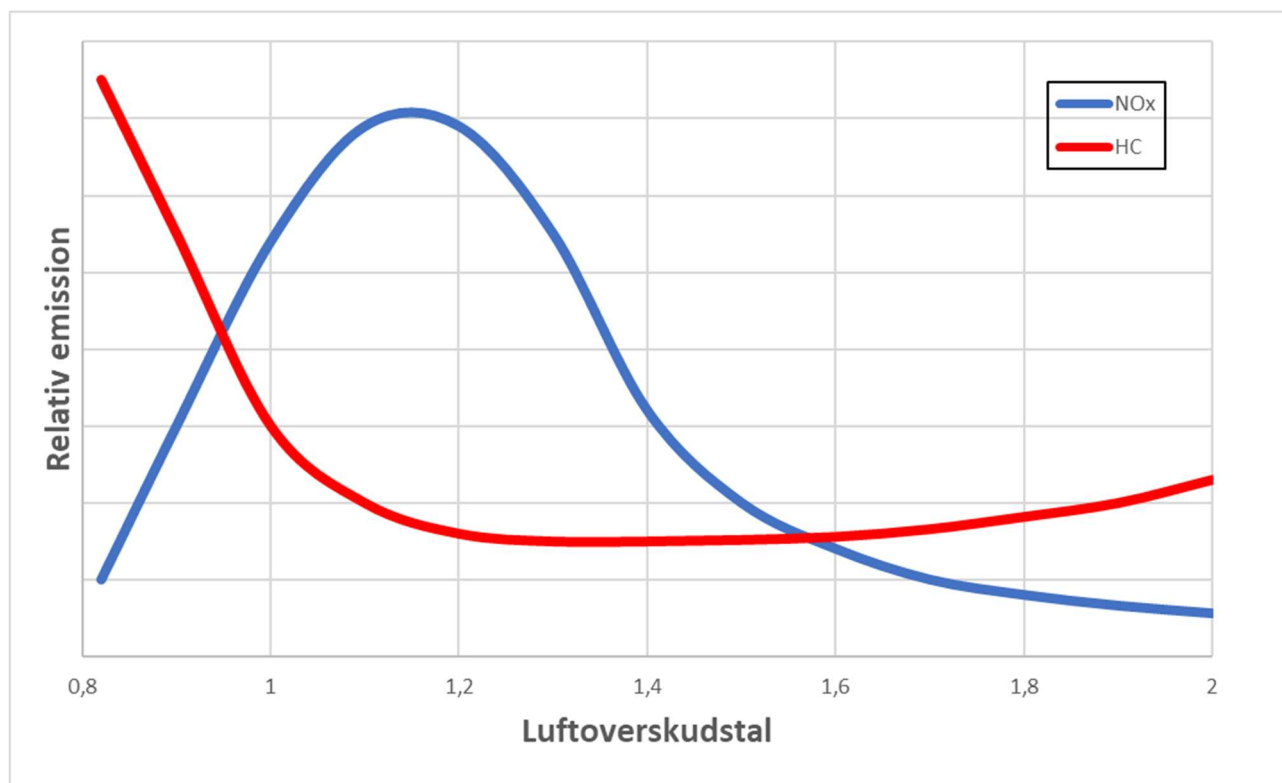


Figur 9: Fordeling af metanemission på motorårgang (installations år).

Ud fra udviklingen i biogasmotorernes energivægtede metantab, som er faldet fra 2,17 % i 2007 til omkring 1,85 % i perioden 2019-2021 (afsnit 5.1), er det forventeligt, at der sker en løbende reduktion, således at nye motorer har lavere emission end ældre maskiner. Figur 9 viser metanemissionen sorteret efter maskinernes installations år. DGC har ikke kendskab til at der er installeret brugte maskiner i Danmark. En lineær regression på data viser et 10-årigt fald i metanemissionen på ca. 0,3 %-point, hvilket er i god overensstemmelse med det ovenfor nævnte fald. Der er dog meget stor spredning i data, og regressionskoefficienten R^2 er med en værdi på kun 0,06 ikke overbevisende. Ses der nærmere på data, kan man se, at bundniveauet omkring år 2007 rykker ned under et tab på 1 % men fortsat med meget stor spredning. Det er således sandsynligt, at faldet i metanemission fra 2007 til 2019-2021 skyldes nye motorer med et lavere niveau af metanemission. Når man taler med motorleverandørerne og deres udviklingsafdelinger, er lavere metanemission også blandt deres udviklingsmål. Det er dog også tydeligt, at udviklingen går langsomt, og der er langt til en målsætning om et metantab på 1 % af indfyret mængde.

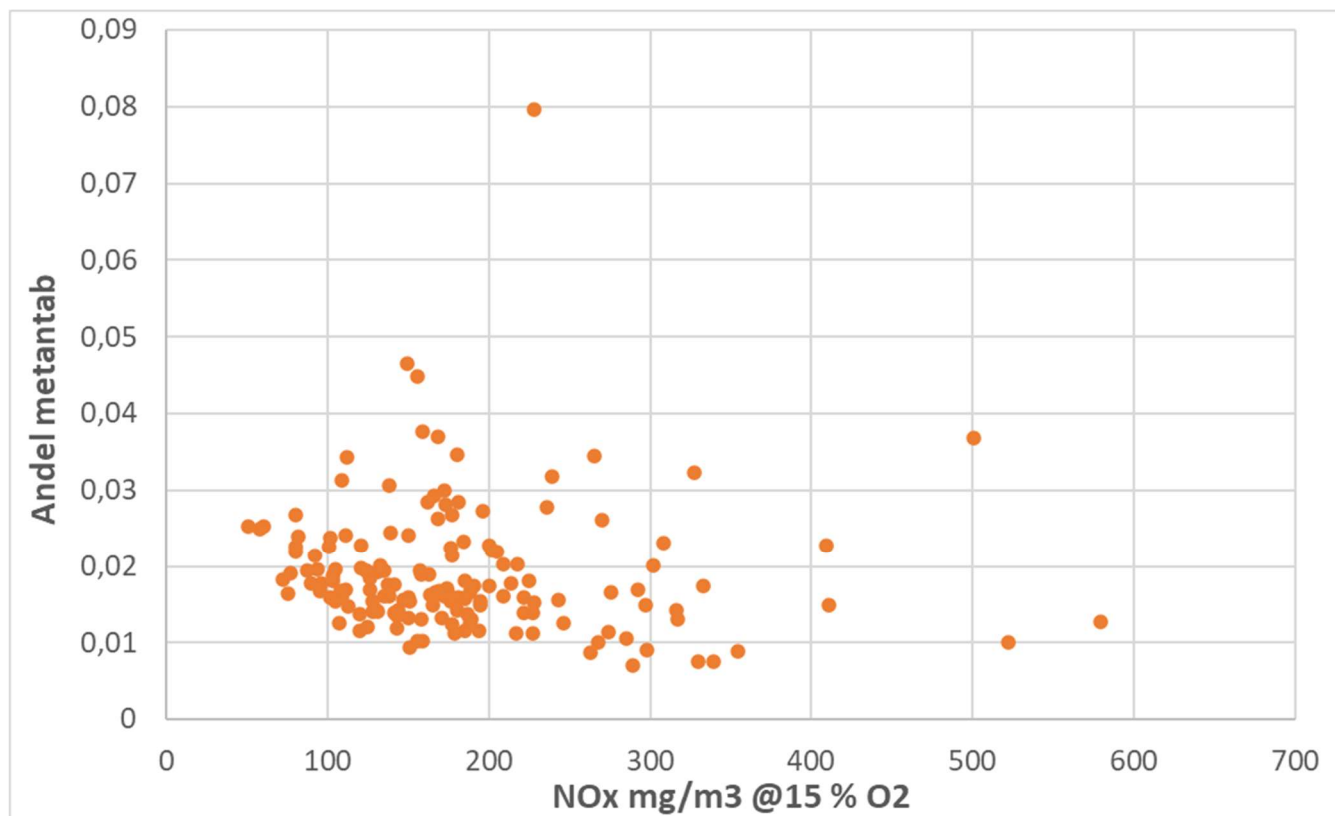
5.3. NO_x og metanemission

Danske gasmotorer drives næsten alle uden undtagelse som lean-burn motorer med et højt luftoverskudstal. Dette skyldes, at motorerne hidtil er blevet optimeret efter to hensyn. Dels en høj virkningsgrad og dels krav om, at NO_x-emissionen skal være lav. Figuren nedenfor viser den normale udvikling i NO_x og metanemission (hydrocarbon emission) for en 4-takts motor. Når der anvendes biogas eller naturgas som brændsel, vil hydrocarbon emissionen primært bestå af metan. De danske gasmotorer opereres normalt med et luftoverskudstal i området 1,7 til 1,9. I dette område er der et trade off mellem NO_x-emission og metanemission. Ved at øge luftoverskudstallet kan NO_x-emissionen sænkes men på bekostning af en øget emission af metan.

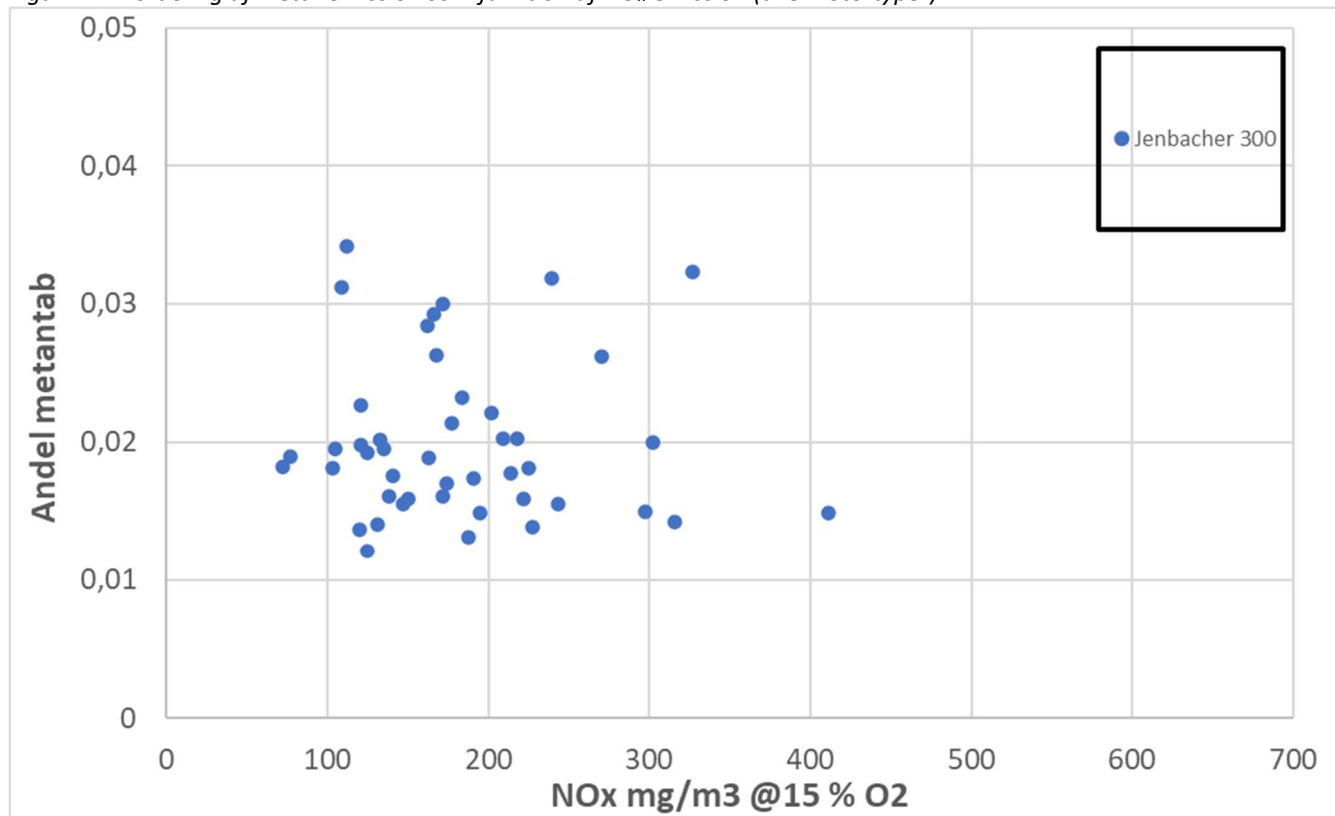


Figur 10: Sammenhæng mellem NO_x og hydrocarbon emission på fire-takts-motorer.

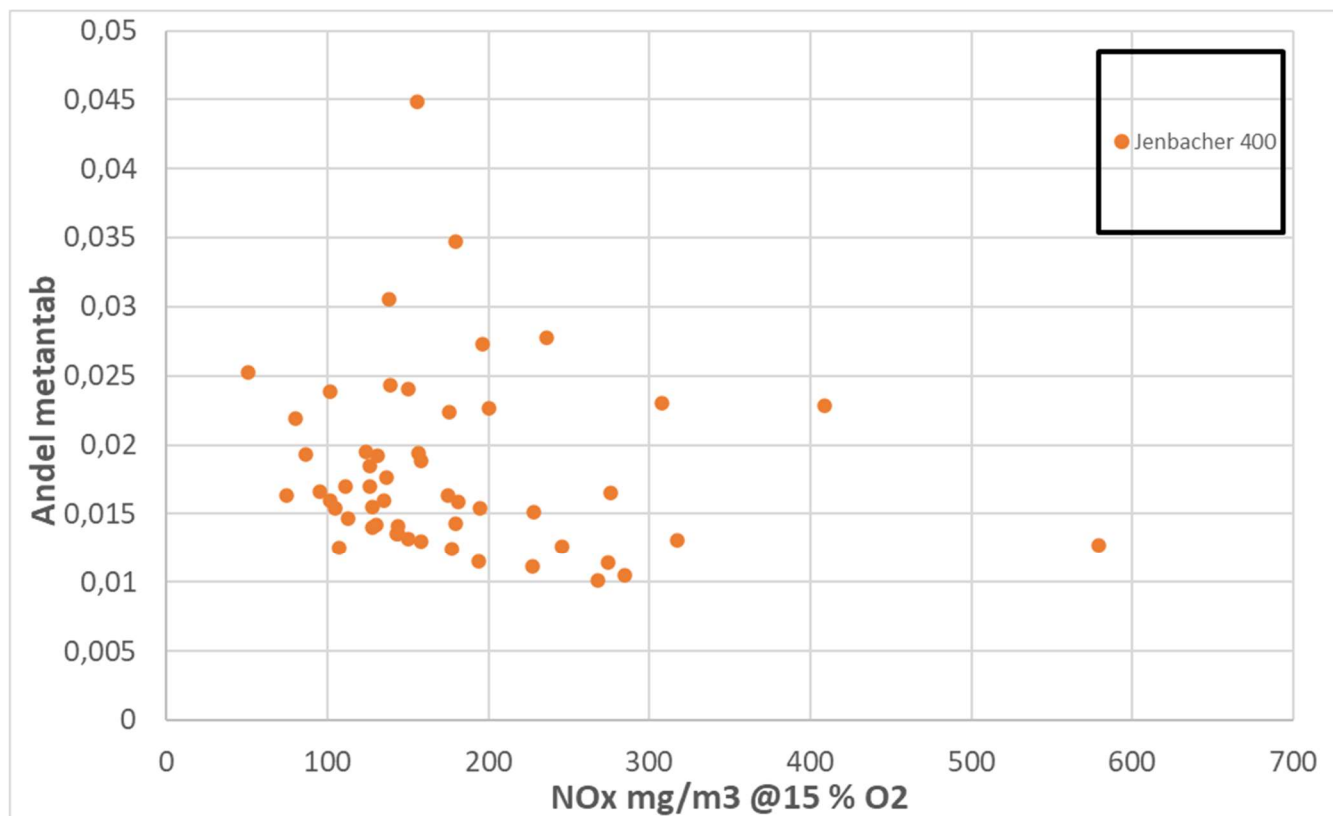
Den nævnte tendens er undersøgt i de data, der haves for biogasmotorerne i danske installationer, og resultaterne er vist nedenfor i Figur 11 for alle maskinerne og for de fire mest anvendte enkeltmaskiner i Figurerne 12-15. Den forventede tendens er på ingen måde tydelig, udover for Jenbacher 600 serien (Figur 14).



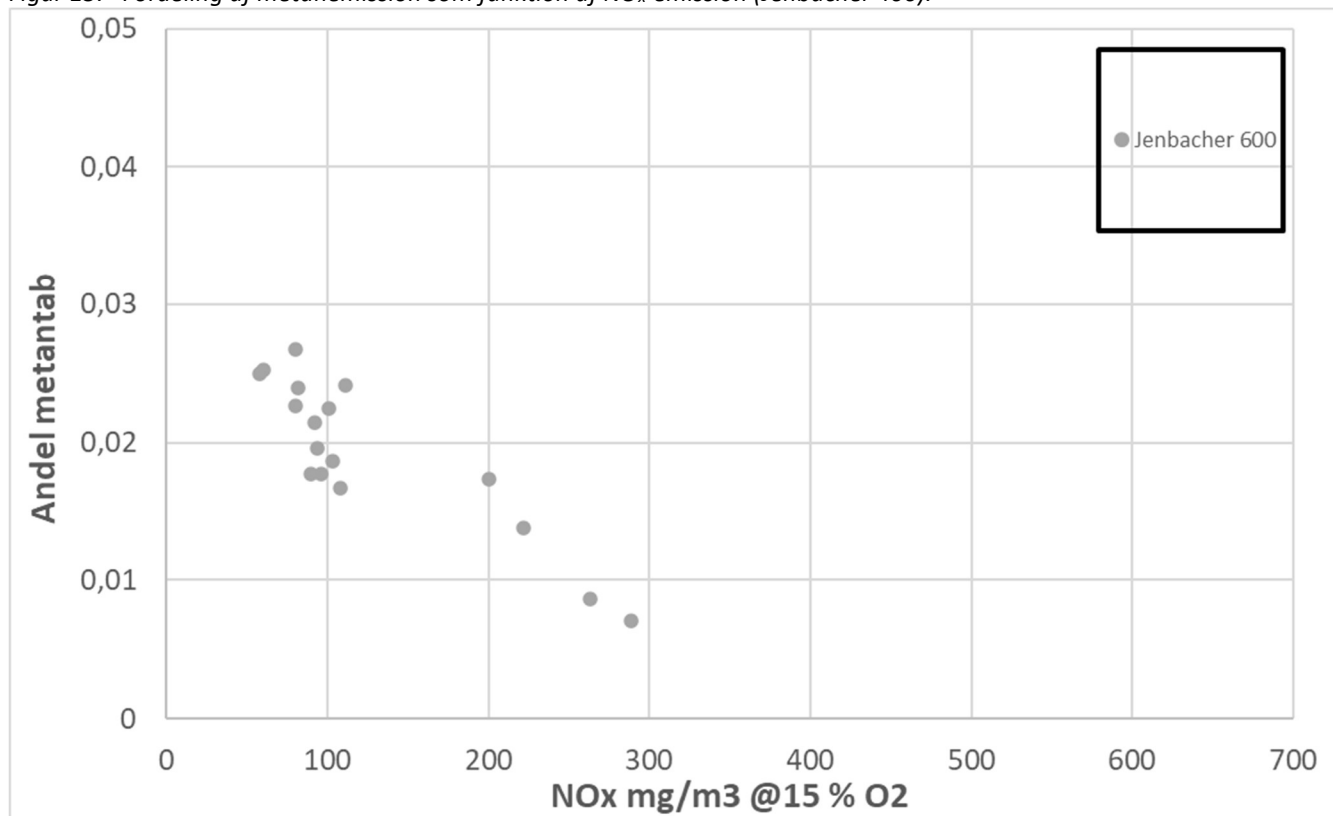
Figur 11: Fordeling af metanemission som funktion af NO_x-emission (alle motortyper).



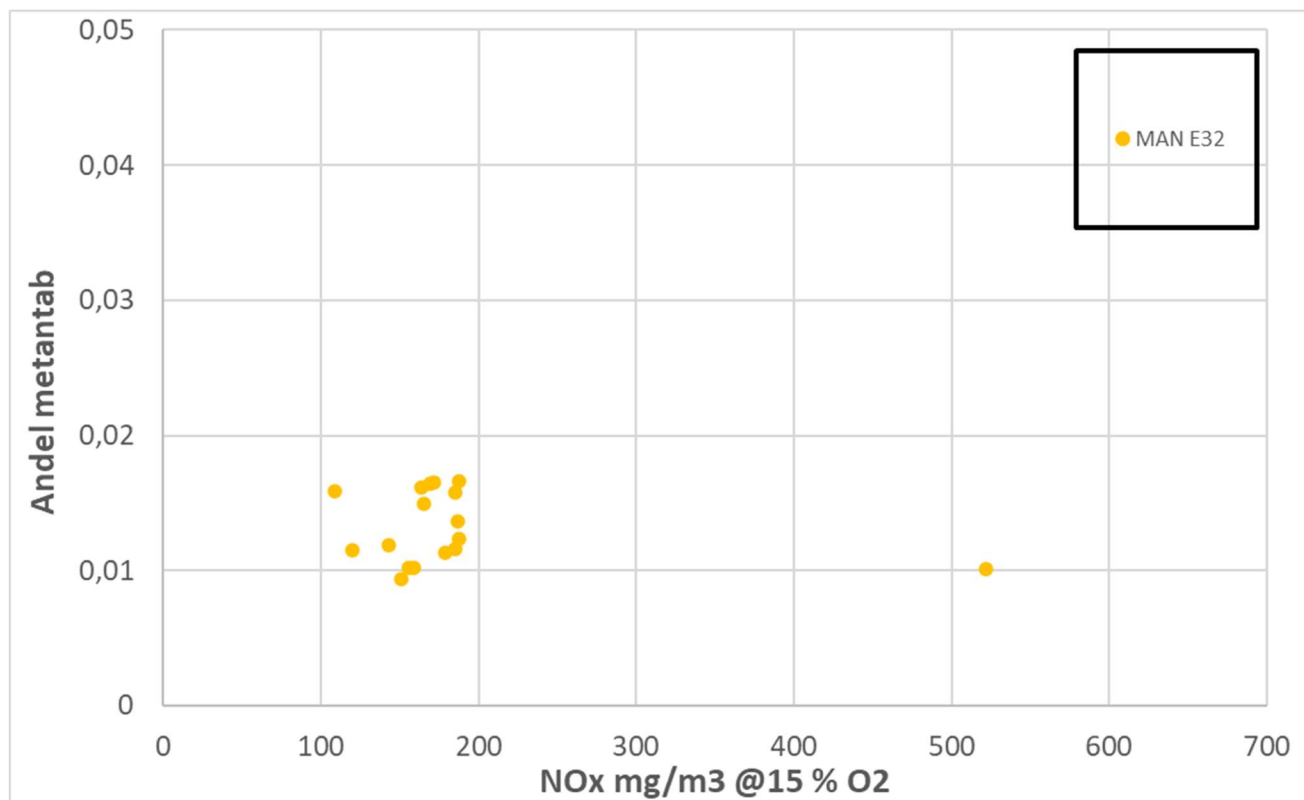
Figur 12: Fordeling af metanemission som funktion af NO_x-emission (Jenbacher 300).



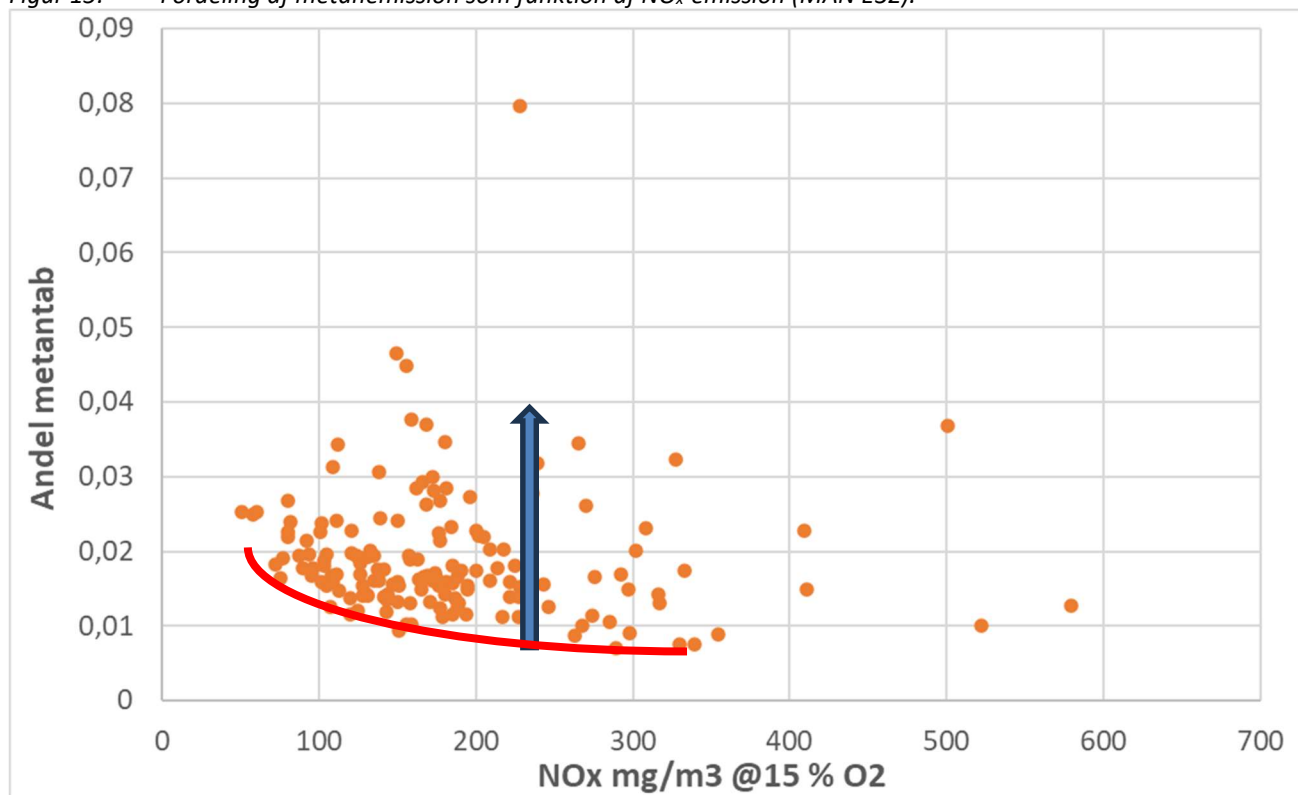
Figur 13: Fordeling af metanemission som funktion af NO_x-emission (Jenbacher 400).



Figur 14: Fordeling af metanemission som funktion af NO_x-emission (Jenbacher 600).



Figur 15: Fordeling af metanemission som funktion af NO_x-emission (MAN E32).



Figur 16: Som figur 11, men med rød idealkurve indtegnet og pil, der illustrerer tidstendensen for metanemissionen i en motors levetid. Se tekst for uddybning.

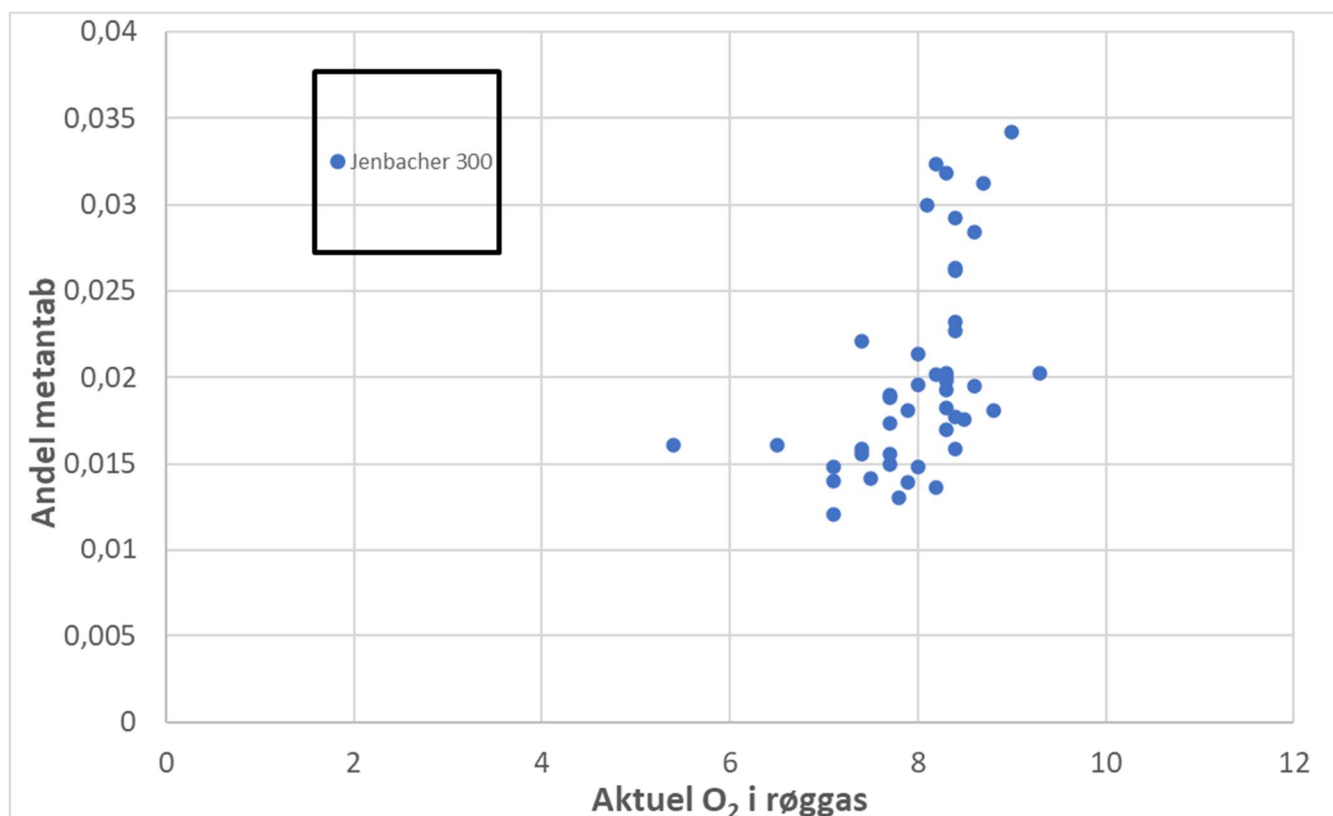
I dialoger med motorleverandørerne bekræfter de, at den forventede sammenhæng mellem NO_x og metanemission findes på alle maskinerne, men dog således at fra en ny maskine bliver installeret, og den kan indreguleres på en ideal-kurve illustreret i Figur 16, vil der med tiden ske en opbygning af koksrester i cylinderen, der gradvis vil øge metanemissionen. Herudover vil der ske et slid på cylinder, stempel og stempelringe m.m. hvilket også vil øge metanemissionen over tid. Det er en anerkendt mekanisme til metanemissionen fra firtaktsmotorer, at små hulrum, hvor flammen ikke kan nå ind under forbrændingsprocessen, giver anledning til emission af metan. Rent mekanisk slid vil over tid øge denne mekanisme. Når maskinerne med mellemrum (30.000/40.000/60.000 timers drift) gennemgår hovedreparation vil en del af den fra starten værende bedste performance blive genetableret, men da alle dele af forbrændingskammeret ikke udskiftes, opnår man ikke at komme ned på den emission, en maskine har fra helt ny. Det kan betyde at en ny motor, der kan overholde et givet emissionskrav for metan, med tiden kan få problemer med at overholde kravet

5.4. Støkiometriens indflydelse på metanemissionen

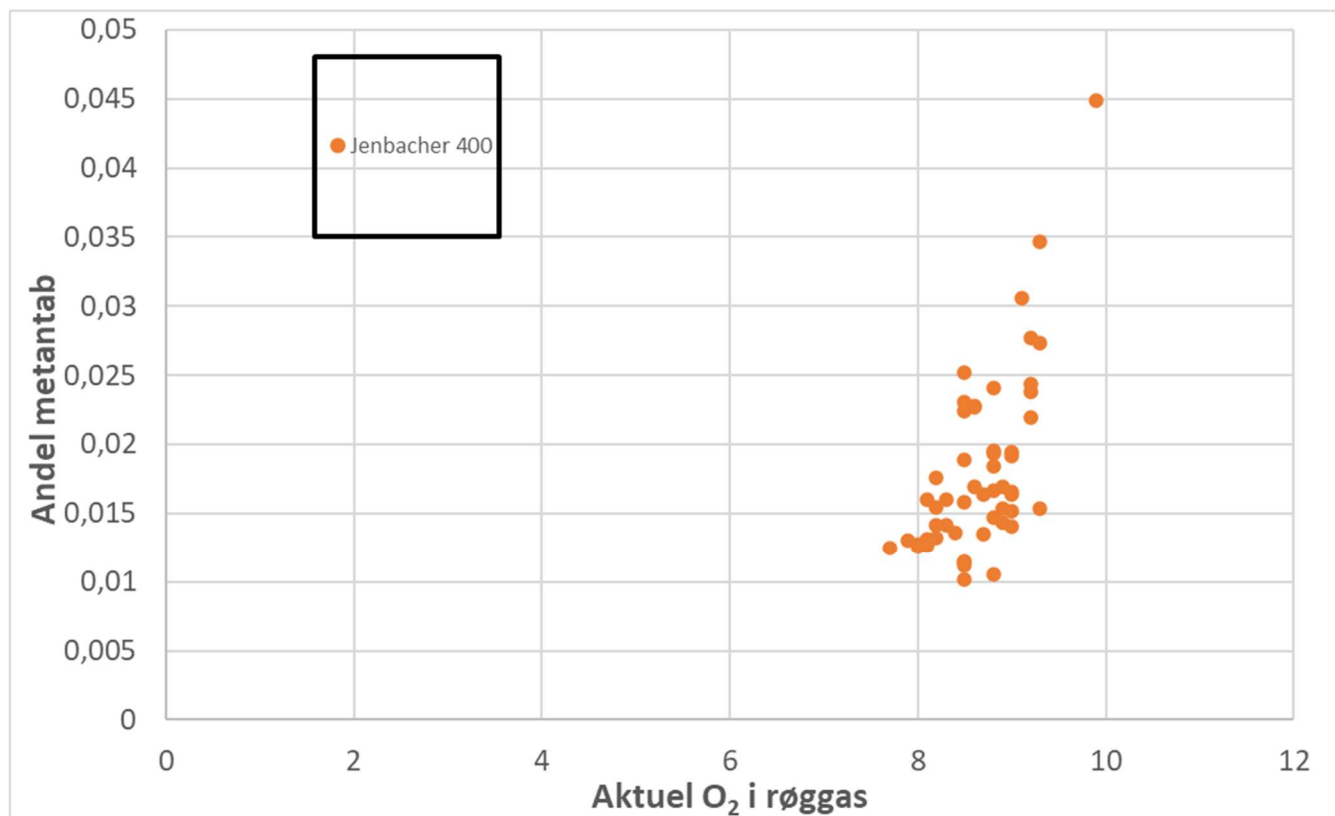
Figur 10 viser, at metanemissionen stiger med stigende luftoverskudstal. Denne tendens er også at finde i de emissionsdata, der er til rådighed for maskinerne installeret i Danmark. Figurene 17-20 viser sammenhængen for de fire mest almindelige motortyper, som anvendes i Danmark.

Tendensen ses for alle typerne, men er tydeligst for Jenbacher-maskinerne og mindre tydelig for de kapacitetsmæssigt mindre MAN-maskiner.

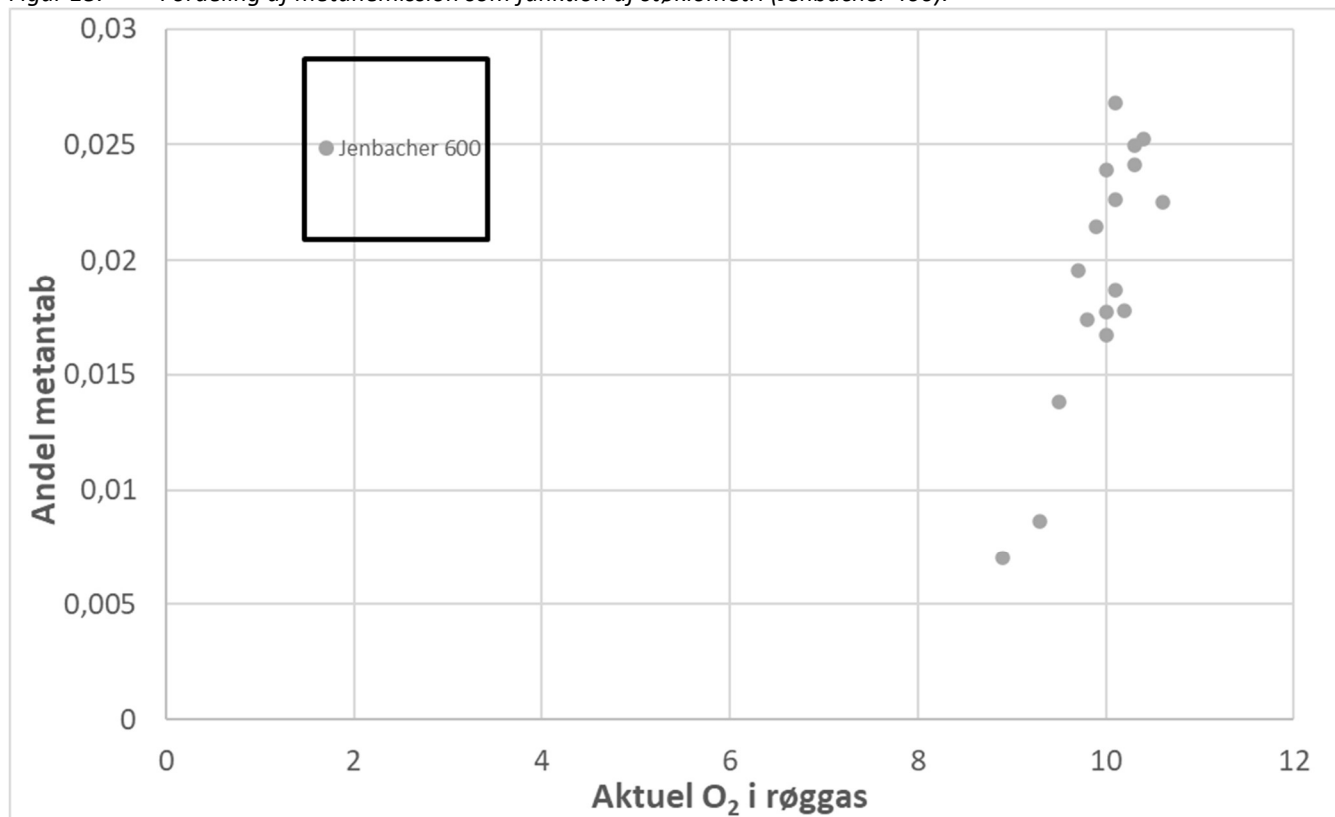
At maskinerne følger den forventede sammenhæng med luftoverskudstallet er vigtigt for muligheden for ved primære metoder (indregulering af maskinerne) at kunne opnå en metanreduktion.



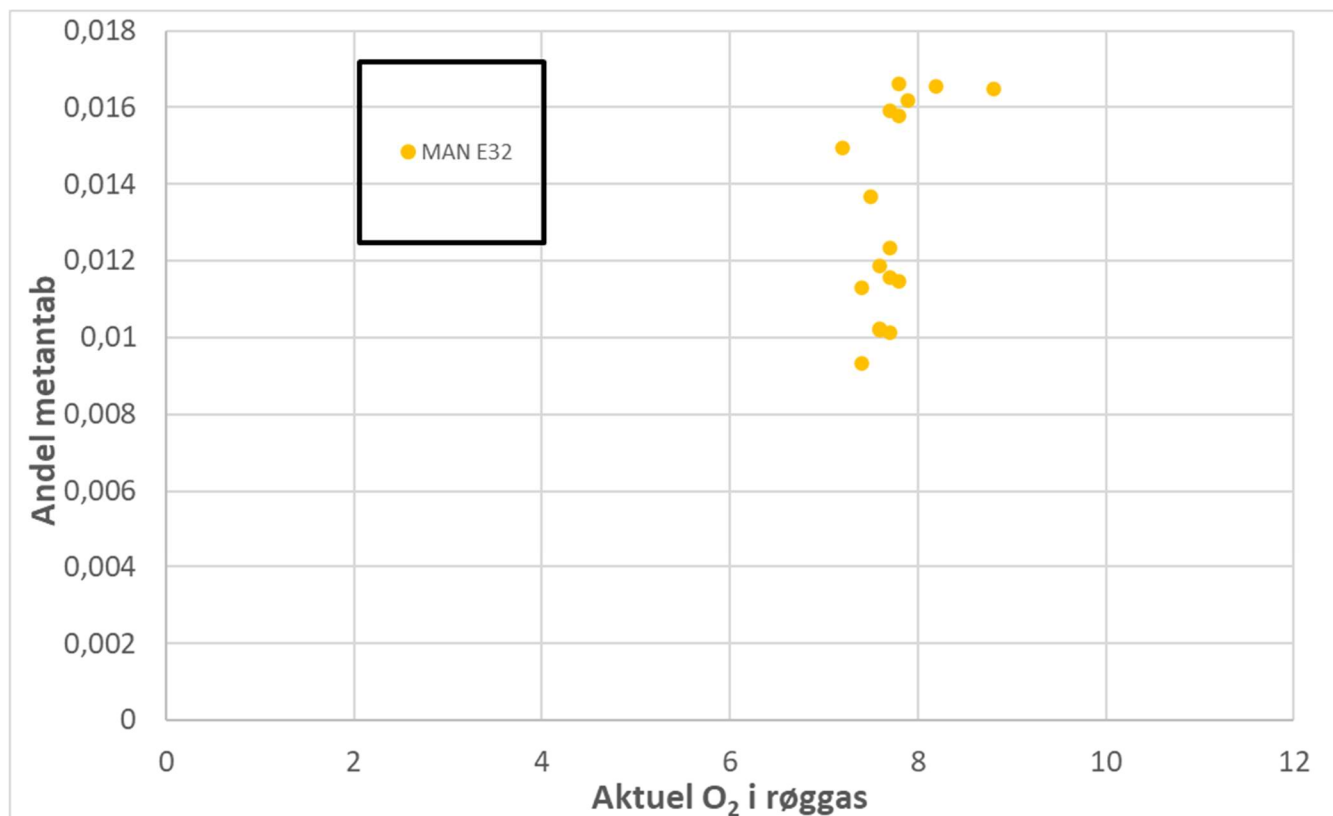
Figur 17: Fordeling af metanemission som funktion af støkiometri (Jenbacher 300).



Figur 18: Fordeling af metanemission som funktion af støkiometri (Jenbacher 400).



Figur 19: Fordeling af metanemission som funktion af støkiometri (Jenbacher 600).



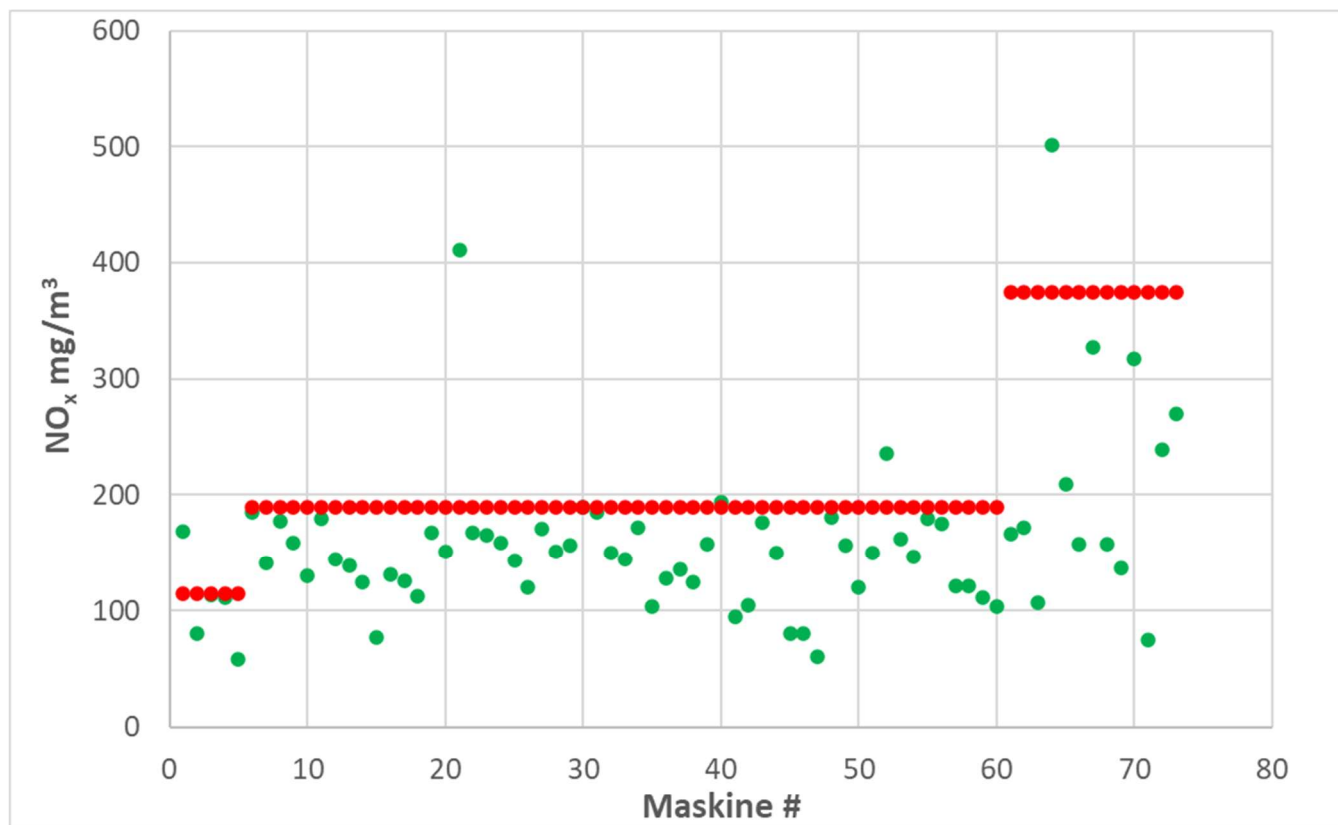
Figur 20: Fordeling af metanemission som funktion af støkiometri (MAN E32).

5.5. NO_x emission i forhold til kravene

Som tidligere nævnt optimeres maskinerne i Danmark primært op imod højeste mulige virkningsgrad under samtidig overholdelse af gældende NO_x-regulering. Kravene til NO_x rejses i /2-3/ og er bestemt af maskinens alder og størrelse. Kravene er komplekse. Grunden hertil er, at reglerne bygger på ældre danske krav kombineret med indfasning af MCP-direktivets krav.

Figur 21 nedenfor viser de danske biogasmotorers krav og overholdelse heraf. Det fremgår, at kravene generelt overholdes, og kun enkelte maskiner har en for høj NO_x-emission. Nogle af afvigelserne kan eventuelt skyldes fejlbehæftede data fx med hensyn til maskinens alder, eller der er misforståelser af de komplekse regler.

Flere maskiner ligger med god margin til kravene, og dermed synes der at være mulighed for at justere maskinernes driftspunkt op imod en højere NO_x-emission og dermed opnå en reduktion af metanemissionen. I det følgende afsnit undersøges muligheden herfor.

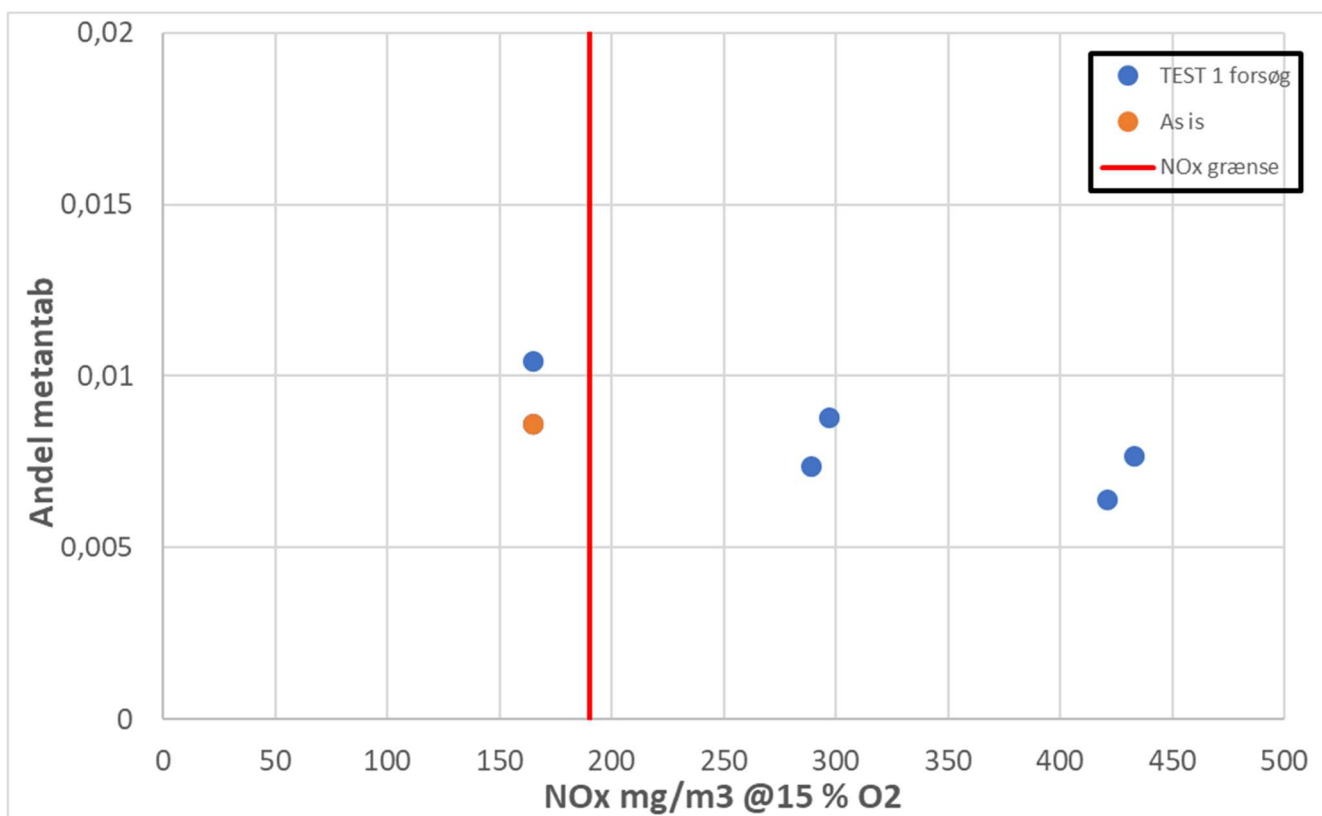


Figur 21: NO_x-emission på gasmotoranlæg i forhold til krav (rød) efter emissionslovgivningen ved 15 % O₂, tør røggas.

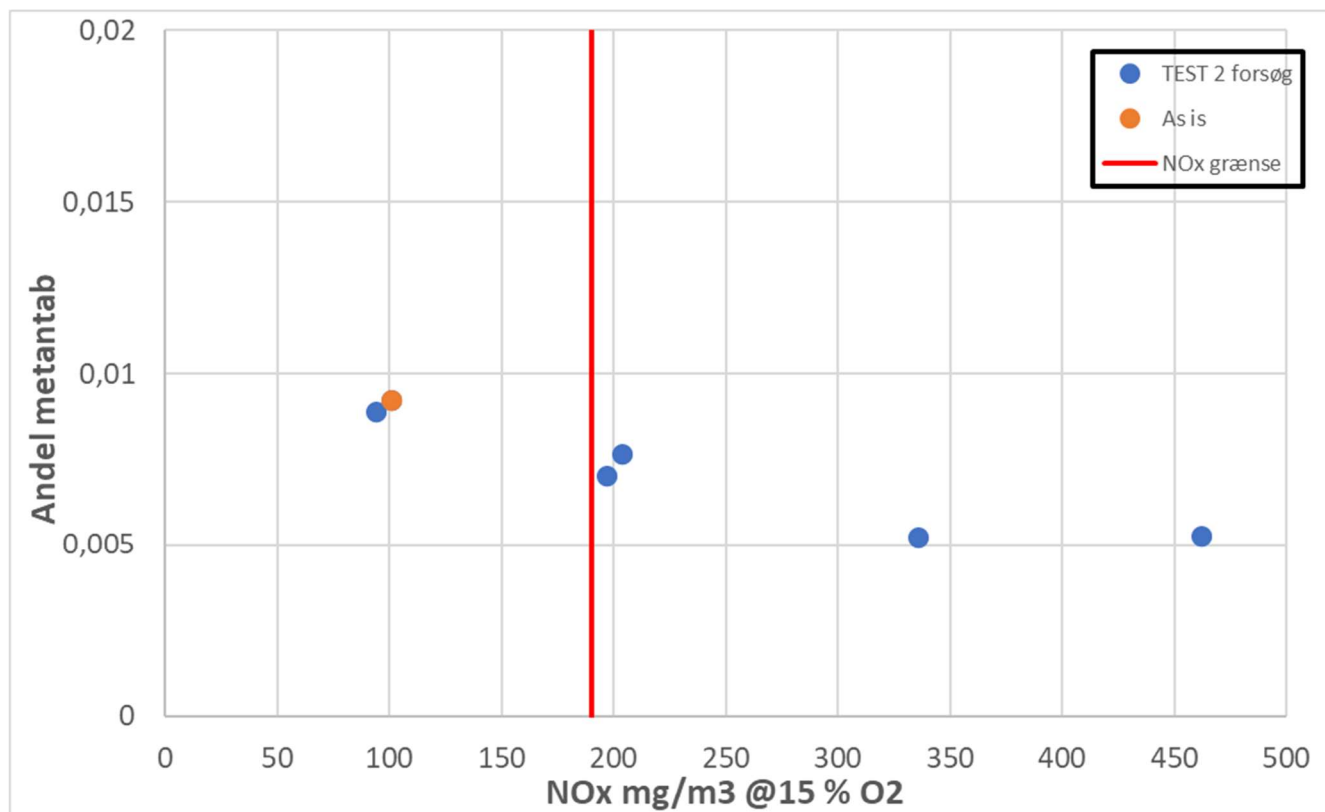
6. Mulighed for anvendelse af primære reduktionsforanstaltninger

Som vist i de foregående afsnit omkring danske biogasmotorers drifts- og emissionsforhold, er der mulighed for, at metanemissionen kan sænkes ved at ændre maskinernes indstilling. DGC har derfor valgt tre typiske biogasmotorer ud til gennemførelse af praktiske test. Ved valg af maskinerne er der lagt vægt på, at de er typisk forekomne på det danske marked, og at de har varierende afstand til NO_x -emissionsgrænsen, således at de repræsenterer de varierende afstande til NO_x -kravet set i Figur 21, og dermed så godt som muligt repræsenterer det indreguleringsrum, der er på de eksisterende maskiner. Hvad angår metantab, ligger de valgte maskiner i den gode ende med 0,8-1,2 % metantab. Udover disse forhold er der også taget hensyn til maskinernes tilgængelighed, og DGC vil gerne takke for ejernes og leverandørernes velvillige deltagelse i de gennemførte test.

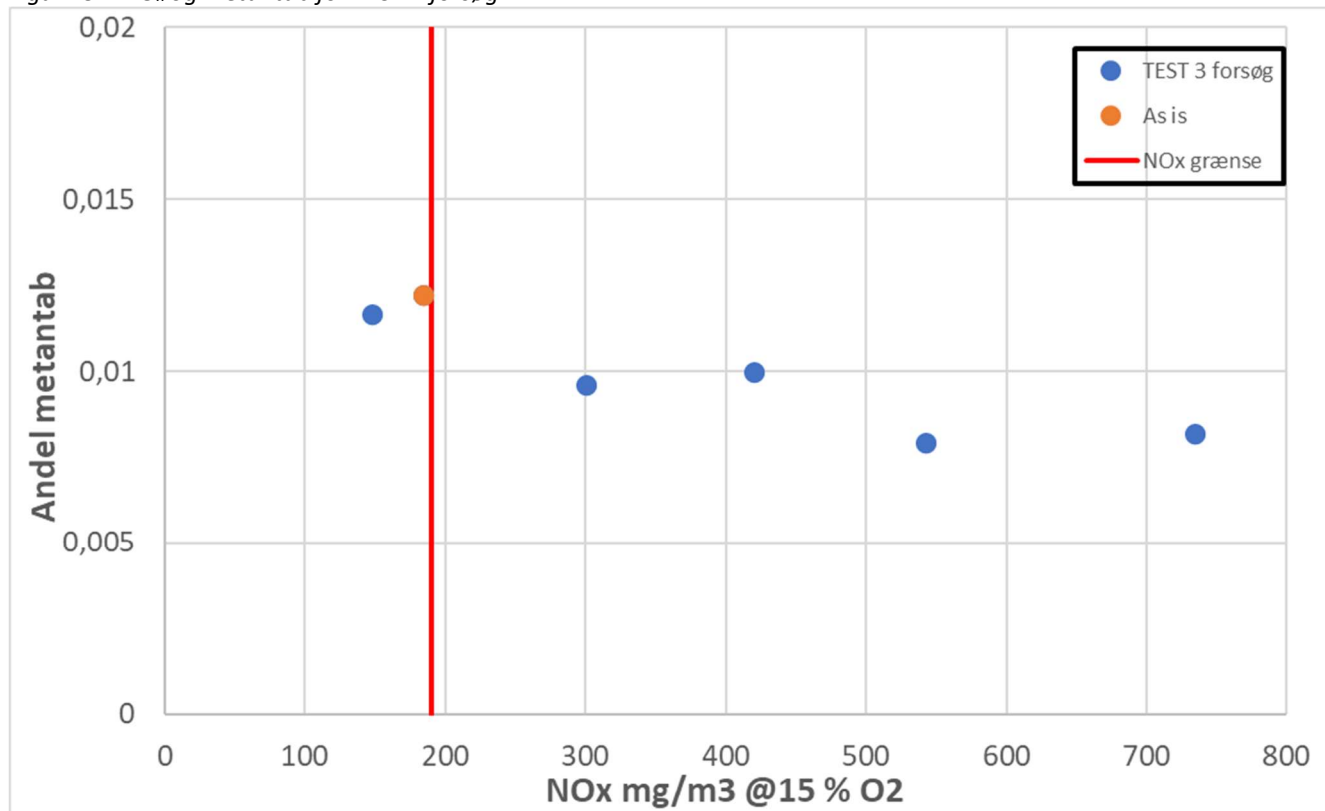
De gennemførte forsøg er sket i samarbejde med motorleverandørerne, så maskinernes indregulering under forsøgene har været inden for de praktiske begrænsninger, som sikker drift af maskinerne giver. De gennemførte forsøg er sket ved ændring af støkiometri og ved ændring af tændingsvinklerne på maskinerne. For hver maskine er der gennemført en dokumentation af maskines sædvanlige driftspunkt, og fem ændrede indstillinger. Figurene 22-24 viser de opnåede resultater.



Figur 22: NO_x og metantab for TEST 1 forsøg.



Figur 23: NO_x og metantab for TEST 2 forsøg.

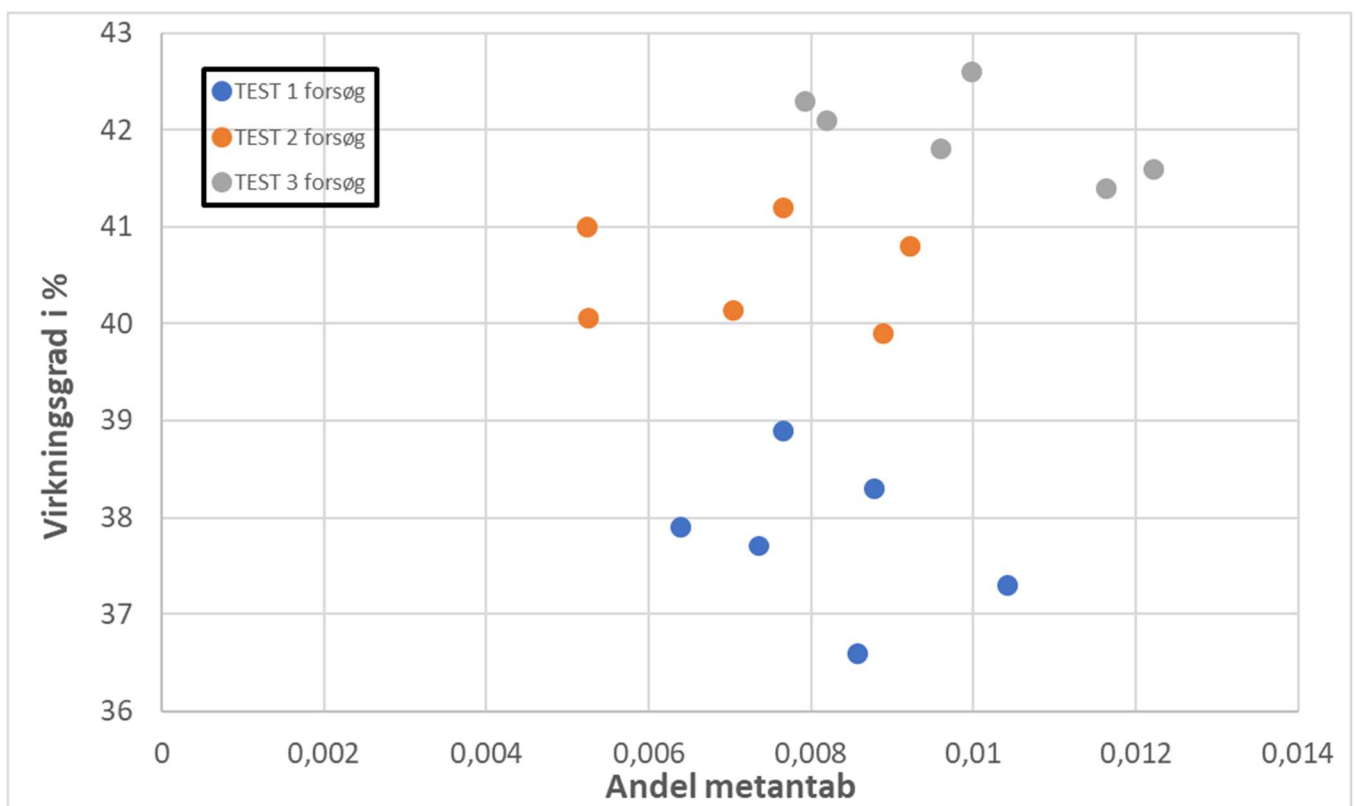


Figur 24: NO_x og metantab for TEST 3 forsøg.

Som Figur 22-24 viser, er der for alle maskinerne opnået en reduktion af metanemissionerne. Den maksimale reduktion er henholdsvis 25, 43 og 33 % i forhold til metanemissionen ved den normale driftstilstand, når der tillades en NO_x-emission, der går ud over emissionskravene. Tillades derimod kun en øgning af NO_x-emissionen op til emissionsgrænseværdien, kan der opnås henholdsvis 4, 22 og 3 % metanreduktion. Det afgørende er her, hvor stor margin maskinernes normale driftspunkt har til NO_x-emissionsgrænsen.

6.1. Øvrige forhold til driften

Der blev under de gennemførte test målt korttidsvirkningsgrader på maskinerne. Det forhold, at der kun blev målt over en cirka en halv time gør, at der er en lidt større usikkerhed på virkningsgradsbestemmelsen. Resultaterne vist i Figur 25 viser at der blev opnået en uændret til let forøget el-virkningsgrad på maskinerne, samtidig med at metanemissionen blev reduceret. Den øgede virkningsgrad ligger helt i tråd med, at NO_x-emissionen går op. Det er normalt NO_x-emissionen, der sammen med bankegrænsen sætter grænsen for hvor høj virkningsgrad, der kan opnås.



Figur 25: Metantab og virkningsgrad under gennemførte forsøg.

Undervejs i de gennemførte test blev der foretaget en række observationer om øvrige forhold, som har omkostninger for driften. De kan opsummeres således:

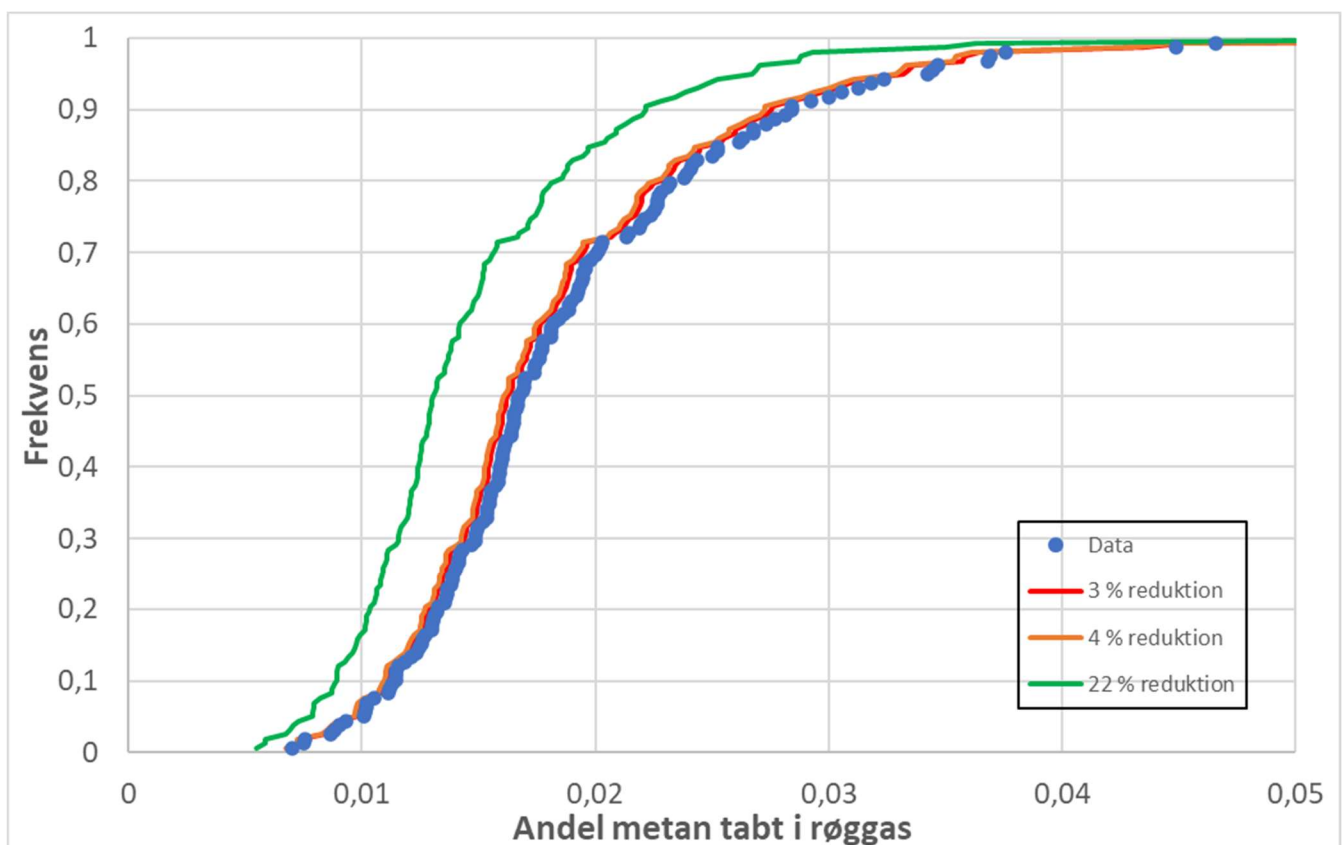
Motor justeret 10-20 kW ned i last på grund af høj ladelufttemperatur

- Lige på grænsen af motorbankning
- Stigende tændspænding

Ovenstående viser, at den opnåede metanemission ikke er helt gratis, og at maskinerne kommer til at køre på grænsen af det teknisk opnåelige. Fx vil den stigende tændspænding koste på levetiden på tændrørene, og forekomst af motorbankning være alvorligt for levetiden af maskinen.

6.2. Vurdering af mulighederne med primære tiltag

Såfremt man ønsker at overholde gældende NO_x -krav, er der som vist ovenfor grænser for, hvor store metanreduktioner der kan opnås. Såfremt man tager metanemissionsdata for alle de maskiner, der er med i denne undersøgelse og påtrykker dem den opnåelige emissionsreduktion, viser Figur 26, at man ved en 22 % reduktion vil kunne bringe yderligere godt 10 % point af maskinerne til at overholde et krav om maksimalt 1 % metantab, således at 15 % i alt vil kunne imødekomme kravet.

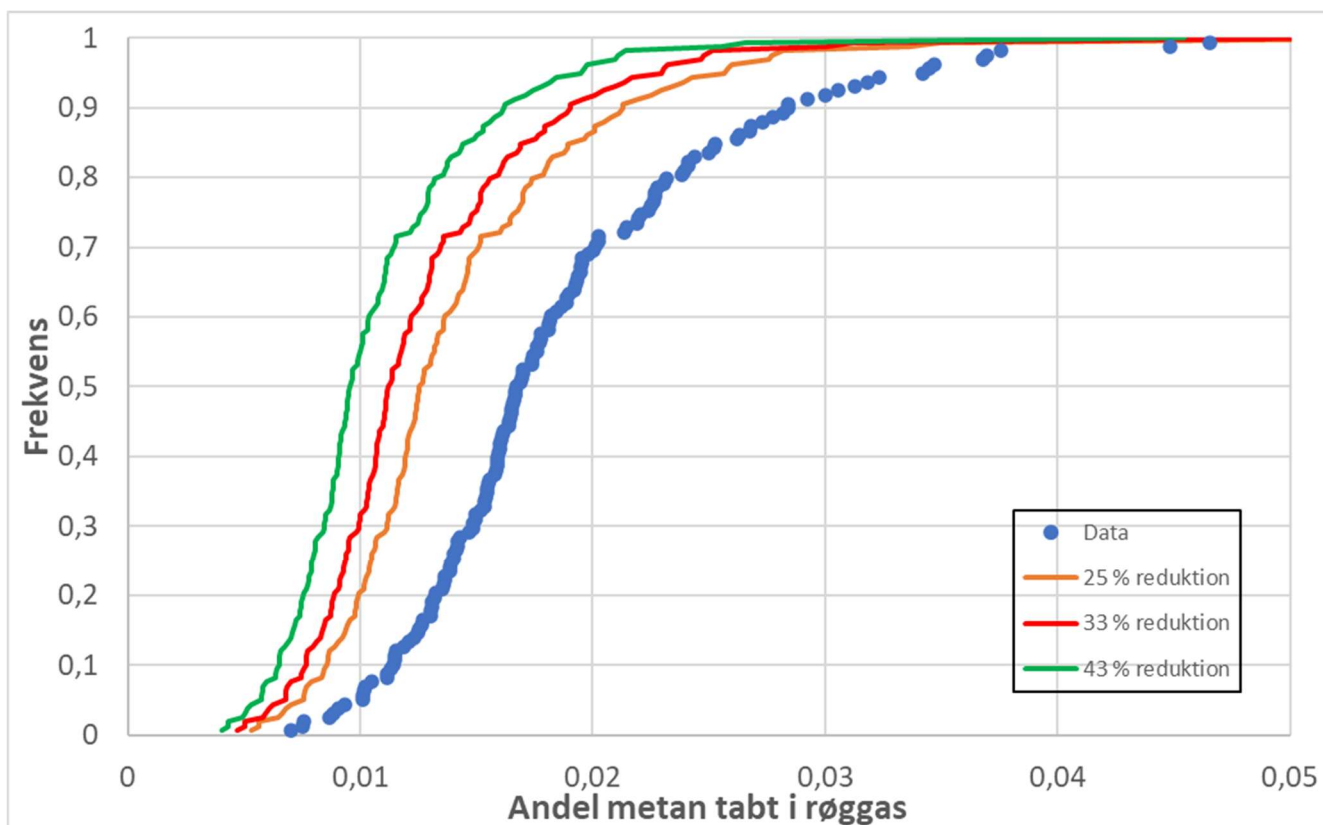


Figur 26: Forventet fordeling af metantab på biogasmotorerne i Danmark, såfremt de påtrykkes de opnåede emissionsreduktioner, som er opnået ved gennemførte felttest på eksisterende maskiner med hensyntagen til gældende NO_x -krav.

De 22 % reduktion er opnået på en maskine med rigtig god margin til NO_x-emissionskravet. Når der tages hensyn til det reguleringsrum for NO_x, som Figur 21 viser for den gennemsnitlige maskine, er det nok mere realistisk, at der i gennemsnit vil kunne opnås en metanreduktion ved ændret indregulering, som samlet set vil bringe 10 % af maskinerne inden for kravet om et maksimalt metantab på 1% af indfyret mængde.

Tillades NO_x-emissionen fra motoren at stige udover emissionskravet, kan der, som det vises på Figur 27, opnås, at mellem 20 og 50 % af maskinerne kan bringes til at overholde et krav om maksimalt metantab på 1 %. Dette vil så kræve NO_x-reduktion efterfølgende for at overholde kravene til endelig NO_x-emission fra anlægget.

Der vil fortsat være 50-80 % af maskinerne, der ikke med primære tiltag kan bringes ned under 1 % i metantab.



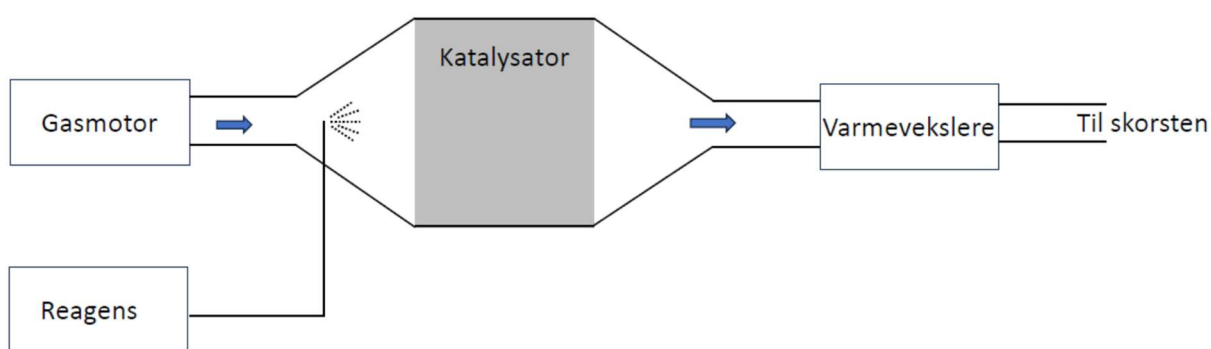
Figur 27: Forventet fordeling af metantab på biogasmotorerne i Danmark, såfremt de påtrykkes de opnåede emissionsreduktioner opnået ved gennemførte felttest på eksisterende maskiner uden hensyntagen til gældende NO_x-krav.

7. Sekundære metoder til reduktion af NO_x

For de biogasfyrede motorer i Danmark, vil en SCR-katalysator reelt være den eneste egnede sekundær teknologi til NO_x-reduktion. Hvis der findes enkelte støkiometriske motorer, kan der anvendes såkaldte trevejskatalysatorer, hvor overskydende brændsel anvendes til reduktionen af dannet NO_x, men denne teknologi kan ikke anvendes på lean-burn motorer.

7.1. Kort procesbeskrivelse af SCR-processen

Processen kan kort skitseres, som vist i Figur 28.



Figur 28: Principskitse af SCR-proces efter gasmotor.

Gasmotorrøggas ledes til en SCR-katalysator efter motoren, og før røggassen køles i vekslere, således at temperaturen er høj nok til, at processen kan forløbe. Før katalysatoren tilsættes røggassen et reduktionsmiddel (reagens), typisk ammoniak, ammoniakvand eller ureaopløsning. Reduktionsmidlet reagerer i katalysatoren med NO_x og danner frit nitrogen. Normalt kan der opnås stor NO_x-reduktion ved at benytte et tilstrækkeligt stort katalysatorelement og dosere reagens efter NO_x-niveau. Ved stor reduktionsgrad er der dog risiko for slip af ammoniak fra processen, hvilket normalt vil være uønsket. Til mindre anlæg som biogasmotorer anbefales det at benytte ureaopløsning som reduktionsmiddel, idet dette ikke giver samme problemstillinger med sikkerhed ved opbevaring som fx ammoniak. Ureaopløsninger er kommercielt tilgængelige i palletanke og går også under betegnelsen AdBlue, når produktet sælges fra tankstationer til fx NO_x-reduktion med SCR på dieselkøretøjer.

Det, at røggassen skal være varm og ledes til processen lige efter gasmotoren, kræver, at der skal ske ombygning på de eksisterende anlæg, her kan der være problemstillinger med fx pladsforhold, men disse berøres ikke yderligere i denne analyse, idet det kræver en konkret vurdering på hvert anlæg.

Processen angives af leverandørerne til ikke at være særlig følsom over for den i biogassen forekommende svovl, hvorimod forekomst af siloxaner helst skal undgås. Det vurderes, at motorleverandørerne har krav til siloxaner i biogas før biogassen anvendes i motoranlægget, idet siloxaner også er uønskede set fra et motorsynspunkt. SCR-katalysatorer angives af nogle katalysator- og motorleverandører at være anvendt på biogasanlæg i Tyskland uden problemer.

7.2. Økonomi for SCR anlæg

Der er på baggrund af oplysninger fra leverandører beregnet økonomi for tre typiske anlægsstørrelser. Priserne er baseret på oplysninger fra to leverandører af de rå katalysatorer samt oplysninger fra to leverandører af turn-key løsninger inklusive katalysatorelementer. For Turn-key anlæg er der til en vis grad tale om skøn, idet indbygningsomkostningerne kan variere betydeligt fra sted til sted. Leverandørerne af SCR-katalysatorløsningerne er DGC bekendt, men er blevet lovet anonymitet mod at deltage. Markedspriserne for selve katalysatorerne afhænger af anlægsstørrelsen

men var næsten ens for de fire leverandører. For turn-key leverandørerne er der en betydelig forskel i tilbudspriserne, dog således at den dyreste pris ser ud til at være mest komplet hvad angår fx nødvendigt måleudstyr, regulering og også en emissionsmåling til dokumentation ved idriftsættelse. Resultaterne fremgår af Tabel 2:

Tabel 2: CAPEX og OPEX for SCR-katalysatorer til danske biogasmotorer

DKK for CAPEX	500 kWe	1000 kWe	4.000 kWe
DKK/driftstime for OPEX	1.250 kW fyret	2.500 kW fyret	10.000 kW fyret
CAPEX, inkl.:			
• reagensdosering	325.000 til	420.000 til	825.000 til
• lager til reagens	1.500.000	1.750.000	3.150.000
• indbygning til katalysator			
• isolering			
• installation og idriftsættelse			
• første køb af katalysator			
OPEX, inkl.:			
• Forbrug af Ureaopløsning	8,19 til 11,82	15,54-19,83	59,66 til 81,55
• Levetidsforbrug af katalysator			

Der er for ovenstående OPEX regnet med en levetid på ca. 3 år for katalysatorerne, det er den forventede levetid ud fra driftserfaringerne med SCR på biogasanlæg i udlandet. Garanteret levetid er kortere. Noget af det, der kan forkorte levetiden, er forekomst af siloxaner. En leverandør har en grænseværdi på 3 ppb for siloxaner for at levetiden holder. Højere siloxanindhold vil forkorte levetiden på katalysatorelementerne.

For Ureaforbruget er der taget udgangspunkt i en høj reduktion af NO_x fra 500 til 100 mg/m³_n, og en markedspris for Ureaopløsning på 4.550 DKK/m³ /7/.

De angivne kapitalomkostninger skønnes at være ± 20 % og uden grund, fundamenter og evt. nødvendig udbygning af hus til installationen.

Som det ses af data, er det relativt dyrere at installere SCR-katalysatorer på de mindre anlæg end på de store anlæg. Driftsomkostningerne er næsten ens med 15-20 DKK pr. MWh el produceret. Det sidste skyldes, at omkostningen til reagens dominerer OPEX.

8. Sekundære metoder til reduktion af metan

Der kan ikke ved justering af motorerne til høj NO_x og efterfølgende SCR til NO_x-reduktion opnås en løsning for alle maskinerne installeret i Danmark. På disse øvrige maskiner vil det være nødvendigt at anvende en sekundær metode til reduktion af metanemissionen. Der er alene foretaget en screening af mulige tekniske løsninger, og de egnede/måske egnede skal kort omtales her:

Incinereringsløsning:

Ligesom for bortskaffelse af organiske opløsningsmidler fra fx en malingproduktion eller anden brug af organiske stoffer, kan der efter motoren installeres et incinereringsanlæg. Jenbacher tilbyder en sådan løsning til deres 1 MWe maskine. Løsningen går under betegnelsen Clean Air /8/. Der findes også danske erfaringer med Incinereringsanlæg, dog på et anlæg med naturgasmotorer /9/. Det vigtige er, at **løsningerne** ikke har for højt et tryktab, idet dette koster på virkningsgraden på motoren eller koster el til en sugetræksblæser. Det er nødvendigt at støttefyre et incinereringsanlæg, dels for at starte det op dels for at holde den centrale temperatur høj nok til at metanen kan omsættes.

Re-cooperative løsninger:

Det er vanskeligt med katalytiske løsninger at fjerne metanen, da denne vanskeligt omsættes ved de udstødstemperaturer, der er til rådighed efter en gasmotor. Der er over tiden udført flere forsøg med kombinationer af katalytiske løsninger sammen med varmegenvinding med varmevekslere. Et forsøgsanlæg blev omkring 2004 opsat på varmeværket i Rask Mølle /9/. Konklusionen var, at det var muligt at opnå metanreduktion, men løsningen blev aldrig udbredt på grund af høje omkostninger til den nødvendige varmeveksling (høje stålpriser).

Direkte katalytiske løsninger:

Der arbejdes fortsat med udvikling af direkte katalytiske løsninger, se fx /11/. Den her nævnte løsning er fortsat under udvikling, men en 70 % reduktion af metanemissionen vil være et stort fremskridt.

Udfordringen har været at udvikle katalysatorer, der kan arbejde ved de lave temperaturer i gasmotorrøggas, uden at katalysatorerne bliver forgiftet af svovlindholdet i røggassen. Katalysatorer baseret på ædelmetaller kan klare den lave temperatur, men de ældes hurtigt dels på grund af sintring dels på grund af svovlindholdet i naturgas /12/. Dette må derfor også formodes at være tilfældet for biogas, der normalt har et højere svovlindhold end naturgas.

Sammenfattende kan konkluderes, at incinereringsløsninger er teknisk modne. De er også forholdsvis store og dermed dyre anlæg.

9. Referencer

- /1/ Bekendtgørelse nr. 641 af 27/5 2023 fra Energistyrelsen vedr. emissioner af metan fra biogasanlæg
- /2/ Gasmotorbekendtgørelsen, Bekendtgørelse nr. 1473 af 12/12/2017
- /3/ Mellemstore fyr, Bekendtgørelse 1535 af 9/12/2019
- /4/ Skats refusion af afgifter for metan emission efter lov 722 af 25 juni 2010, se: <https://info.skat.dk/data.aspx?oid=1948481>
- /5/ Emissionskortlægning for decentral kraftvarme 2007, Delrapport 4, april 2010. ISBN 978-87-7795-326-2
- /6/ Energiproducenttællingen 2019-21 for biogasmotorer. Oplyst af Energistyrelsen
- /7/ Markedspris Urea opløsning primo december 2023, se fx www.superolie.dk
- /8/ <https://www.clarke-energy.com/gas-engines/clair/>
- /9/ <https://energiforskning.dk/projekter/nordborg-kraftvarmevaerk-ic-anlaeg>
- /10/ <https://energiforskning.dk/en/node/14337> (Rask Mølle, RECCAT)
- /11/ MAN ES pressemeddelelse 20. november 2023: "Neues Projekt zielt auf signifikante Reduzierung des Methanschlupfs bei Viertakt-Motoren"
- /12/ <https://energiforskning.dk/projekter/reduktion-luftforurening-fra-naturgasmotorer-til-kraft-varmeproduktion>

Bilag

Resultater fra gennemførte test med ændret indstilling, TEST 1, TEST 2 og TEST 3.

Støtteværktøj til fastlæggelse af grænseværdi.

Målinger af metanemission fra biogasmotorer, test 1

DGC har udført måling af metan- og NO_x-emission for en biogasmotor.

Der er udført målinger ved forskellige motorindstillinger med henblik på at undersøge sammenhængen mellem metan- og NO_x-emission samt undersøge muligheden for at bringe metanemissionen under 1 % af indfyret effekt.

Målingen er udført 23. oktober 2023 i samarbejde med motorleverandøren.

Målt CH ₄ ppm	Målt NO _x mg/m ³ n ^{*)}	Tænding °	CH ₄ -slip % indfyret
929	165	16	1,30
819	289	16	1,11
726	421	16	0,96
1.106	165	18	1,57
950	297	18	1,32
846	433	18	1,16

*) Reference for NO_x er 15%-vol. O₂.

Den aktuelle motor har en grænseværdi for NO_x på 190 mg/m³n, ref. 15 % O₂ på grund af motorens effekt og idriftsættelsestidspunkt.

13.12.2023

Dansk Gasteknisk Center

Steen D. Andersen
Maskinmester, måletekniker

Målinger af metanemission fra biogasmotorer, test 2

DGC har udført måling af metan- og NO_x-emission for en biogasmotor.

Der er udført målinger ved forskellige motorindstillinger med henblik på at undersøge sammenhængen mellem metan- og NO_x-emission samt undersøge muligheden for at bringe metanemissionen under 1 % af indfyret effekt.

Målingen er udført 26. oktober 2023 i samarbejde med motorleverandøren.

Målt CH ₄ ppm	Målt NO _x mg/m ³ n ^{*)}	Tænding °	CH ₄ -slip % indfyret
1315	185	21	1,98
1105	420	21	1,61
940	735	21	1,33
1.261	148	18	1,88
1.078	301	18	1,55
916	543	18	1,28

*) Reference for NO_x er 15 %-vol. O₂.

Den aktuelle motor har en grænseværdi for NO_x på 190 mg/m³n, ref. 15 % O₂ på grund af motorens effekt og idriftsættelsestidspunkt.

13.12.2023

Dansk Gasteknisk Center

Steen D. Andersen

Maskinmester, måletekniker

Målinger af metanemission fra biogasmotorer, test 3

DGC har udført måling af metan- og NO_x-emission for en biogasmotor.

Der er udført målinger ved forskellige motorindstillinger med henblik på at undersøge sammenhængen mellem metan- og NO_x-emission samt undersøge muligheden for at bringe metanemissionen under 1 % af indfyret effekt.

Målingen er udført 1. november 2023 i samarbejde med motorleverandøren.

Målt CH ₄ ppm	Målt NO _x mg/m ³ n ^{*)}	Tænding °	CH ₄ -slip % indfyret
991	101	24	1,58
842	204	24	1,32
602	336	24	0,90
972	94	22	1,53
786	197	22	1,21
599	462	22	0,90

*) Reference for NO_x er 15 %-vol. O₂.

Den aktuelle motor har en grænseværdi for NO_x på 375 mg/m³n, ref. 15 % O₂ på grund af motorens effekt og idriftsættelsestidspunkt.

13.12.2023

Dansk Gasteknisk Center

Steen D. Andersen

Maskinmester, måletekniker

Måleudstyr og -metoder

Målingerne er udført med samme måleudstyr og efter samme retningslinjer (Miljøstyrelsens metodeblade) som ved akkrediterede målinger.

O₂: MEL-05:2020, Bestemmelse af koncentrationer af ilt (O₂) i strømmende gas.
Reference DS/EN 14789:2017
Målingerne er udført med paramagnetisk iltmåler, SICK S710, DGC-nr. 00504.

NO_x: MEL-03:2017, Bestemmelse af koncentrationer af kvælstofoxider (NO_x) i strømmende gas.
Reference DS/EN 14792:2017
Målingerne er udført med chemiluminiscens-analysator fra Eco Physics, DGC-nr. 00307.

CH₄: MEL-07:2014, Bestemmelse af koncentrationen af gasformig TOC (total organisk karbon) i strømmende gas (flammeionisationsdetektion).
Reference DS/EN 12619:2013
Målingerne er udført med M&A Thermo FID-analysator, DGC-nr 00607 og Signal 320 NMVOC-cutter, DGC-nr 00615.

Værktøj til støtte ved fastsættelse af grænseværdi for metan

På baggrund af de opnåede resultater i undersøgelsen er der udarbejdet tre kurver, der kan støtte Energistyrelsen og Miljøstyrelsen ved fastlæggelse af grænseværdi for metanemission fra biogasmotorer.

De gives to eksempler på, hvorledes de tre kurver kan benyttes:

Fastlægges fx en grænseværdi på 2 % metan, aflæses på Figur B1, at ca. 70 % af de eksisterende maskiner kan overholde kravet.

Figur B2 viser, at med en optimal indregulering af maskinerne er det bedste bud, at 75 % (70-85 % interval) af de eksisterende maskiner kan overholde et krav om maksimalt 2 % metantab samtidig med overholdelse af NO_x-kravet.

Figur B3 viser, at et krav om maksimalt 2 % metantab kan overholdes af ca. 85-95 % af maskinerne med lige godt 90 % som bedste bud, hvis der samtidig installeres NO_x-rensning.

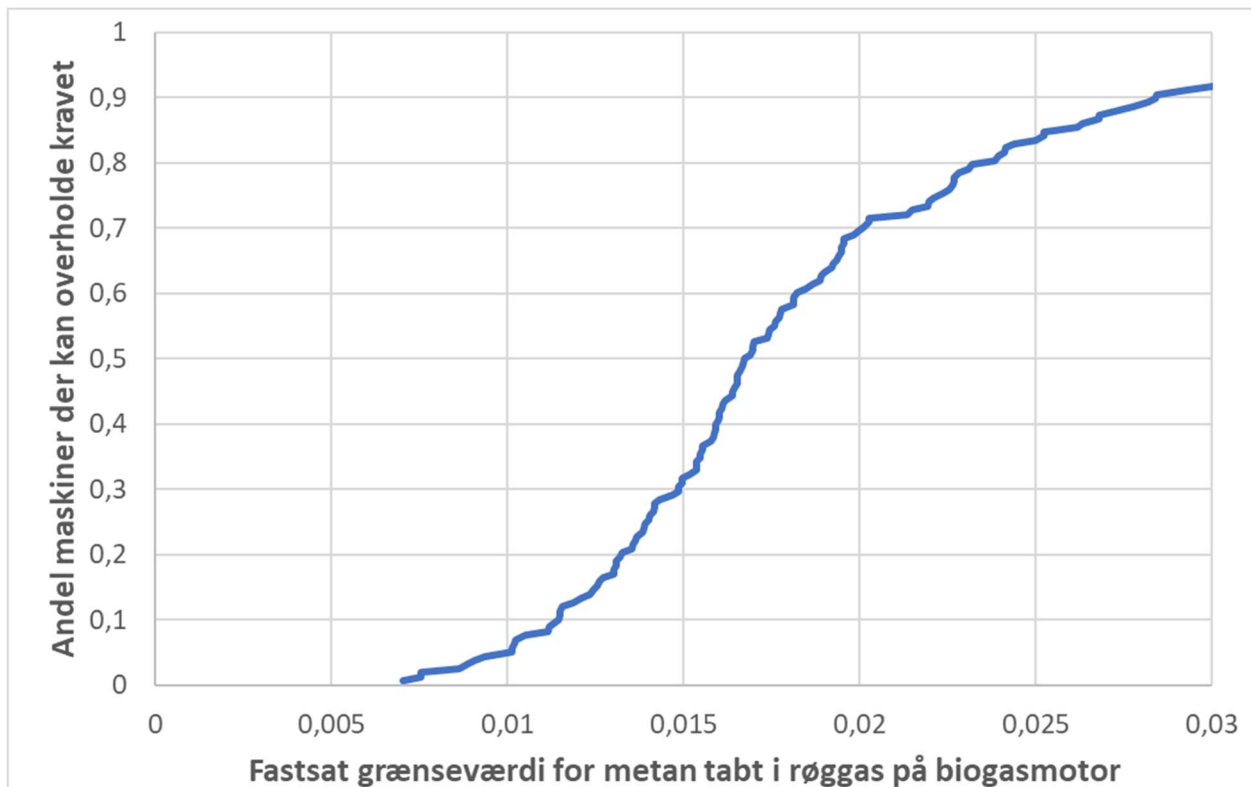
Samlet kan således for 2 % grænseværdi for metantab konkluderes, at 70 % af maskinerne kan klare det i dag, og yderligere 5 % kan klare det efter optimal indregulering. Lige godt yderligere 15 % vil kunne bringes til at overholde kravet ved installation af NO_x-rensning. Der vil være lige under 10 % af maskinerne, der ikke kan bringes til at overholde kravet alene med NO_x-rensning.

Fastlægges fx en grænseværdi på 1,5 % metan, aflæses på Figur B1, at ca. 30 % af de eksisterende maskiner kan overholde kravet.

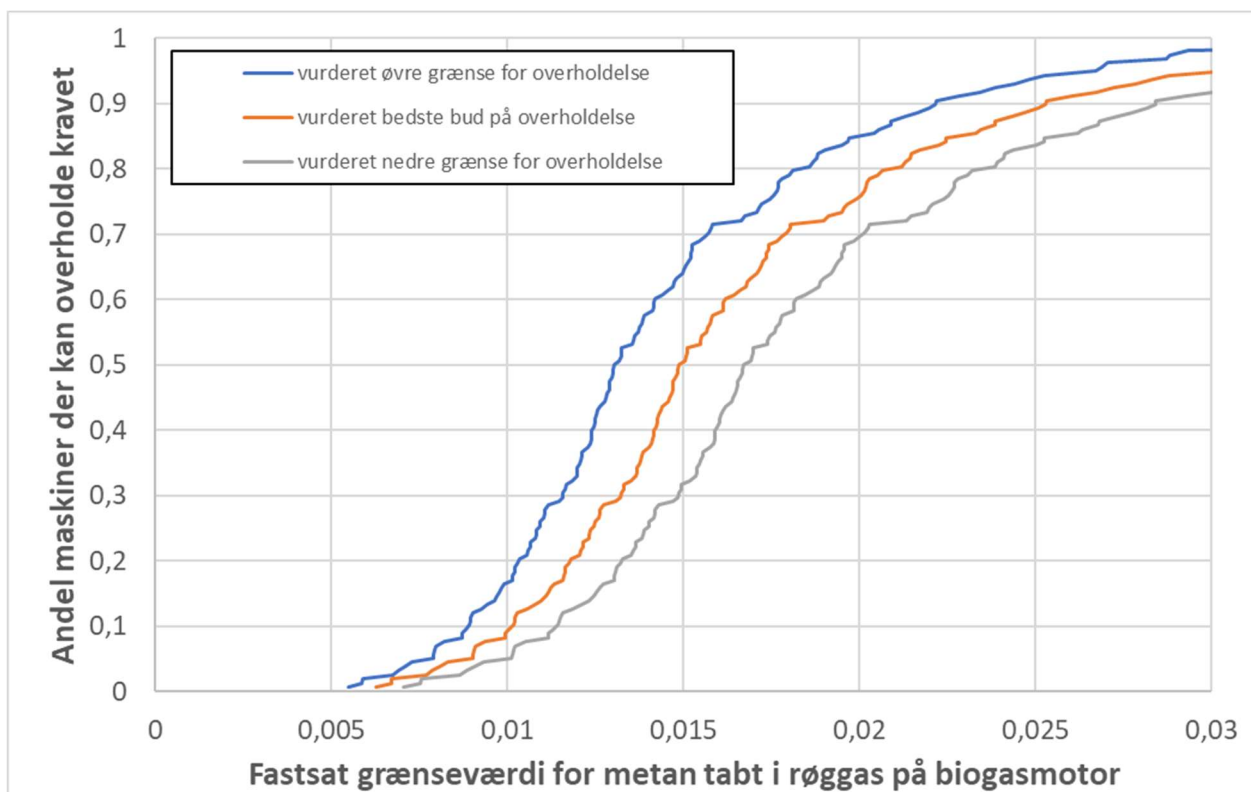
Figur B2 viser, at med en optimal indregulering af maskinerne er det bedste bud, at 50 % (30-65 % interval) af de eksisterende maskiner kan overholde et krav om maksimalt 1,5 % metantab samtidig med overholdelse af NO_x-kravet.

Figur B3 viser, at et krav om maksimalt 1,5 % metantab kan overholdes af ca. 70-85 % af maskinerne med lige godt 75 % som bedste bud, hvis der samtidig installeres NO_x-rensning.

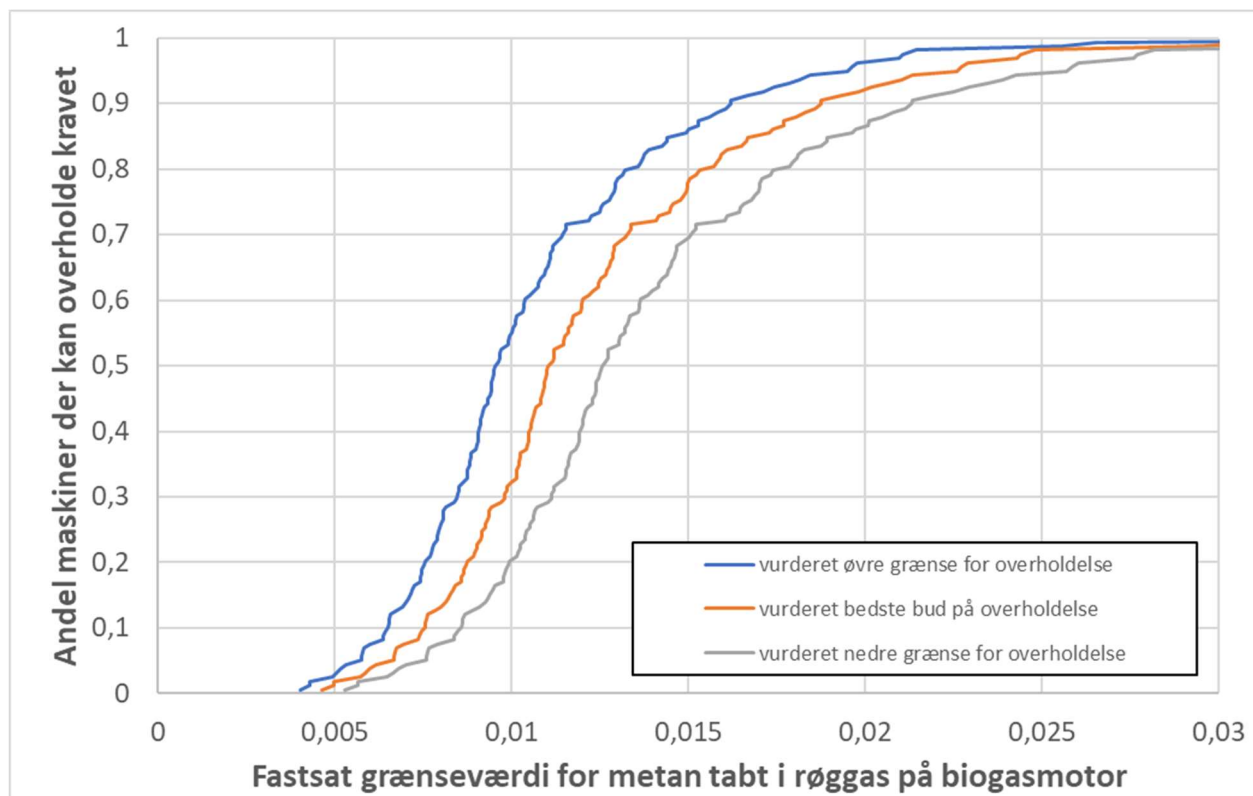
Samlet kan således for 1,5 % grænseværdi for metantab konkluderes, at 30 % af maskinerne kan klare det i dag og yderligere 20 % kan klare det efter optimal indregulering. Lige godt yderligere 25 % vil kunne bringes til at overholde kravet ved installation af NO_x-rensning. Der vil være lige under 25 % af maskinerne, der ikke kan bringes til at overholde kravet alene med NO_x-rensning.



Figur B1: Viser hvor mange maskiner, som med den eksisterende driftstilstand vil kunne overholde et grænseværdikrav for metan og samtidig overholder NO_x-kravet.



Figur B2: Viser hvor mange maskiner, som med optimal indregulering vil kunne overholde et grænseværdikrav for metan og samtidig overholder NO_x-kravet.



Figur B3: Viser hvor mange maskiner, som med optimal indregulering vil kunne overholde et grænseværdikrav for metan. Her indreguleres til højere NO_x end grænseværdikravet, og dermed kræves fx SCR til NO_x -reduktion.