



Det Nationale Forskningscenter
for Arbejdsmiljø

Elementært kulstof og PAH under Asfaltarbejde (EPA) – kilder og eksponeringer i arbejdsmiljøet



Jakob Klenø Nøjgaard, Merve Polat og Keld Alstrup Jensen

Det Nationale Forskningscenter for Arbejdsmiljø, København 2026

Slutrapport til Arbejdsmiljøforskningsfonden

Titel Elementært kulstof og PAH under Asfaltarbejde (EPA)
 - kilder og eksponeringer i arbejdsmiljøet

Forfattere Jakob Klenø Nøjgaard, Merve Polat og Keld Alstrup Jensen
Grafik Merve Polat
Udgiver Det Nationale Forskningscenter for Arbejdsmiljø (NFA)
Udgivet 31. juli 2026
Finansiell støtte: Arbejdsmiljøforskningsfonden
 (Projektnr./sagsnr.: 14-2021-04/20205100408)

Det Nationale Forskningscenter for Arbejdsmiljø

Lersø Parkallé 105
2100 København Ø
Tlf.: 39165200
Fax: 39165201
e-post: nfa@nfa.dk
Hjemmeside: nfa.dk

Forord

Asfaltveje er en uundværlig del af Danmarks infrastruktur, og senest har Aftalen om ny infrastrukturplan 2035 afsat 160 milliarder til bl.a. nedbringelse af trængsel på danske veje i form af en opgradering af eksisterende veje og nye anlægningsprojekter. Asfaltarbejde omfatter en række arbejdsopgaver, herunder udlægning af nye bære- og slidlag med asfaltudlæggere og efterfølgende komprimering med vejtrømler. I processen sker der en afdampning af organiske stoffer fra asfaltens bitumenfraktion, hvorved der dannes bitumenrøg. Asfaltarbejdere udsættes for bitumenrøgen, herunder polycykliske aromatiske hydrocarboner (PAH), men også dieselpartikler fra den omgivende trafik samt egne dieseldrevne maskiner som vejtrømler og udlæggere. Skærpelsen af grænseværdien for dieselpartikler i arbejdsmiljøet i 2021, og senest igen i 2025, har været motivationen bag dette forskningsprojekt. Formålet har været at opdatere og afdække udsættelsen for dieselpartikler og bitumenrøg, herunder PAH, i asfaltarbejderes arbejdsmiljø. Desuden at identificere kilderne til de enkelte udsættelser samt mulige tiltag til at nedbringe udsættelsen.

Projektet havde ikke været muligt uden støtte fra Arbejdsmiljøfondens Forskningsfond samt en udtalt velvillighed fra brancheorganisationen Asfaltindustrien og dens medlemmer samt Københavns kommunes asfalt team, der har medvirket i målekampagnerne og brugt den ekstra tid det tager at deltage i et forskningsprojekt. Vi takker desuden den Nationale Følgegruppe for FFIKA (Forøget fokus på forskning i kemisk arbejdsmiljø), herunder Dansk Industri og fagforeningen 3F, for værdifulde input til projektet. Slutteligt skylder vi de utrættelige asfaltarbejdere en uvurderlig tak for deres tålmodighed og engagerede deltagelse i projektet.

Jakob Klenø Nøjgaard, Merve Polat og Keld Alstrup Jensen

Det Nationale Forskningscenter for Arbejdsmiljø, juli 2026

Indholdsfortegnelse

Forord	3
Sammenfatning	5
Summary	7
1. Indledning	9
1.1. Udsættelse for dieselpartikler og bitumenrøg under asfaltarbejde	9
1.2. Grænseværdier og helbredeffekter	9
2. Formål	10
2.1. Ændringer i formål i forhold til den oprindelige projektbeskrivelse	10
3. Fremgangsmåde	11
3.1.1. Målekampagner for luftanalyser	11
3.1.2. Målemetoder	12
3.2. Dataanalyse	14
3.3. Deltagere og håndtering af persondata	14
4. Resultater	14
4.1.1 Personudsættelse, luftkoncentrationer	14
4.1.2 Personoptagelse af PAH	17
4.1.3. Nær-felt undersøgelser af kilder til dieselpartikler og bitumenrøg	17
4.2. Determinanter for personudsættelse	20
5. Konklusioner	21
6. anbefalinger til at mindske udsættelse i arbejdsmiljøet	22
7. Taksigelser	22
8. Publikationer og produkter fra projektet	22
8.1. Peer reviewed accepterede videnskabelige artikler	22
8.2. Planlagte videnskabelige artikler under udarbejdelse	23
8.3. Konferencebidrag	23
8.4. Populærvidenskabelige artikel	23
8.5. Øvrige produkter	23
9. Referencer	23

Sammenfatning

Der er ca. 2000 beskæftigede i asfaltindustrien i Danmark, hvoraf 1200 arbejder direkte i forbindelse med asfaltarbejde. Asfaltarbejde omfatter en række arbejdsopgaver, herunder kørsel med asfaltudlægger og vejtrømler samt manuel asfaltudlægning. Arbejdet med asfalt, store entreprenørmaskiner og udledninger fra den omgivende trafik, bidrager med en arbejdsrelateret udsættelse for dieselpartikler og bitumenrøg, der er hhv. kræftfremkaldende for mennesker (IARC gruppe 1) og muligvis kræftfremkaldende (IARC gruppe 2B). PAH omfatter stoffer der både er sandsynligvis kræftfremkaldende (IARC gruppe 2A), muligvis kræftfremkaldende og kræftfremkaldende for mennesker. Der er ikke foretaget offentligt tilgængelige målinger af PAH blandt danske asfaltarbejdere i mere end 20 år, og skærpelsen af grænseværdien for dieselpartikler i 2021, og senest igen i 2025, motiverede yderligere til undersøgelser af asfaltarbejderen arbejdsmiljø. Herudover til identifikation af tiltag, der yderligere kunne nedbringe asfaltarbejderen udsættelse.

Projektet har undersøgt udsættelser for dieselpartikler og partikulært bitumenrøg, herunder PAH, i arbejdsmiljøer der er repræsentative for asfaltudlægning. Med mere end 90 målinger i indåndingszonen er asfaltarbejdernes udsættelsen bestemt på 10 lokationer over 16 dage, herunder motorvejsstrækninger og byveje, en landevej, parkeringsplads og en vejstrækning i en forstad. De højeste udsættelser for dieselpartikler såvel som partikulært bitumenrøg blev målt under motorvejsarbejde, hvor der også blev noteret enkelte overskridelser af grænseværdien for partikulært bitumenrøg. Udsættelsen er opgjort for førere af vejtrømler, udlæggere, formænd og øvrige asfaltarbejdere på vejen. Mht. dieselpartikler var asfaltarbejdere på vejen samt førere af vejtrømler de mest udsatte, hvorimod førere af asfaltudlæggere og formænd var mest udsatte for partikulært bitumenrøg.

Ved hjælp af onlineinstrumenter til måling af udsættelser i realtid, kunne kilderne til partikulært bitumenrøg og dieselpartikler bestemmes. Projektet har bidraget med anbefalinger til yderligere nedbringelse af udsættelser i asfaltarbejdernes arbejdsmiljø, herunder *at opgradere vejtrømler til elektriske alternativer eller nyeste emissionsnorm med afkastet højt placeret i behørig afstand til føreren; at udlægge asfalten med passende afstand imellem udlæggerne, hvor der bruges flere maskiner på opgaven; at eftermonteres sug over "sneglen" på udlæggeren, hvor det er muligt,*

eller vælge modeller med sådan udstyr for at bortlede asfaltdampene fra arbejdsområdet; samt at holde asfalttemperaturen på et niveau, hvor den er til at arbejde med, og ikke højere end det, da temperaturen øger udsættelsen.

Projektet er støttet af Arbejds miljøforskningsfonden med 2.999.285 kr. og har resulteret i foreløbig tre peer-reviewede artikler. Herudover er en fjerde artikel under udarbejdelse, hvortil kommer to mundtlige oplæg og 4 skriftlige konferencebidrag, en populærvidenskabelig artikel antaget til publikation, et afholdt formidlingsmøde og et faktaark, samt diverse andre formidlingsaktiviteter.

Summary

The Asphalt industry employs approximately 2000 people in Denmark, of which 1200 asphalt workers are associated with paving. Asphalt work involves larger equipment including paving machines and rollers, but also smaller manual tasks. Work related exposures include emissions from traffic, in addition to diesel particles and bitumen fumes from own equipment. These exposures are characterized as being carcinogenic to humans (IARC group 1) and possible carcinogenic (IARC group 2B), respectively. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) cover a variety of aromatic compounds, which are probable carcinogenic (IARC 2A), possibly carcinogenic, and carcinogenic to humans. This project is motivated by the absence of PAH measurements among asphalt workers for at least two decades as well as the recent lowering of the occupational exposure limit for diesel exhaust particles.

This project has investigated exposures to diesel particles and particulate bitumen fumes including PAH in working environments, which are representative for asphalt paving. More than 90 personal exposures were conducted in asphalt workers breathing zone at 10 locations covering highways and urban roads, a rural road and suburban road, and a parking lot. The highest personal exposures to diesel exhaust particles and bitumen fumes were measured at highways, where also some exceedances of the limit value for bitumen fumes were observed. Personal exposures were divided into groups of asphalt workers, that is operators of paving machines, rollers, foremen, and other workers on the road including rakers, screedmen and others. With respect to diesel particles, workers on the road and operators of the rollers were the highest exposed group of workers. Operators of paving machines and foremen were exposed to the highest concentrations of bitumen fumes.

Exposures were also measured in real time using online instruments with the objective to identify sources of exposures. Recommendations for further lowering of asphalt workers' exposures was based on this work, and a multiple regression analysis of exposure determinants.

Recommendations and suggestions included *replacement of older, more polluting rollers with electric alternatives or models with newer emission standard and exhaust pipe placed high above the operator of the vehicle; paving with appropriate distance between paving machines, when more vehicles are in use; retrofit of ventilation devices above the screed where possible, or*

choose paving machines with this feature, when new vehicles are purchased; and finally the asphalt should have a temperature, which makes it operable, but not higher temperatures than that, since higher temperatures causes unnecessarily higher exposures.

The project was supported by 2.999.285 kr. from Arbejdsmiljøforskningsfonden. Three peer-reviewed articles has been published so far, and a fourth manuscript is in preparation.

Dissemination includes also two oral presentations and four conference abstracts. Additionally, one article has been accepted for publication in a popular scientific journal. Other dissemination activities include a dissemination meeting on asphalt work and a fact sheet, and other activities.

1. Indledning

Asfaltarbejde omfatter en række opgaver fra indendørs opgaver til veje og anlæg, hvor eksisterende slidlag repareres eller udskiftes, eller der udlægges nye bære- og slidlag. Dette projekt handler om arbejdsmiljøforholdene under forskellige opgaver i Danmark fra 2022-2024. Fræsning og fjernelse af gammel asfalt er en specialiseret proces, der behandles og evalueres overfor asfalteringsopgaver i et projektsamarbejde mellem NFA og Lund Universitet, hvor udsættelsen under fræsning sammenholdes med udsættelsen under asfaltering (Hedmer et al., 2025, Polat et al., 2026). I dette studie indgår kun anlægsarbejder af minimum én dags varighed, hvorimod mindre reparationsopgaver ikke er undersøgt.

1.1. Udsættelse for dieselpartikler og bitumenrøg under asfaltarbejde

Der blev udført 10 målekampagner af en-tre måneders varighed i forbindelse med feltkampagnerne 1 og 2, hvor mere end 90 asfaltarbejders personlige udsættelse blev målt og sammenholdt med de gældende grænseværdier (Nøjgaard et al., 2026). Der blev lagt vægt på, at kampagnerne afspejlede repræsentative opgaver, herunder vejtype, asfalttype og udlægningstemperatur, meteorologi samt årstider, bemanning og udstyr. De 10 målekampagner omfattede tre motorvejsstrækninger, fire vejstrækninger i Københavns kommune, en vejstrækning i en forstad til København, en landevejsstrækning samt en parkeringsplads ved et transportcenter. På to af opgaverne blev der udlagt slidlag, mens der udelukkende blev udlagt slidlag på de resterende opgaver. Herudover deltog personalet i målekampagner på 12 lokaliteter i Sydsverige (Hedmer et al., 2025, Polat et al., 2026).

1.2. Grænseværdier og helbredseffekter

Dieselpartikler måles og opgøres som elementært kulstof (EC) i henhold til bekendtgørelsen om grænseværdier i arbejdsmiljøet og har en grænseværdi på $5 \mu\text{g EC}/\text{m}^3$ (Arbejdstilsynet, 2025). Dieselpartikler er karakteriseret som værende kræftfremkaldende for mennesker af det International Agentur for kræftforskning (IARC gruppe 1). Bitumenrøg har tilsvarende en grænseværdi på $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, hvilket svarer til $833 \mu\text{g}/\text{m}^3$ organisk kulstof (OC) (Hedmer et al., 2025, Nøjgaard et al., 2026). Bitumenrøg er karakteriseret som værende muligvis kræftfremkaldende (IARC gruppe 2B). For summen af PAH i den partikelbundne fraktion gælder en grænseværdi på $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i Danmark. PAH tæller hundredvis af forskellige stoffer, dog måles typisk kun de 16 prioriterede PAH'er, der er sammensat af 2-6 aromatiske ringe og er

anbefalet at måle i luftprøver af det amerikanske *Environmental Protection Agency* (Zelinkova og Wenzl, 2015). PAH omfatter stoffer karakteriseret af det Internationale Agentur for kræftforskning som sandsynligvis kræftfremkaldende (IARC gruppe 2A) samt stoffer i IARC gruppe 1 og gruppe 2B.

2. Formål

Formålet med projektet Elementært kulstof og PAH under asfaltarbejde (EPA) var at opnå viden om den aktuelle udsættelse for bitumen- og dieselpartikler, samt polycykliske aromatiske hydrocarboner (PAH) i asfaltarbejdernes arbejdsmiljø ved traditionelle arbejdspladsmålinger. Desuden var formålet at undersøge arbejdsgange og identificere kilderne til de enkelte udsættelser, ud fra fysisk-kemiske målinger i høj tidsopløsning. Endelig var målet at bestemme optagelsen af PAH i kroppen ud fra målinger af deres metabolitter, samt at identificere tiltag til at nedbringe udsættelsen i arbejdsmiljøet. Til formålet blev der anvendt to typer målekampagner: feltkampagne 1 og feltkampagne 2 som beskrevet i afsnit 3. Hertil blev der lavet en tredje supplerende feltkampagne i Sverige i samarbejde med Lund Universitet.

2.1. Ændringer i formål i forhold til den oprindelige projektbeskrivelse

Bestemmelse af asfaltarbejderes udsættelse for dieselpartikler og PAH indgår i delmålene i den oprindelige projektbeskrivelse. Ved projektets start blev det herudover besluttet at medtage partikulært bitumenrøg som måleparameter, da denne er en relevant udsættelse som ligeledes er reguleret i arbejdsmiljøet. Da koncentrationen af PAH følger koncentrationen af bitumenrøg, blev det ydermere besluttet at måle organiske partikler målt i høj tidsopløsning i stedet for PAH.

Et andet delmål var at undersøge effekten af ændrede arbejdsgange og evt. interventioner på asfaltarbejdernes udsættelse. Det var desværre ikke muligt at få at få afprøvet nogen interventioner med deltagerne i projektet, men effekten af forskellige arbejdsgange blev undersøgt ved at medtage flere målekampagner. Således kunne betydningen af de enkelte determinanter undersøges og testes med en multipel regressionsanalyse.

3. Fremgangsmåde

3.1.1. Målekampagner for luftanalyser

Der blev udført to typer målekampagner for at tilvejebringe oplysninger om personudsættelse under asfaltarbejde, optag af PAH i kroppen samt identifikation af kilder hertil.

I Feltkampagne 1 blev udledninger fra asfaltarbejdet karakteriseret i fast eller variabel afstand til asfaltarbejdet som nær-felt målinger mhp. at bestemme kilderne til de enkelte typer partikler i høj tidsopløsning. Til formålet blev der anvendt et mobil laboratorium (MLAB) udstyret med batteridrevne instrumenter til realtidsmålinger. Dieselpartikler blev målt indirekte som black carbon (BC) med et aethalometer. Partikelstørrelsesfordelingen samt masse- og antalskoncentration blev målt med en scanning mobility particle sizer (SMPS) kombineret med en optisk partikeltæller til karakterisering af partikler med diametre fra 10 nanometer (nm) til 10 mikrometer (μm). Endvidere blev der opsamlet luftprøver på filtre og adsorbenter til bestemmelse af dieselpartikler bestemt som elementært kulstof (EC), bitumenrøg målt som organisk kulstof (OC) og PAH. En mere avanceret udgave af MLAB blev brugt til karakterisering af organiske partikler i høj tidsopløsning med et aerosolmassespektrometer. Den avancerede MLAB blev parkeret på udvalgte lokaliteter, hvor asfaltmaskiner og -arbejdere passerede forbi. Tidsserierne herfra viser udledningerne fra asfaltarbejdet i et kort tidsinterval omgivet af baggrundsmålinger, evt. påvirket af lokale kilder (Figur 3). Herved ses en opbygning af koncentrationen til et maksimum svarende til at kilden er omtrent ud for MLAB, hvorefter den aftager. Vindretningen i forhold til bevægelsesretningen bestemmer hvor hurtigt koncentrationen opbygges og aftager. Den simpelt udstyrede MLAB blev anvendt til at karakterisere udledninger fra udlæggere og vejtrømler nedstrøms i fast afstand, ved at følge maskinerne med tilsvarende hastighed (Figur 2). Nær-felt koncentrationen blev herefter estimeret ud fra gennemsnittet af gentagne målinger af de maksimale koncentrationer.

I Feltkampagne 2 blev udsættelsen for luftbårne partikler målt under de enkelte arbejdsopgaver. Der blev dagligt udvalgt 4-9 asfaltarbejdere fra hver målekampagne, som blev udstyret med adsorbenter og filtre til opsamling af EC, OC og PAH under repræsentative asfaltopgaver. Asfaltarbejderne blev udstyret med rygsække med pumper, og filterkassetter samt adsorbenter blev fastgjort til taskestropperne, så luften blev opsamlet i indåndingszonen. Udvalgte

asfaltarbejdere blev desuden udstyret med aethalometre og partikeltællere. En undergruppe heraf afgav desuden hudafstørringer (Saber et al., 2025) og urinprøver før og efter arbejdets begyndelse på førstedagen, samt efter endt arbejde på 3. dagen til måling af PAH-metabolitter i urinen. Der blev målt under forskellige typer asfaltarbejde, varierende meteorologi samt ved anvendelse af forskellige typer asfalt, temperatur og udstyr mhp. at bestemme determinanter for asfaltarbejdernes udsættelse.

I en tredje feltkampagne blev der målt personlig udsættelse for dieselpartikler, bitumenrøg, PAH samt PAH-metabolitter over 8 måledage på 12 lokaliteter i Sverige fra 2022-2023. Projektet var støttet af det svenske forskningsråd FORTE og Skåne Universitets Hospital, hvortil kommer bemanning fra nærværende EPA-projekt til assistance med udførelse af målingerne samt dataanalyse og publikation af resultater. Udover luftmålinger, blev der opsamlet urinprøver og lavet hudafstørringer til bestemmelse af optagelsesveje for PAH. En nærmere beskrivelse samt resultater er publiceret i Hedmer et al. (2025) og udgør supplerende målinger til de danske feltkampagner. Enkelte resultater herfra er gengivet i denne rapport.

3.1.2. Målemetoder

Dieselpartikler blev opgjort og kvantificeret som elementært kulstof (EC) i henhold til Grænseværdidokumentet (Arbejdstilsynet, 2025). Et udhug af filtrene fra luftprøverne blev analyseret for organisk kulstof (OC) og EC ved termisk-optisk analyse (Birch and Cary, 1996) efter EUSAAR2 protokollen (Cavalli et al., 2010, Ferree et al., 2024).

Black carbon (BC) blev målt optisk med et aethalometer (Forello et al., 2020, Helin et al., 2018), hvilket muliggør målinger i høj tidsopløsning. Grafitlignende kulstofforbindelser, i daglig tale sod, findes som mere eller mindre ordnede grafenlag og betegnes BC eller EC afhængig af målemetoden (Bond et al., 2013). BC-målingerne kan dog ikke bruges til at kvantificere dieselpartikler, da BC og EC ikke altid er ækvivalente. Andre stoffer end EC kan påvirke de optiske målinger med aethalometer (Bond et al., 2013), og metodernes resultater kan under visse omstændigheder afvige væsentligt (Pöschl, 2003, Pöschl, 2005). BC bruges imidlertid til at bestemme den relative betydning af de enkelte kilder til EC/BC.

Bitumenrøg opgøres efter Grænseværdidokumentet som den cyclohexanholdige fraktion af totalstøv (Arbejdstilsynet, 2025), der i dette projekt er kvantificeret som partikulært OC. Ved sammenligning med grænseværdien omregnes partikulært bitumenrøg til OC under antagelsen af et forhold mellem organisk stof og organisk kulstof på 1,2 (Hedmer et al., 2025). Således svarer grænseværdien for partikulær bitumenrøg til 833 $\mu\text{g OC/m}^3$.

Den kemiske sammensætning af partikelforureningen (ca. 0,1- 2,5 μm) blev analyseret med et aerosolmassespektrometer (ToF-ACSM), der direkte opsamler og analyserer partikler i luften gennem en aerodynamisk linse (Xu et al., 2017), hvorefter de partikelbundne stoffer ioniseres og detekteres i et Time-of-Flight massespektrometer (Fröhlich et al., 2013). ACSM måler størstedelen af den uorganiske partikelmasse, herunder nitrat, sulfat, ammonium og klorid (Fröhlich et al., 2013). Langt hovedparten af den organiske masse bestemmes med ACSM, og sammen med BC fra aethalometermålingerne, kunne koncentrationerne af dieselpartikler og partikulært bitumenrøg således bestemmes i høj tidsopløsning.

PAH blev bestemt med GC-MS. Efter udhug til OC/EC analyse blev resten af filtrene fra luftprøverne og adsorbenterne ekstraheret og analyseret for hhv. partikulære og flygtige PAH. Servietter fra hudaftørninger blev ligeledes ekstraheret og analyseret for de såkaldte 16 prioriterede PAH'er, der repræsenterer en række af de hyppigst forekommende og mest toksiske PAH'er (Keith, 2015, Zelinkova and Wenzl, 2015). Proceduren for hudaftørring samt analysemetoden er tidligere beskrevet i Andersen et al. (2018) og analysemetoden er publiceret i Saber et al. (2025).

PAH-metabolitterne i asfaltarbejdernes urinprøver blev målt med væskekromatografi (LC-MS-MS) som beskrevet i Saber et al. (2025). Følgende markører for PAH eksponering blev analyseret: summen af hydroxy-naphthalener, 1-hydroxypyren, summen af hydroxy-phenanthrener og 2-hydroxyfluoren. Således blev der målt i alt otte forskellige metabolitter af PAH'er med to til fire benzenringe. Der blev anvendt isotopmærkede standarder til kvantificeringen samt standard referencemateriale i kvalitetssikringen af analyserne. Kreatinin blev anvendt til at justere for individuel urinudskillelse (Hansen et al., 2008).

3.2. Dataanalyse

Personeksponeringer og målte koncentrationer er rapporteret som målt under de enkelte opgaver og ikke omregnet til 8-timers arbejdsdage, som grænseværdierne typisk er baseret på. Nærmere beregningsmetoder, software og specifikke arbejdstider for de enkelte målekampanjer er beskrevet i de relevante publikationer (Hedmer et al., 2025, Nøjgaard et al., 2026, Polat et al., 2026). Dette gælder ligeledes for software til specifikke instrumenter. PAH er opgjort som summen af flygtige og partikelbundne PAH, og inddelt i grupper efter struktur og helbredseffekter. For de danske målinger er summen af de såkaldt 16 prioriterede PAH efter det amerikanske US EPA, endvidere opgjort uden naphthalen, som har sin egen grænseværdi i Danmark (Arbejdstilsynet, 2025).

3.3. Deltagere og håndtering af persondata

På de enkelte målekampanjer blev asfaltarbejdere inviteret til at deltage og blev gjort bekendt med deres rettigheder som forsøgsdeltagere. Hver deltager besvarede et spørgeskema om alder, højde, vægt samt varighed af ansættelse, og deres arbejdstid blev noteret sammen med arbejdsopgave og prøveidentifikation. Desuden blev der spurgt ind kost, rygevaner, hobby, hygiejne mv. til vurdering af eksponeringen for PAH uden for arbejdstid.

Projektet er godkendt af den Videnskabsetiske komite (Journal-nr.: H-22067447). I projektet er der blevet indsamlet urinprøver og nakkeaftøringer fra deltagere til bestemmelse af optagelsesveje for PAH under asfaltarbejdere. Persondata er GDPR-sikret iht. NFA's procedurer for opretholdelse af datasikkerhed. Alle deltagere har fået personlig besked om deres egne måleresultater.

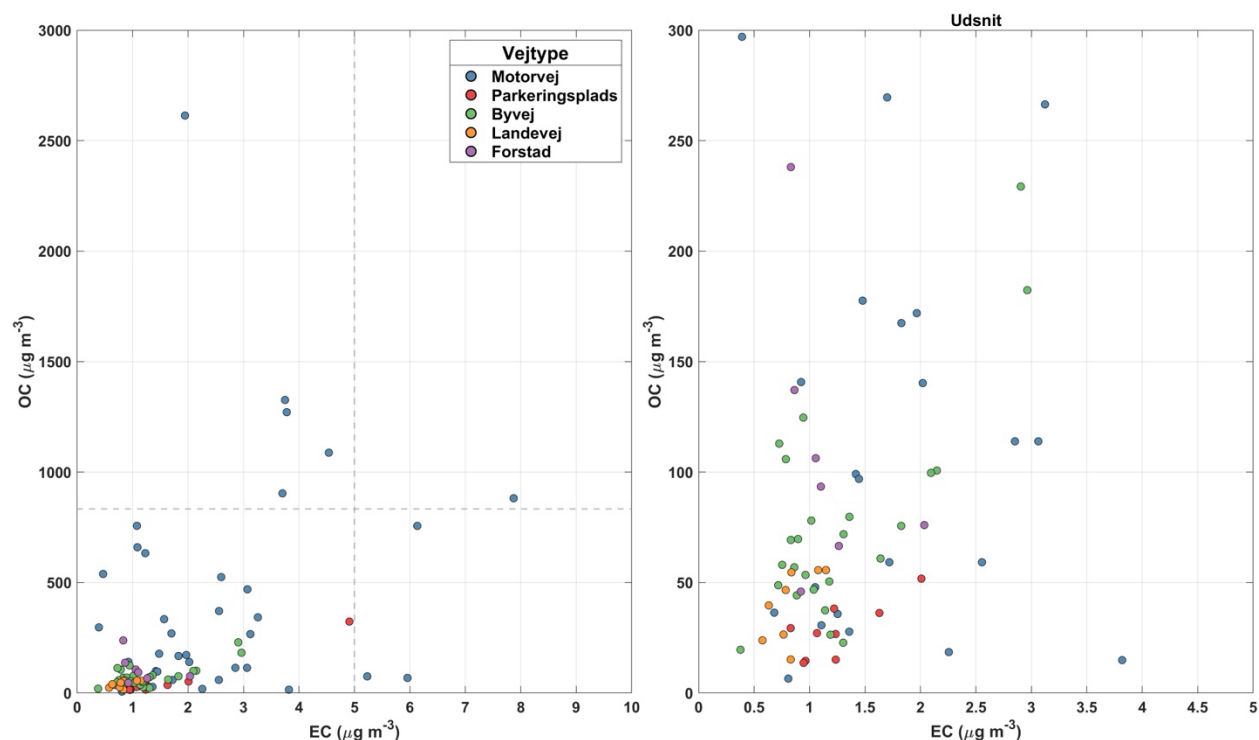
4. Resultater

4.1.1 Personudsættelse, luftkoncentrationer

Der blev lavet mere end 90 danske målinger af dieselpartikler, bitumenrøg og PAH i indåndingszonen på asfaltarbejdere fordelt over 10 forskellige lokaliteter (Figur 1). Enkelte målinger overskred den gældende grænseværdi for dieselpartikler på $5 \mu\text{g EC}/\text{m}^3$ (Arbejdstilsynet, 2025), som dog var under den daværende grænseværdi ($10 \mu\text{g EC}/\text{m}^3$) på undersøgelsestidspunktet. Overskridelserne blev alle observeret under motorvejsarbejde, hvor også de højeste gennemsnitlige koncentrationer af dieselpartikler blev målt. Tilsvarende blev der

målt seks overskridelser af grænseværdien for partikulært bitumenrøg svarende til $833 \mu\text{g OC}/\text{m}^3$ (Arbejdstilsynet, 2025), ligeledes alle på motorvej over fire måledage, hvor også de højeste gennemsnitlige koncentrationer blev målt (Figur 1).

Udsættelsen for PAH blev opdelt i naphthalen og de øvrige 16 prioriterede US EPA PAH, opgjort som summen af deres koncentration i gas- og partikelfasen (Tabel 1). Asfaltarbejdernes udsættelse lå i begge tilfælde betragteligt under grænseværdierne for naphthalen ($50 \text{ mg}/\text{m}^3$) og summen af de partikelbundne PAH'er ($200 \mu\text{g}/\text{m}^3$). For sidstnævnte gruppe blev de højeste koncentrationer igen målt under motorvejsarbejde, hvor medianen af alle asfaltarbejdere udgjorde mellem $2094 - 5073 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De laveste udsættelser blev målt i bymiljøer.



Figur 1. Oversigt over danske personlige udsættelser for bitumenrøg (målt som OC) og dieselpartikler (målt som EC) i dette projekt. Venstre figur viser alle målinger med grænseværdierne i arbejdsmiljøet angivet med stiplede linjer. Højre figur viser et udsnit af de lavere målinger.

Niveauerne afhang af arbejdsopgaven. Således var førerne af vejtrømler og asfaltarbejderne omkring udlæggere udsat for de højeste koncentrationer af dieselpartikler, hhv. $1,28$ og $1,46 \mu\text{g EC}/\text{m}^3$. De laveste koncentrationer blev observeret blandt formænd ($1,00 \mu\text{g EC}/\text{m}^3$) og førere af

udlæggere (1,07 µg EC/m³), der befandt sig længere væk fra de primære kilder til dieselpartikler, nemlig vejtrømlerne. Omvendt blev formanden og førerne af udlæggerne udsat for de højeste koncentrationer af partikler fra bitumenrøg, hhv. 102 µg OC/m³ og 113 µg OC/m³. Til sammenligning blev førere af vejtrømler udsat for 33 µg OC/m³. De målte koncentrationer af dieselpartikler er højere end et samtidigt svensk studie (Hedmer et al., 2025), men på niveau med et tidligere Norsk studie (Olsson et al., 2010).

Tabel 1. Geometrisk middelværdi, median og percentiler for arbejdsmiljøudsættelser for elementært kulstof (EC), organisk kulstof (OC) og PAH-grupper efter arbejdsopgave.

Arbejdsopgave	EC µg m ⁻³	OC µg m ⁻³	EC/TC	L-PAH ng m ⁻³	M-PAH ng m ⁻³	H-PAH ng m ⁻³	16PAH ng m ⁻³	16PAH - Nap ng m ⁻³
Fører af udlægger (19)	1,26	150	0,01	1351	139 (5,7)	39 (6,6)	1587 (3,6)	931 (4,8)
GM (GSD)	(1,92)	(4,0)		(3,3)	37	8,2	625	254
25-percentil	0,81	50		585	152	70	1297	981
Median	1,07	113		1201	589	146	4333	3400
75-percentil	1,89	338		3349	1002	259	8059	6990
90-percentil	3,35	988		5916				
Fører af vejtrømler (20)	1,65	37	0,04	695 (1,9)	28 (3,9)	9,62 (4,7)	766 (1,9)	281 (2,7)
GM (GSD)	(1,98)	(2,6)		498	12	3,1	515	126
25-percentil	1,13	22		589	26	10	681	285
Median	1,28	33		775	76	23	792	453
75-percentil	2,47	67		1172	108	52	1185	562
90-percentil	4,94	95						
Formand (14)	1,09	111	0,01	723 (9,1)	95 (10,7)	32 (8,4)	951 (7,8)	582 (9,5)
GM (GSD)	(1,50)	(2,8)		483	28	4,5	579	235
25-percentil	0,90	54		1479	114	55	1655	1157
Median	1,00	102		3714	947	235	4838	4062
75-percentil	1,23	164		4452	1443	442	6428	5420
90-percentil	1,78	534						
Asfaltarbejdere, øvr. (39)	1,58	111	0,01	939 (5,6)	111 (6,5)	33 (6,0)	1168 (5,0)	659 (5,6)
GM (GSD)	(1,89)	(3,1)		435	29	7,0	506	219
25-percentil	1,05	56		1037	118	36	1214	704
Median	1,46	86		3304	300	79	3831	2160
75-percentil	2,45	181		5992	1806	449	8358	6259
90-percentil	3,28	756						
Asfaltarbejdere, alle (92)	1,44	93	0,02	911 (4,7)	84 (6,7)	26 (6,4)	1099 (4,3)	576 (5,4)
GM (GSD)	(1,88)	(3,4)		469	24	6,6	516	211
25-percentil	0,92	42		872	72	22	943	456
Median	1,24	72		2775	311	96	3120	2238
75-percentil	2,06	180		5747	1238	388	7576	5985
90-percentil	3,70	633						

Det samme gør sig gældende for partikler fra bitumenrøg, der er på niveau med et stort fransk studie (Germin-Aizac et al., 2023). Her rapporteres desuden en aftagende trend i udsættelsen for bitumenrøg gennem perioden 2012-2022. Set over de enkelte arbejdsopgaver, var formænd den

mest udsatte gruppe for PAH (1157 ng/m³) efterfulgt af førerne af udlæggerne (981 ng/m³) og øvrige asfaltarbejdere (704 ng/m³), der opholder sig i nærheden af udlæggeren (Tabel 1).

4.1.2 Personoptagelse af PAH

Optagelsen af PAH under asfaltarbejde blev vurderet ud fra 8 metabolitter analyseret med online fast fase ekstraktion væske kromatografi tandem masse spectrometri (online SPE-LC-MS/MS). Metoden er tidligere beskrevet (Frederiksen et al. 2024, Saber et al. 2025).

Rygere havde generelt højere niveauer af PAH metabolitter i urinen end ikke-rygere. Summen af hydroxy-PAH før arbejde udgjorde således 17,9 µmol/mol kreatinin sammenlignet med ikke-rygeres 2,5 µmol/mol kreatinin. Dette var tydeligst for hydroxy-naphthalen, der kan være stærkt påvirket af rygning, og som var den dominerende metabolit i dette studie. Når der ses udelukkende på ikke-rygende asfaltarbejdere, er niveauet af hydroxy-PAH tilsvarende et nyligt studie af danske (ikke-rygende) brandmænd (median sum af OH-PAH før og efter vagtskifte på 1,6 og 3,0 µmol/mol kreatinin (Saber et al. 2025).

For yderligere at vurdere effekten af asfaltarbejde, blev der konstrueret en såkaldt *linear mixed effects model*, til at kvantificere effekten af asfaltarbejde, rygevaner og deres interaktioner. Når der blev kontrolleret for rygning, steg de enkelte hydroxy-PAH metabolitter signifikant med 17,4 – 76,8% (p<0.05). Dette er bekræftet i andre undersøgelser, senest i et svensk studie, hvor urinkoncentrationerne af metabolitten 1-OH-pyren hos ikke-rygere steg med 47% efter asfaltarbejde (Hedmer et al., 2025), hvilket skal sammenholdes med 74% i Tabel 2. Effekten var ikke signifikant forskellig fra ikke-rygerne, for næsten alle de undersøgte metabolitter, dvs. stigningen i metabolitter var sammenlignelig for rygere og ikke-rygere.

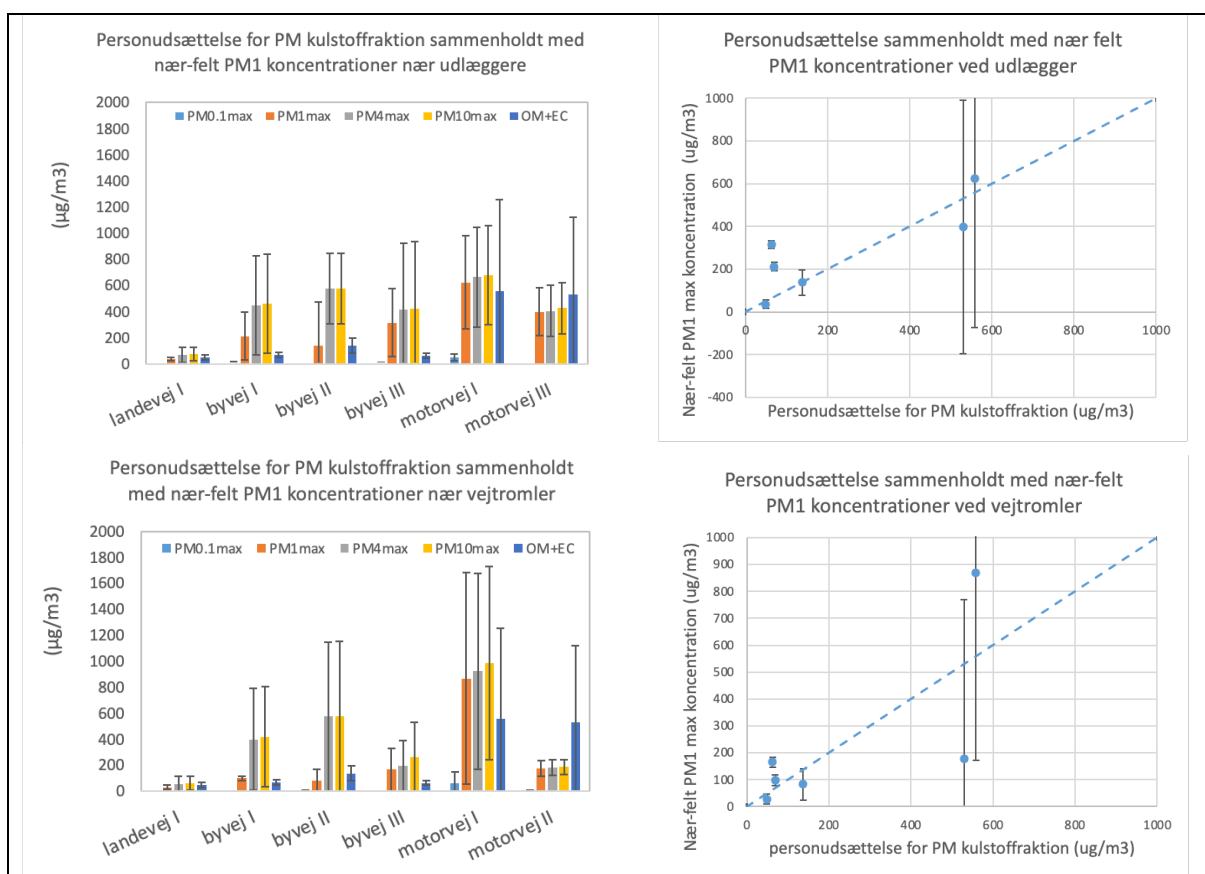
Tabel 2. Asfaltarbejdernes kreatininjusterede PAH metabolitkoncentrationer (µmol/mol kreatinin).

Kategori	udsættelse	Sum OH-NAP	2-OHFLU	Sum OH-PHE	1-OH-PYR	Sum OH-PAH
Ikke-ryger	Ingen	1,91 (1,22-7,69)	0,14 (0,063-0,77)	0,21 (0,13-0,69)	0,047 (0,019-0,56)	2,51 (1,60-9,16)
Ikke-ryger	Asfalt	3,00 (1,06-6,27)	0,23 (0,076-0,78)	0,30 (0,11-0,71)	0,082 (0,035-0,38)	3,62 (1,50-7,63)
Ryger	Ingen	16,6 (9,68-35,5)	1,09 (0,64-2,18)	0,42 (0,26-0,96)	0,154 (0,055-0,41)	17,9 (10,9-38,2)
Ryger	Asfalt	18,0 (8,67-38,7)	1,27 (0,74-2,18)	0,55 (0,26-1,15)	0,243 (0,084-0,85)	19,9 (10,4-42,2)

De svenske undersøgelser af asfaltarbejdere viste, at både luftkoncentrationer af PAH, men også optagelse gennem huden bestemt med hudaføringer, var vigtige optagelsesruter.

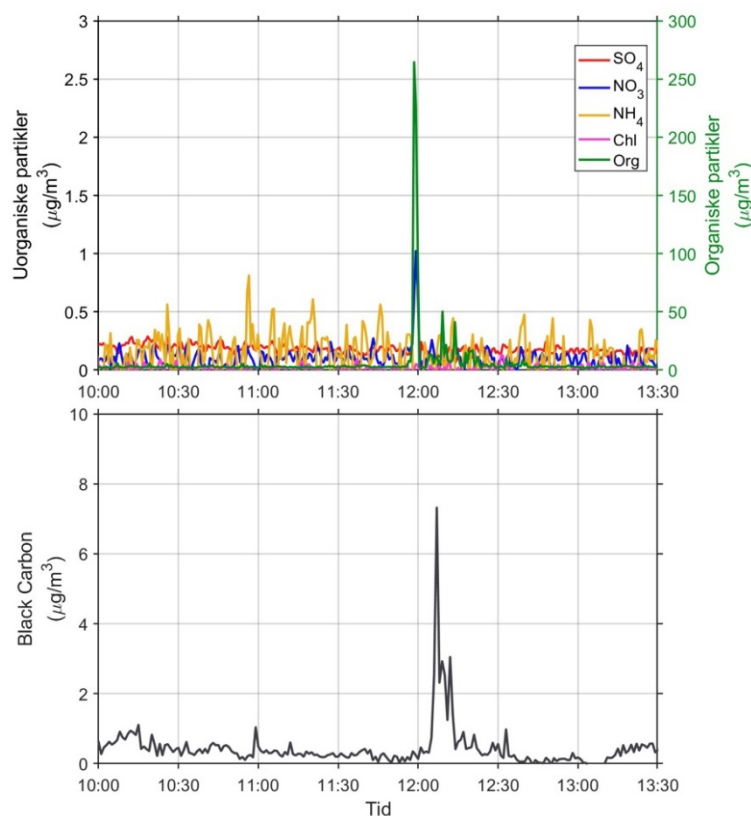
4.1.3. Nærfeltundersøgelser af kilder til dieselpartikler og bitumenrøg

Målinger af partikelstørrelsesfordeling og antalskoncentration samt kemisk sammensætning af partikler i realtid viste, at udsættelsen for partikler under asfaltarbejde altovervejende skyldtes bitumenrøg. Udsættelsen var størst, når der var flere udlæggere i brug, og den var kun i mindre grad påvirket af den omgivende trafik, asfaltarbejdernes egne køretøjer samt øvrige kilder. Omvendt var niveauet af dieselpartikler påvirket af den omgivende trafik, som dog ikke alene kunne lede til overskridelser af grænseværdien. Der blev observeret enkelte overskridelser af den nuværende skærpede grænseværdi, når der var flere vejtrømler med ældre emissionsnorm i brug.



Figur 2. Asfaltarbejdernes personudsættelse for den partikelbundne kulstoffraktion (dieselpartikler og bitumenrøg) sammenholdt med den estimerede masse af ultrafine (PM_{0.1}), submikrone (PM₁), respirable (PM₄) og grove (PM₁₀) partikler.

Nærfeltmålinger i høj tidsopløsning gav desuden vigtig viden om den kemiske sammensætning af de partikler, asfaltarbejdere udsættes for i forskellige miljøer. Ved at placere MLAB i 3 meters afstand til kilden, dvs. nær-felt, kunne partiklerne karakteriseres i realtid med online instrumenter, der ikke er mulige at bære for de enkelte asfaltarbejdere. Partiklernes kemiske sammensætning var forskellig i bymiljøerne og de åbne landskaber. Således viser Figur 2, at asfaltarbejderes udsættelse for dieselpartikler og bitumenrøg nær udlæggere omtrent svarer til den samlede estimerede PM_{10} nær-felt koncentration på motorveje og landeveje. Ligeledes udgjorde den estimerede PM_{10} omtrent hele partikelmassen og andelen af grove partikler var ubetydelig. Omvendt forholdt det sig med asfalteringen af byvejene, hvor den respirable og grove partikelfraktion kunne udgøre hovedparten af partikelmassen. Denne bestod ikke af kulstof og var således uorganisk.



Figur 3. Nær-felt realtidsmålinger af organiske partikler samt black carbon (BC) til bestemmelse af kilder til hhv. partikulært bitumenrøg og dieselpartikler.

De dominerende kilder til dieselpartikler og partikulært bitumenrøg blev identificeret ved anvendelse af den avancerede MLAB udstyret med et aerosolmassespektrometer samt

aethalometer. Dette ses i Figur 3 ved at de organiske partikler peaker, idet udlæggeren passerer MLAB. BC peaker kort tid efter, men ikke sammenfaldende med de organiske partikler, når vejtrømlerne komprimerer den udlagte asfalt.

I de danske undersøgelser var der en tydelig sammenhæng mellem udlæggeren og partikulært bitumenrøg, der samtidig var den største kilde til PAH. Omvendt var vejtrømlerne de største kilder til dieselpartikler. Nedbringelse af udsættelsen for dieselpartikler og partikulært bitumenrøg kræver derfor indsatser på flere områder, og kildeanalysen udpeger den relevante indsats. I de svenske undersøgelser blev identificeret yderligere markører til fremtidige kildeanalyser (Polat et al., 2026). Således er partikelstørrelsesfordelingen, overfladearealet af partikler deponeret i lungerne (LDSA), EC/OC-forholdet og grupper af organiske stoffer som PAH og organiske svovlforbindelser forskellig i udledninger fra den omgivende trafik, udlæggere og vejtrømler, hvilket potentielt kan bruges til at bestemme kildestyrken af disse i byrummet.

4.2. Determinanter for personudsættelse

Udsættelsen for dieselpartikler afhænger af udledninger fra den omgivende trafik og asfaltarbejdernes egne køretøjer. I denne undersøgelse var vejtrømler af størst betydning for udledningen af dieselpartikler, herunder deres euronorm, antallet af maskiner på den enkelte opgave og placeringen af deres udstødning. Kildestyrken af partikulært bitumenrøg og PAH afhang desuden af antallet af udlæggere, deres indbyrdes placering samt asfaltens temperatur. På opgaver med to udlæggere, hvor disse kørte side om side, kunne der dannes læ omkring den ene udlægger, ved at den anden udlægger var i tæt kontakt med den foran skubbede lastbil, og derved hindrer vinden i at fortynde bitumenrøgen. Dette kan give anledning til højere udsættelser af asfaltarbejdere i nærheden. Asfaltens udlægningstemperatur bestemmer desuden graden af fordampning og dannelse af bitumenrøg og dermed udsættelsen af asfaltarbejdere, hvilket er eftervist i flere studier (Cavallari et al., 2012). Høje vindhastigheder øger fortyndingen af bitumenrøg og kan nedsætte udsættelsen af asfaltarbejdere. Vindretningen kan ligeledes øge eller mindske udsættelse afhængig af om asfaltarbejderne arbejder opstrøms eller nedstrøms kilden (Wang et al., 2026). Dette kan dog være vanskeligt at bestemme i bymiljøer med høje bygninger, trafik og beplantning, der kan skærme for vinden eller danne turbulens.

På baggrund af en principal komponentanalyse, blev der lavet en multipel regressionsanalyse for at undersøge mulige determinanternes betydning for asfaltarbejderes udsættelse (Nøjgaard et al., 2026). Regressionsanalysen bekræftede, at der var en signifikant sammenhæng mellem asfaltarbejderes udsættelse og vindhastigheden, asfalttemperaturen og antallet af vejtrømler på opgaven. Der kunne ikke påvises forskelle i udsættelsen for bitumenrøg mellem de forskellige typer af asfalt. Analysen kunne ikke påvise de øvrige determinanternes sammenhæng med udsættelsen, sandsynligvis pga. det forholdsvis begrænsede antal målinger i forhold til antallet af faktiske determinanter, som her måtte simplificeres. Eks. blev udsættelsen for dieselpartikler relateret til antallet af trømler, og ikke deres emissionsnorm eller placering af udstødning. Ligeledes blev der beregnet en gennemsnitlig vindhastighed, hvilket kunne dække over lave vindhastigheder typisk om morgenen, og højere vindhastigheder op ad dagen, hvilket kan give anledning til forskellige udsættelsesscenarier, end hvis vindhastigheden er konstant gennem arbejdsdagen. Endelig blev der ikke redegjort for udlæggernes indbyrdes placering i determinantanalysen. Alle disse forhold ville kræve et større datasæt at håndtere, eller laboratoriestudier/modelleringer, hvor der kan ændres og undersøges én parameter ad gangen.

5. Konklusioner

Projektet har undersøgt udsættelser for dieselpartikler og partikulært bitumenrøg, herunder PAH, i arbejdsmiljøer, der er repræsentative for asfaltudlægning. Med målinger i asfaltarbejdernes indåndingszone er udsættelsen bestemt på 10 lokationer, herunder motorvejsstrækninger og byveje, en landevej og en vejstrækning i en forstad, samt en parkeringsplads. De højeste udsættelser for dieselpartikler såvel som partikulært bitumenrøg blev målt under motorvejsarbejde, hvor der også blev noteret enkelte overskridelser af grænseværdien for partikulært bitumenrøg. Udsættelsen er opgjort for førere af vejtrømler, udlæggere, formænd og øvrige asfaltarbejdere på vejen. Mht. dieselpartikler var asfaltarbejdere på vejen samt førere af vejtrømler de mest udsatte, hvorimod førere af asfaltudlæggere og formændene var mest udsatte for partikulært bitumenrøg.

Ved hjælp af onlineinstrumenter til måling af udsættelser i realtid, kunne kilderne til partikulært bitumenrøg og dieselpartikler bestemmes. Denne viden kombineret med iagttagelser af arbejdspladsen og evaluering af en række determinanternes betydning for udsættelsen, har

resulteret i konkrete forslag og anbefalinger til yderligere at nedbringe asfaltarbejderes udsættelse i arbejdsmiljøet.

6. Anbefalinger til at mindske udsættelse i arbejdsmiljøet

Dieselpartikler, bitumenrøg og PAH'ernes kræftfremkaldende egenskaber berettiger at udledningerne holdes så lave som muligt i arbejdsmiljøet. I projektet blev der identificeret en række anbefalinger til at mindske udsættelsen for bitumen og dieselpartikler samt PAH.

- Opgrader vejtrømler til elektriske alternativer eller nyeste emissionsnorm med afkastet højt placeret i behørig afstand til føreren.
- Asfaltarbejdet bør udføres med passende afstand mellem udlæggerne, når flere maskiner er i brug. Der kan tilkøbes eller eftermonteres sug over ”sneglen” på flere udlæggermodeller, hvorved asfaltdampene yderligere bortledes fra arbejdsområdet.
- Asfalttemperaturen bør holdes, så den er til at arbejde med, og ikke højere, da det øger udsættelsen for bitumenrøg og PAH'er.

7. Taksigelser

En stor tak til Asfaltindustrien og dens medlemmer, de medvirkende asfaltarbejdere og Københavns Kommune for at deltage og stille faciliteter til rådighed. Vi takker AMFF for at bevilge forskningsstøtte til projektet (20215100408).

8. Publikationer og produkter fra projektet

8.1 Peer reviewede accepterede videnskabelige artikler

- Hedmer, M., Lovén, K., Rex, J., Nilsson, C., Polat, M., Nøjgaard, J.K., Pagels, J., Strandberg, B., Hagvall, L., 2025. Characterization of occupational exposure to air pollutants during asphalt milling and paving. *Annals of Work Exposure and Health* 00, 1-19. DOI: 10.1093/annweh/wxaf078
- Nøjgaard, J.K., Kofoed-Sørensen, V., Jensen, K.A., Strandberg, B., Hedmer, M., Polat, M., 2026. Determinants of exposure to organic and elemental carbon, and polycyclic aromatic hydrocarbons, during asphalt paving. *Environmental Research* in press. DOI: 10.1016/j.envres.2026.125208
- Polat, M., Rex, J., Strandberg, B., Nøjgaard, J.K., Lovén, K., Hagvall, L., Hedmer, M., Johnson, M.S., Malmberg, V., Pagels, J., Nøjgaard, J.K., 2026. Characterization of particulate and semi-volatile organic emissions during asphalt milling and paving. *ACS EST&T Air*. Article ASAP DOI: 10.1021/acsestair.6c00019

8.2. Planlagte videnskabelige artikler under udarbejdelse

Nøjgaard, J.K., Ferree, P., Jensen, K.A., Polat, M. Temporal variation in occupational exposure to diesel- and bitumen fume particulates during asphalt work. Manuscript in preparation intended for Environmental Research.

8.3. Konferencebidrag

- Polat, M., Rex, J., Strandberg, B., Nøjgaard, J.K., Lovén, K., Hagvall, L., Hedmer, M., Pagels, J., 2024. Characterization of particulate emissions during asphalt paving in southern Sweden (mundtligt oplæg). European Aerosol Conference, Tampere, Finland, August 25-30 2024.
- Nøjgaard, J.K., 2024. Dieselpartikler og bitumenrøg under asfaltarbejde (mundtligt oplæg), 2024. Vejforum, Nyborg, Denmark, December 4-5, 2024
- Nøjgaard, J. K., Ferree, P.L., Kofoed-Sørensen, V., Jensen, S.P., Jensen, S.B., Frederiksen, M., Polat, M., 2024. Exposure to elemental carbon and polycyclic aromatic hydrocarbon during asphalt paving (poster). European Aerosol Conference, Tampere, Finland, August 25-30, 2024.
- Polat, M., Rex, J., Strandberg, B., Nøjgaard, J.K., Lovén, K., Hagvall, L., Hedmer, M., Johnson, M.S., and Pagels, J., 2025 Characterization of particulate emissions during asphalt paving in southern Sweden (poster). Nordic Society for Aerosol Research (NOSA) aerosol conference 20-22 January 2025, Aarhus, Denmark.
- Polat, M., Rex, J., Strandberg, B., Lóven, K., Hagvall, L., Hedmer, M., Malmberg, V., Pagels, J., Johnson, M.S., Nøjgaard, Jakob Klenø, 2025. Characterization of particulate emissions during asphalt milling and paving in Southern Sweden (poster). European Aerosol Conference, Lecce, Italy, 31.08 -08.09.2025.
- Nøjgaard, J.K., Hedmer, M., Lovén, K., Rex, J., Pagels, J., Strandberg, B., Hagvall, L., Polat, M., 2025. Exposure to particulate matter during rural, urban and highway asphalt (poster). European Aerosol Conference, Lecce, Italy, 31.08 -08.09.2025.

8.4. Populærvidenskabelige artikel

Nøjgaard, J.K., 2026. Asfaltarbejde – en kilde til lokale og regionale partikler. Antaget til udgivelse i tidsskriftet Dansk Kemi, oktober 2026.

8.5. Øvrige produkter

- Nøjgaard, J.K., 2025. Formidlingsmøde om udsættelse for dieselpartikler, tjærestoffer og bitumenrøg under asfaltarbejde. Det Nationale Forskningscenter for Arbejdsmiljø, København 30. september 2025. <https://nfa.dk/nyt/arrangementer/2025/formidlingsmoede-om-udsattelse-for-dieselpartikler-tjaerestoffer-og-bitumenroeg-under-asfaltarbejde>
- Det Nationale Forskningscenter for Arbejdsmiljø, 2026. Faktaark om asfaltarbejderes udsættelse for partikler i arbejdsmiljøet. Under grafisk opsætning til udgivelse.
- Nøjgaard, J.K., 2022. Touren går til Indiakaj. Nyhedsbrev i Beskæftigelsesministeriet (BM), nr. 4/2022

9. Referencer

- Andersen, M.H.G., Saber, A.T., Clausen, P.A., Pedersen, J.E., Løhr, M., Kermanizadeh, A., Loft, S., Ebbenhøj, N., Hansen, Å.M., Pedersen, P.B., Koponen, I.K., Nørskov, E.C., Møller, P., Vogel, U., 2018. Association between polycyclic aromatic hydrocarbon exposure and peripheral blood mononuclear cell DNA damage in human volunteers during fire extinction exercises. *Mutagenesis* 24, 105-115
- Arbejdstilsynet, 2025. Bekendtgørelse om grænseværdier for stoffer og materialer (kemiske agenser) i arbejdsmiljøet. BEK nr 1356 af 19/11/2025.
- Birch, M.E., R. A. Cary, R.A., 1996. Elemental Carbon-Based Method for Monitoring Occupational Exposures to Particulate Diesel Exhaust. *Aerosol Science and Technology* 25, 221-241.

- Bond, T.C., S.J. Doherty, D.W. Fahey, P.M. Forster, T. Berntsen, B.J. DeAngelo, M.G. Flanner, S. Ghan, B. Kärcher, D. Koch, S. Kinne, Y. Kondo, P.K. Quinn, M.C. Sarofim, M.G. Schultz, M. Schulz, C. Venkataraman, H. Zhang, S. Zhang, N. Bellouin, S.K. Guttikunda, P.K. Hopke, M.Z. Jacobson, J.W. Kaiser, Z. Klimont, U. Lohmann, J.P. Schwarz, D. Shindell, T. Storelvmo, S.G. Warren, and C.S. Zender, 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, no. 11, 5380-5552.
- Cavalli, F., Viana, M., Yttri, K. E., Genberg, J., and Putaud, J.-P., 2010. Toward a standardised thermal-optical protocol for measuring atmospheric organic and elemental carbon: the EUSAAR protocol. *Atmos. Meas. Tech.* 3, 79–89.
- Faktaark om asfaltarbejderes udsættelse for partikler i arbejdsmiljøet, 2026. Det National Forskningscenter for Arbejdsmiljø. I produktion.
- Ferree, P.L., Polat, M., Nøjgaard, J.K., Jensen, K.A., 2024. Airborne particulate matter and diesel engine exhaust on infrastructure construction sites in the Copenhagen metropolitan area. *Annals of Work Exposures and Health* 68, 791-803.
- Forello, A.C., Amato, F., Bernardoni, V., Calzolari, G., Canepari, S., Costabile, F., Di Liberto, K., Gualtieri, M., Lucarelli, F., Nava, S., Perrino, C., Petralia, E., Valentini, S., Valli, G., Vecchi, R., , 2020. Gaining knowledge on source contribution to aerosol optical absorption properties and organics by receptor modelling. *Atmospheric Environment* 243, 117873
- Frederiksen, M., Jensen, S.P., Andersen, M.H.G., Vogel, U., Saber, A.T., 2024. Online SPE-LC-MS-MS method for eight hydroxylated metabolites of polycyclic aromatic hydrocarbons in urine and determination of optimal sampling time after firefighter training. *Toxicol. Lett.* 400, 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2024.07.005>
- Fröhlich, R., Cubison, M. J., Slowik, J. G., Bukowiecki, N.,Prevôt, A. S. H., Baltensperger, U., Schneider, J., Kimmel, J.R., Gonin, M., Rohner, U., Worsnop, D. R., and Jayne, J. T., 2013. The ToF-ACSM: A Portable Aerosol Chemical Speciation Monitor with TOF-MS Detection. *Atmos. Meas.Tech.* 6, 3225–3241.
- Germin-Aizac J., Maitre A., Balducci F., Montlevier S., Marques M., Tribouiller J., Demeilliers C., Persoons R. Bitumen fumes and PAHs in asphalt road paving: Emission characteristics, determinants of exposure and environmental impact. *Environ. Res.*, 228, 115824
- Hansen, Å.M., Mathiesen, L., Pedersen, M., Knudsen, L.E., 2008. Urinary 1-hydroxypyrene (1-HP) in environmental and occupational studies - a review. *Int J Hyg Environ Health* 211, 471-503.
- Hedmer, M., Lovén, K., Rex, J., Nilsson, C., Polat, M., Nøjgaard, J.K., Pagels, J., Strandberg, B., Hagvall, L., 2025. Characterization of occupational exposure to air pollutants during asphalt milling and paving. *Annals of Work Exposure and Health* 00, 1-19. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxaf078>.
- Helin,A., Niemi, J.V., Virkkula, A., Pirjola, L., Teinilä, K., Backman, J., Aurela, M., Saarikoski, S., Rönkkö, T., Asmi, E., Timonen, H., 2018. Characteristics and source apportionment of black carbon in the Helsinki metropolitan area, Finland. *Atmospheric Environment* 190, 87-98
- Keith, L.H., 2015. The Source of U.S. EPA's Sixteen PAH Priority Pollutants. *Polycyclic Aromatic Compounds* 35, 147-160
- Nøjgaard, J.K., Kofoed-Sørensen, V., Jensen, K.A., Strandberg, B., Hedmer, M., Polat, M., 2026. Determinants of exposure to organic and elemental carbon, and polycyclic aromatic hydrocarbons, during asphalt paving. *Environmental Research* in press. DOI: 10.1016/j.envres.2026.125208
- Polat, M., Rex, J., Strandberg, B., Lovin, K., Hagvall, L., Hedmer, M., Johnson, M.S., Malmberg, V.B., Pagels, J., Nøjgaard, J.K., 2026. Characterization of Particulate and Semi-Volatile Organic Emissions During Asphalt Milling and Paving. *ACS EST Air* [ea-2026-00019r](#)
- Olsson A, Kromhout H, Agostini M, Hansen J, Lassen CF, Johansen C, Kjaerheim K, Langård S, Stücker I, Ahrens W, et al. 2010. A case–control study of lung cancer nested in a cohort of European asphalt workers. *Environ Health Perspect.* 118:1418–1424

- Pöschl, U., 2003. Aerosol particle analysis: challenges and progress. *Anal. Bioanal. Chem.* 375, 30–32.
- Pöschl, U., 2005. Atmospheric Aerosols: Composition, transformation, climate and health effects. *Angew. Chem.* 44, 7520 - 7540.
- Saber, A. T., Frederiksen, M., Jensen, S. P., Kofoed-Sørensen, V., Clausen, P. A., Huusom, A. J., Carøe, T., Ebbenhøj, N., Andersen, M. H. G., & Vogel, U. (2025). Effects of Different Interventions Aimed at Reducing Dermal and Internal Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Exposure Among Firefighters. *Journal of Xenobiotics*, 15(5), Article 150.
<https://doi.org/10.3390/jox15050150>.
- Xu, W., Croteau, P., Williams, L., Canagaratna, M., Onasch, T., Cross, E., Zhang, X., Robinson, W., Worsnop, D., Jayne, J., 2017. Laboratory characterization of an aerosol chemical speciation monitor with PM2.5 measurement
- Zelinkova, Z., Wenzl, T., 2015. The occurrence of 16 EPA PAHs in food - a review. *Polycycl. Aromat. Compd* 35, 248–84.