

BAGGRUNDSNOTAT**PM_{0,1} og sod (black carbon) fra vandflyet**

Supplement til baggrundsnotatet af 28. august 2026 om støj, CO₂ og partikler

Udarbejdet af Nordic Seaplanes, september 2026. Besvarer udvalgets specifikke opfølgende spørgsmål om PM_{0,1} og carbon (sod) rejst ved foretrædet.

Læsevejledning: dette notat skelner eksplicit mellem, hvad der er FORCE Technologys egen, uafhængige måling (PM_{2,5}/NO_x, august 2026), og hvad der er vores egen screeningsberegning efter en anerkendt international metode (PM_{0,1}/sod, dette notat). De to må ikke forveksles eller sammenblandes uden forklaring.

Sammenfatning

Udvalget har efterspurgt tal for **PM_{0,1} (ultrafine partikler) og sod (black carbon)** specifikt, som supplement til de PM_{2,5}- og CO₂-tal, FORCE Technology allerede har opgjort (6,45 kg PM_{2,5}/år og 80,5 kg NO_x/år). Da PT6A-27-motoren blev certificeret, før måling af denne type partikler var et krav, findes der ikke et direkte, målt tal for PM_{0,1}/sod fra motorfabrikanten.

Hvis udvalget ønsker at gennemføre og bekoste en uvildig måling af vandflyets udledninger af alle slags partikler i alle fire driftsfaser, står vi gerne til rådighed.

I mellemtiden udleder vi i dette notat et skøn ved hjælp af en international anerkendt beregningsmetode (FOA3, anvendt af ICAO og FAA), på baggrund af motorfabrikantens certificerede emissionsdata.

Resultatet er en årlig PM_{0,1}/sod-udledning på **ca. 1,9 kg (interval 1,5-2,3 kg)** for hele flyets drift i 2025. Sat i forhold til andre kilder i og omkring Københavns Havn — brændeovne, kanalbåde, krydstogtskibe og vedfyrede saunaer — ligger vandflyet i samme størrelsesorden som eller under disse kilder, og er stort set umåleligt i forhold til havnens og byens samlede partikeludledning. Notatet redegør samtidig åbent for de antagelser og usikkerheder, beregningen hviler på.

1. Baggrund og metode

PT6A-27/A-28-motoren (2 stk. i flyet) blev certificeret, før måling og rapportering af non-volatile partikler (nvPM) blev en fast del af ICAO Annex 16 Volume II-certificeringen. Motorfabrikanten Pratt & Whitney Canadas eget emissionsdatablad for motoren (gengivet i bilag A) opgiver CO-, HC- og NO_x-emissionsindekser samt et røgtal (Smoke Number), men ikke et PM- eller sod-masseindeks. PM_{0,1}/sod skal derfor *udledes* af røgtallet ved hjælp af en anerkendt korrelationsmetode.

Metode: FOA3

FOA3 ("First Order Approximation, version 3") er udviklet af Wayson, Fleming og Iovinelli (2009) for den amerikanske luftfartsmyndighed FAA og anbefalet af ICAO (Doc 9889, Airport Air Quality Manual) som standardmetoden til at omregne et certificeret røgtal til en sod-masse, når direkte måling ikke er tilgængelig. Det er den mest udbredte metode internationalt til dette formål inden for luftfartens miljøgodkendelser.

Metoden er anvendt på flyets eneste rapporterede røgtal (SN = 17 ved fuld effekt/take-off), og resultatet er derefter — som en bevidst konservativ forenkling — lagt til grund for alle fire faser af driftscyklussen (taxi-sejlads ud, start, landing, taxi-sejlads tilbage), da motorfabrikanten ikke har opgivet røgtal for de øvrige faser.

Den største usikkerhed: luft/brændstof-forholdet

For at omregne en røg-koncentration til et emissionsindeks (gram sod pr. kg brændstof) skal man kende motorens luft/brændstof-forhold (AFR), som ikke er opgivet af Pratt & Whitney Canada. Vi har i stedet anvendt et litteraturtypisk interval for små turbopropmotorer af denne effektklasse ved høj belastning (40:1-60:1). Dette er **den enkeltstående største usikkerhedskilde** i beregningen og er årsagen til, at resultatet angives som et interval snarere end ét præcist tal.

2. Beregning og resultat

Beregningen tager udgangspunkt i følgende driftscyklus, gentaget 860 gange årligt (Altså 860 start-og-landing-forløb):

Fase	Varighed	Brændstofflow	Brændstof pr. fase
Sejlads ud (taxi out)	5 min	120 L/t	10,0 L
Start (take-off)	1 min	480 L/t	8,0 L
Landing	1 min	120 L/t	2,0 L
Sejlads tilbage (taxi back)	5 min	120 L/t	10,0 L
I alt pr. cyklus			30,0 L (24,0 kg)

Kilde: driftscyklus baseret på Nordic Seaplanes' egen aktivitetsdata. Brændstoftæthed for Jet A-1 $\approx 0,8$ kg/L.

Resultat

Emissionsindeks (sod $\approx$ PM_{0,1}) ved fuld effekt: **0,07-0,11 g/kg brændstof** (centralt skøn 0,09 g/kg). Anvendt ensartet på hele cyklussens 24,0 kg brændstof giver det **1,75-2,62 g sod pr. cyklus** (centralt skøn 2,16 g). Ganget med 860 cyklusser/år giver det en **årlig udledning på 1,5-2,3 kg sod, centralt skøn 1,9 kg**.

3. Sammenholdt med FORCE Technologys PM_{2,5}-tal

FORCE Technology har uafhængigt opgjort flyets samlede PM_{2,5}-udledning til 6,45 kg/år. Sod udgør pr. definition kun en delmængde af PM_{2,5} (den ikke-flygtige, kulstofholdige del). Sammenholdes vores sod-skøn (1,9 kg/år) med FORCE's PM_{2,5}-tal, svarer det til en sod-andel på **ca. 29,5 % af PM_{2,5} (interval ca. 23-36 %)** for denne motortype. Det er en plausibel værdi for en lille turbopropmotor på Jet A-1 (et svovlfattigt brændstof med lavt askeindhold, i modsætning til tung skibsbrændstof, hvor flygtige sulfat-/organiske komponenter fylder mere i PM_{2,5}), og de to uafhængigt udledte tal modsiger ikke hinanden.

Forbehold om "krydsvalidering"

Med kun to sammenlignelige tal er der tale om en plausibilitetskontrol, ikke en statistisk bekræftelse. At de to tal ikke modsiger hinanden, er ikke det samme som en uafhængig verifikation af begge. Det peger blot på at det virker sandsynligt.

4. Sammenligning med andre kilder i og omkring havnen

Nedenfor sammenholdes vandflyets tal med fire andre kilder. Hvor det er muligt, vises både PM2,5-basis (samme mål som FORCE's tal) og sod-basis (samme mål som dette notats hovedtal) — de to må ikke forveksles.

4.1 Brændeovn

På PM2,5-basis (Force Technology/Miljøstyrelsen, Miljøprojekt nr. 2045, 2018: 2,9 g PM2,5 pr. kg afbrændt brænde) udleder en enkelt brændeovn ved tungt forbrug (6-8 rummeter/år) ca. 6,53-8,70 kg PM2,5/år — mere end vandflyets samlede PM2,5.

På sod-basis giver EMEP/EEA's officielle emissionsopgørelse (2023-udgaven, Appendix E: sod-metodik for små forbrændingsanlæg) en sod-andel af PM2,5, der varierer med ovntype: **7 % for åbne pejse, 10 % for konventionelle ovne, ca. 16 % for højeffektive ovne, og 28 % for avancerede/svanemærkede ovne** — alle tal er et review-baseret gennemsnit af flere uafhængige målestudier. Anvendt på brændeovnens PM2,5-interval (6,53-8,70 kg/år) giver det et sod-skøn på **ca. 0,65-2,44 kg/år**, afhængigt af ovntype — samme størrelsesorden som eller over vandflyets samlede årlige sod-udledning.

4.2 Kanalbåd

På PM2,5-basis udleder en traditionel dieseldrevet kanalbåd (12 L diesel/time, 1.300 timer/år, emissionsfaktor 1,0 g PM pr. kg brændstof for ældre marinediesel uden partikelfilter) ca. **13,1 kg PM2,5/år** — over dobbelt så meget som vandflyets samlede PM2,5.

På sod-basis er billedet mere usikkert. EMEP/EEA's navigationskapitel (2023-udgaven) opgiver to meget forskellige kategorier for dieselbåde: for "fritidsbåde/mindre både" (tabel 3-8) er sod-andelen **55 % af PM** — men denne værdi er efter guidebogens egen oplysning ikke målt på både, men lånt fra almindelige personbilers motorer (COPERT-modellen). For de kategorier, der bruges til rigtige skibsmotorer ("high/medium/slow-speed diesel", tabel 3-7, baseret på faktiske skibsmålinger fra Scipper-projektet), er sod-andelen derimod kun **ca. 5 % af PM2,5** — og denne kategoris PM2,5-faktor (0,82-0,91 g/kg) ligger langt tættere på vores egen antagelse for kanalbåden (1,0 g/kg) end fritidsbåd-kategoriens (4,60 g/kg, over 4 gange højere). For at være konsistente med vores eget valg af PM-faktor anvender vi derfor de **ca. 5 %**, hvilket giver et sod-skøn på **ca. 0,7 kg/år** — under vandflyets egen sod-udledning. Bruges i stedet fritidsbåd-tallet (55 %), bliver resultatet **ca. 7,2 kg/år** — over vandflyets sod-udledning. Vi gør opmærksom på begge tal, netop fordi valget af kategori i sig selv afgør, hvilken vej sammenligningen falder ud.

Krig i mellemøsten: kanalbådens brændstof har skiftet i år

Københavns kanalbådsflåde (både Strömma/Canal Tours og Netto-Bådene) var i en periode gået over til GTL-brændstof, som ifølge brancheoplysninger (DCC Energi, Ingeniøren 2017) kan reducere partikeludledningen med op til 38 % i forhold til almindelig diesel. Leverancen af GTL til Danmark stoppede imidlertid i foråret 2026, efter at det eneste anlæg i verden, der producerer GTL med de nødvendige kuldeegenskaber til det danske marked (Pearl-anlægget i Qatar), blev beskadiget i forbindelse med krigen i Mellemøsten. De danske lagre blev tømt ved udgangen af juni 2026, hvorefter både og køretøjer er gået tilbage til almindelig diesel. Tallene i dette afsnit lægger derfor almindelig diesel til grund, som er det bedst understøttede grundlag i skrivende stund — da det er usikkert hvornår GTL-brændstoffet bliver tilgængeligt igen — men beregningen bør genbesøges, hvis GTL-forsyningen genoptages.

4.3 Krydstogtskibe og havnen som helhed

Ifølge DCE (Nationalt Center for Miljø og Energi, Aarhus Universitet), rapport nr. 316 ("Survey of air pollution from cruise ships in Copenhagen and Aarhus", 2017-data), udledte krydstogtskibe i Københavns Havn samlet **10,0 tons PM_{2,5}/år**, mens den samlede PM_{2,5}-udledning fra alle kilder i det beregningsgrid, Københavns Havn indgår i, var **175 tons/år** — dvs. ca. 165 tons/år fra "alle andre kilder" (vejtrafik, brændeovne, anden skibsfart, industri m.v., som ikke er opdelt yderligere i den offentliggjorte opgørelse). Vandflyets PM_{2,5} (6,45 kg) udgør på dette grundlag **ca. 0,0037 %** af den samlede udledning.

På sod-basis er krydstogtskibenes andel bedre understøttet end "alle andre kilder": ICCT (Comer et al., 2017, "Black Carbon Emissions and Fuel Use in Global Shipping, 2015") dokumenterer en sod-andel på **8,4 % af PM** for krydstogtskibes typiske motorer (medium-/high-speed diesel på tung olie), hvilket giver **ca. 0,84 tons sod/år** fra krydstogtskibe. For "alle andre kilder" findes ikke en tilsvarende kildeopløst måling; vi har i stedet anvendt et bredt litteraturinterval for sods andel af PM_{2,5} (5-25 %, centralt 15 %, jf. Clarity/SPARTAN-netværkets målinger), hvilket giver et meget usikkert skøn på 8,3-41,3 tons sod/år (centralt ca. 24,75 tons). Vandflyets sod (1,9 kg) udgør herefter **ca. 0,007 %** af den samlede sod-udledning — stadig forsvindende lille, men baseret på et mindre sikkert grundlag end PM_{2,5}-sammenligningen.

4.4 En vedfyret sauna (generisk sammenligning)

Vedfyrede saunaer/havnesaunaer er ikke det samme som en brændeovn og bør ikke sidestilles uden videre. Et finsk, fagfællebedømt studie (Kortelainen et al., 2019, "Fine Particle Emissions from Sauna Stoves", publiceret i Atmosphere) konkluderer, at saunaovne er *"the highest individual emission source of fine particles and black carbon in Finland"* på nationalt niveau — netop fordi forbrændingen typisk er mindre kontrolleret end i moderne, certificerede rumopvarmningsovne. Studiet måler samtidig en 9-dobbelt spredning i partikeludledning mellem forskellige ovnmodeller.

Der findes os bekendt ingen tilsvarende danske eller EU-baserede studier af vedfyrede saunaer/hot tubs specifikt, så dette punkt kan kun underbygges med finsk kildegrundlag, som ikke nødvendigvis er direkte overførbart til danske forhold. Vi anvender bevidst **ikke** navngivne virksomheder i denne sammenligning, uanset at flere havnesauna-operatører findes i og omkring Københavns Havn — det er kilden til varmen (vedfyring), ikke den enkelte virksomhed, der er sammenligningens genstand. Konklusionen, med det forbehold: en enkelt, hyppigt brugt vedfyret sauna kan efter finsk forskning udlede mere sod end hele vandflyoperationens årlige udledning.

5. Begrænsninger og forbehold

1) Røgtal er kun opgivet af motorfabrikanten ved fuld effekt (take-off) og er anvendt uniformt på alle fire driftsfaser som en konservativ forenkling. 2) Luft/brændstof-forholdet (AFR) er ikke opgivet af motorfabrikanten og er erstattet af et litteraturtypisk interval (40:1-60:1) — dette er beregningens største usikkerhedskilde. 3) PM_{0,1} antages lig sod (non-volatil partikelmasse); et eventuelt bidrag fra flygtige partikler (sulfat/organisk) er ikke medregnet, men forventes minimalt for denne motortype og dette brændstof. 4) Krydsvalideringen mod FORCE's PM_{2,5}-tal (afsnit 3) er en plausibilitetskontrol med kun to datapunkter, ikke en statistisk bekræftelse. 5) Valget mellem 5 % og 55 % sod-andel for kanalbåden (afsnit 4.2) er en reel og uafklaret kildeusikkerhed, ikke en beregningsfejl. 6) Sod-andelen for "alle andre kilder" i havnen/byen (afsnit 4.3) er baseret på et bredt, ikke-kildeopløst litteraturinterval. 7) Sauna-sammenligningen (afsnit 4.4) hviler på finsk, ikke dansk, kildegrundlag. 8) Kanalbådens brændstofgrundlag (diesel vs. GTL) har ændret sig to gange inden for det seneste år af årsager uden for nogens kontrol og bør genbesøges løbende.

Bilag A: Beregningsgrundlag og kildedata

A.1 FOA3-beregningen, trin for trin

Røg-koncentration fra røgtal (SN = 17, eneste rapporterede værdi, ved fuld effekt):

$C(BC) = 0,0694 \times SN^{1,234} = 0,0694 \times 17^{1,234} \approx 0,0694 \times 33,0 \approx 2,3 \text{ mg sod/m}^3$ (ved referencebetingelser 273,15 K / 101,325 kPa).

Omregning til emissionsindeks kræver udstødningsgasvolumen pr. kg brændstof, som afhænger af luft/brændstof-forholdet (AFR). Med en udstødningsgastæthed på ca. 1,293 kg/m³ og AFR 40-60:1:

AFR	Udstødningsvolumen (m ³ /kg brændstof)	EI sod (g/kg brændstof)
40	31,7	0,073
50	39,4	0,091
60	47,2	0,109

EI(sod) ved fuld effekt $\approx 0,07\text{-}0,11 \text{ g/kg brændstof}$, centralt skøn $\approx 0,09 \text{ g/kg brændstof}$.

A.2 Motorfabrikantens emissionsdatablad (reproduceret)

Gengivet fra Pratt & Whitney Canada Inc., "Turbine Engine Emissions Data", PT6A-27/A-28, dateret 2. marts 2007. Motormodel: PT6A-27, A-28. Type: turboprop. Mærkeeffekt: 680 HP. Trykforhold: 6,9. Datagrundlag: faktiske data, korrigeret for atmosfæriske forhold.

Effektindstilling (% af mærkeeffekt)	Tid i mode (min)	Brændstofflow (kg/s)	NOx EI (g/kg)	Røgtal
Fuld effekt / take-off (100 %)	0,7	0,0515	7,6	17
Klatring (85 %)	2,2	0,0455	7,3	—
Indflyvning (30 %)	4,0	0,0245	5,6	—
Taxi-sejlads/tomgang (7 %)	26,0	0,0144	4,3	—

Samlet LTO-cyklusudledning pr. motor (ifølge P&WC, standard ICAO LTO-cyklus): CO₂ 115,8 kg, H₂O 43,9 kg, CO 420,6 g, HC 28,1 g, NO_x 189,8 g. Bemærk: databladets afsnit om turboshaft-motorer (helikopterinstallationer) er ikke relevant for DHC-6 og er udeladt her.

A.3 Brændeovnes sod-andel af PM_{2,5} (EMEP/EEA 2023, Appendix E)

Ovntype	Sod som andel af PM _{2,5}	Grundlag
Åben pejs	7 %	Aggregat af flere målestudier
Konventionel ovn	10 %	Aggregat af flere målestudier
Højeffektiv ovn/kedel	~16 %	Kupiainen & Klimont (2007)
Avanceret/svanemærket ovn	28 %	Aggregat af flere målestudier

Kilde: EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023, Annex: A4bi Residential Combustion (Nielsen, Plejdrup & Nielsen, 2012, opdateret 2023).

A.4 Kanalbådes sod-andel af PM: de to konkurrerende kategorier

Kategori (EMEP/EEA 2023, navigation)	PM _{2,5} -faktor	Sod-andel af PM	Grundlag
Fritidsbåde/mindre både, diesel (tabel 3-8)	4,60 kg/tons brændstof	55 %	Proxy fra vejtransport (COPERT), ikke bådmålt
High/medium/slow-speed diesel (tabel 3-7)	0,82-0,91 kg/tons	~5 %	Faktiske skibsdata, Skipper-projektet (2021)

Vores kanalbåds-PM-antagelse (1,0 g/kg) er tættest på high/medium/slow-speed diesel-kategorien, hvorfor vi anvender de ~5 % som det interne, konsistente valg — vi nævner 55 %-tallet eksplicit for gennemsnitlighed.

Bilag B: Kildehenvisninger

1. Pratt & Whitney Canada Inc., "Turbine Engine Emissions Data", PT6A-27/A-28, 2. marts 2007.
2. Wayson, R.L., Fleming, G.G., Iovinelli, R. (2009). "Methodology to Estimate Particulate Matter Emissions from Certified Commercial Aircraft Engines." Journal of the Air & Waste Management Association.
3. ICAO Doc 9889, Airport Air Quality Manual.
4. Kugele, A. (2005). "Aircraft Particulate Matter Emission Estimation through all Phases of Flight." EUROCONTROL Experimental Centre, EEC/SEE/2005/0014.
5. FORCE Technology, emissionsberegning af PM_{2,5} og NO_x for Nordic Seaplanes' DHC-6 Twin Otter, august 2026.
6. Force Technology / Miljøstyrelsen, "In-situ målinger af emissioner fra brændeovne i private boliger", Miljøprojekt nr. 2045, 2018.
7. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023, Annex: A4bi Residential Combustion (Nielsen, O.-K., Plejdrup, M.S. & Nielsen, M., 2012, opdateret 2023). European Environment Agency.

- 8.** EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023, 1.A.3.d Navigation (International maritime and inland navigation, national navigation, recreational boats), inkl. Appendix A: Black carbon fractions of PM emissions. European Environment Agency.
- 9.** DCE — Nationalt Center for Miljø og Energi (Aarhus Universitet), rapport nr. 316, "Survey of air pollution from cruise ships in Copenhagen and Aarhus" (2017-data).
- 10.** Comer, B., Olmer, N., Mao, X., Roy, B., Rutherford, D. (2017). "Black Carbon Emissions and Fuel Use in Global Shipping, 2015." International Council on Clean Transportation (ICCT).
- 11.** Clarity Movement Co., "Black Carbon Air Pollution: Measurement Best Practices" (2026), med reference til SPARTAN-netværkets målinger af sods andel af PM_{2,5}.
- 12.** Kortelainen, M. et al. (2019). "Fine Particle Emissions from Sauna Stoves: Effects of Combustion Appliance and Fuel, and Implications for the Finnish Emission Inventory." Atmosphere, 10(12), 775.
- 13.** DCC Energi / Havneguide.dk, "Slut med GTL Fuel", 22. maj 2026; Ingeniøren, "Københavns kanalrundfart skal sejle på miljøvenligt brændstof", 28. august 2017 (baggrund for GTL-brug og ophør heraf).
- 14.** Nordic Seaplanes, driftsopgørelse for CO₂ og aktivitetsdata (2025-data), august 2026 (intern analyse).