

ISAPA

Implementering af sensorbaserede
arbejdspladsmålinger til forbedret håndtering af
partikeleksponeringer i arbejdsmiljøet

ISAPA

Implementering af sensorbaserede arbejdspladsmålinger til forbedret håndtering af partikeleksponeringer i arbejdsmiljøet

Projekt støttet af Arbejdsmiljøforskningsfonden

Projektnr. 20225100797

Udarbejdet af

Thomas Nørregaard Jensen, Forretningsleder ¹

Søren Hanghøj Møller, Konsulent ¹

Ana Sofia Fonseca, Seniorforsker ²

Pete Kines, Seniorforsker ²

Anders Brostrøm, Seniorforsker ²

Jesper Baldtzer Liisberg, Postdoc. ²

Keld Alstrup Jensen, Professor ²

¹ Teknologisk Institut; ² Det Nationale Forskningscenter for Arbejdsmiljø

Projektansvarlige

Thomas Nørregaard Jensen, Forretningsleder, tnje@teknologisk.dk

Ana Sofia Fonseca, Seniorforsker, agf@nfa.dk

27. marts 2026

Rapporten bedes citeret som:

Jensen TN, Møller SH, Fonseca AS, Kines P, Brostrøm A, Liisberg JB, Jensen KA (2026).

Implementering af sensorbaserede arbejdspladsmålinger til forbedret håndtering af partikeleksponeringer i arbejdsmiljøet. Teknologisk Institut og Det Nationale Forskningscenter for Arbejdsmiljø (19 sider).

Indhold

1 Resumé.....	4
2 English Summary.....	5
3 Formål	7
4 Metode	7
5 Udførelse.....	8
6 Beskrivelse af, om og hvordan projektets formål og hensigt er blevet opnået.....	9
6.1 Undersøgelse af sikkerhedskulturen	9
6.2 Undersøgelse af partikeleksponering.....	10
6.3 Udvælgelse og validering af low-cost-sensorer.....	11
7 Erfaringer og konklusioner	12
7.1 Effekt af monitorering med low-cost-sensorer	12
7.2 Performance af low-cost-sensorerne	13
7.3 Brugen af low-cost-sensorer til vurdering af interventioners effekt.....	15
7.4 Ændring i sikkerhedskultur efter synliggørelse af data på partikeleksponering.....	16
8 Perspektivering af, hvordan projektets resultater på kort og langt sigt kan bidrage til at forbedre arbejdsmiljøet.....	16
9 Fortegnelse over publikationer og produkter fra projektet.....	17
10 Anerkendelser	19
11 Referencer.....	19

1 Resumé

Projektet har undersøgt, om prisbillige partikelsensorer (low-cost-sensorer) kan anvendes som et praktisk værktøj til at identificere, overvåge og forebygge sundhedsskadelige partikler og fibre i arbejdsmiljøet. Fire forskellige industrivirksomheder deltog i projektet: en plastproducent, en producent af et fiberholdigt produkt, et distributionscenter og en renoveringsvirksomhed.

Indledningsvist blev der gennemført baselinemålinger med stationært og personbåret udstyr. Der blev målt respirabelt og inhalerbart støv, ultrafine partikler og – hvor det var relevant – kvartsstøv og glasfibre. Målingerne gav et detaljeret billede af, hvor og hvornår medarbejderne var mest eksponeret, og hvilke processer der udgjorde de vigtigste kilder. I renoveringsmiljøet var det især tør gulvnedtagning, tør fejning og tør tapetfjernelse, der gav meget høje men til gengæld kortvarige støv- og partikeltoppe. Hos producenten af fiberholdigt materiale var kileskæring den væsentligste kilde til både støv og glasfibre, mens smelteovnen primært afgav ultrafine partikler. I plastproduktionen og distributionscentret var de gennemsnitlige støvniveauer relativt lave, men der blev registreret forhøjede partikelantal i forbindelse med specifikke opgaver som støbning, håndtering af granulat og trucktrafik.

På baggrund af baselinemålingerne blev der opstillet low-cost-sensorer i udvalgte fokusområder hos alle de deltagende virksomheder. Sensorerne målte kontinuerligt i 7–11 måneder og gav realtidsdata om udviklingen i partikelbelastningen. Sensorerne blev kalibreret mod avanceret måleudstyr og viste generelt god overensstemmelse ved lave til moderate koncentrationer, men undervurderede niveauerne ved meget høje støvbelastninger og mistede gradvist følsomhed over tid. Sensordata har derfor ikke kunnet erstatte de avancerede dokumentationsmålinger, men har været et nyttigt redskab til at se mønstre, spidsbelastninger og effekten af konkrete ændringer i praksis.

Samtidig blev forebyggelseskulturen og sikkerhedskulturen undersøgt før og efter interventionen gennem spørgeskemaer til ledelse og medarbejdere og ved systematiske observationer af sikkerheden i de områder, hvor sensorerne var opsat. Alle virksomheder lå allerede ved projektstart på et relativt højt niveau på begge ovenstående parametre og over nationale og internationale benchmarks med høj efterlevelse af arbejdsmiljøregler og udbredt brug af tekniske hjælpemidler og personlige værnemidler. Efter projektet blev dette niveau enten fastholdt eller forbedret. På flere virksomheder var det vurderingen, at forebyggelse nu blev



prioriteret højere, at der følges op på sikker udførelse af arbejdet, og at arbejdsmiljøarbejde opleves som økonomisk fordelagtigt. Data fra sensorer og målinger har styrket dialogen om risiko og løsninger og understøttet en mere læringsorienteret tilgang til hændelser og nærved-ulykker.

Projektets samlede resultater viser, at måling med low-cost-sensorer kan være et værdifuldt supplement til klassiske målemetoder. På kort sigt kan resultaterne bruges til at synliggøre sundhedsmæssige problematiske opgaver, teste og justere konkrete arbejdsmiljøtiltag og som grundlag for at inddrage medarbejderne i forebyggelsesarbejdet. På længere sigt kan de opnåede erfaringer danne grundlag for vejledninger, uddannelsesmateriale og en mere datadreven, proaktiv forebyggende arbejdsmiljøkultur, hvor eksponering for støv, ultrafine partikler og fibre løbende følges og nedbringes.

2 English Summary

This project examined whether low-cost particle sensors can be used as a practical tool to identify, monitor and prevent harmful exposure to airborne particles and fibres in the workplace. Four different industrial settings were included: plastic manufacturing, production of a fibre product, a distribution centre and indoor renovation work.

Extensive baseline exposure measurements were carried out using both stationary and personal equipment. Respirable and inhalable dust, ultrafine particles and, where relevant, crystalline silica and glass fibres were measured. This provided a detailed picture of where and when workers were most exposed, and which processes were the main sources of exposure. In the renovation setting, dry floor removal, dry sweeping and dry wallpaper stripping caused very high, short-term peaks in dust and particle concentrations. In production of fibre products, cutting was the dominant source of both dust and fibres, while the melting furnace mainly emitted ultrafine particles. In plastic manufacturing and the distribution centre, average dust levels were relatively low, but peaks in particle number concentrations were observed during specific tasks such as moulding, handling of granulate and forklift operations.

Based on the baseline results, low-cost sensors were installed in selected focus areas at all companies. The sensors measured continuously for 7–11 months and provided real-time data on particle levels. They were calibrated against advanced instruments and generally showed good agreement at low to moderate concentrations, but tended to underestimate levels during very dusty tasks, and gradually lost some sensitivity

over time. They could therefore not replace advanced documentation measurements for regulatory purposes, but proved useful for identifying patterns, peak exposures and the effects of specific interventions.

In parallel, occupational safety and health prevention culture and safety culture were assessed before and after the intervention using questionnaires for management and employees, as well as systematic safety observations in the sensor areas. All companies had already a relatively high safety culture level at the start of the project, with scores above national and international benchmarks, and high compliance with safety rules and effective use of technical aids (e.g. ventilation) and personal protective equipment. After the intervention, these levels were maintained or slightly improved. In most cases, respondents to a greater extent perceived that prevention is prioritized in their companies, that safe work practices are followed up on, and that occupational safety and health work is economically beneficial. The measurement and sensor data strengthened the dialogue about risks and solutions and supported a more learning-oriented approach to incidents and near-misses.

Overall, the project shows that low-cost particle sensors can be a valuable supplement to traditional measurement methods. In the short term, they can be used to visualize problematic tasks, test and adjust specific preventive measures and actively involve workers in exposure reduction. In the longer term, the experiences can inform guidelines, training material and a more data-driven, proactive occupational safety and health culture, in which exposure to dust, ultrafine particles and fibres is continuously monitored and reduced.

3 Formål

Hovedformålet med projektet har været at teste og evaluere, om virksomheder kan bruge low-cost-partikelsensorer som et praktisk arbejdsmiljøværktøj til at:

- Identificere og overvåge sundhedsskadelig partikel- og fibereksposering i arbejdsmiljøet.
- Gennemføre og følge op på forebyggende tiltag, der reducerer eksponeringen.
- Styrke virksomhedens forebyggelses- og sikkerhedskultur i forhold til partikeleksponering.

I projektet vurderes både sensorernes tekniske anvendelighed og deres betydning for virksomhedernes arbejdsmiljøarbejde og sikkerhedskultur.

Delmålene i projektet var at:

1. Kortlægge kilder og eksponeringsniveauer for partikler og fibre samt at afdække den eksisterende sikkerhedskultur i fire virksomheder før intervention.
2. Etablere og kalibrere sensorbaserede målestationer i udvalgte fokusområder og udvikle vejledninger til dataanalyse og aktionsniveauer.
3. Gennemføre interventionsforløb, hvor virksomhederne selv bruger sensorernes data til egenkontrol og risikohåndtering over 6–9 måneder.
4. Udføre eftermålinger og analysere, om brugen af sensorer har reduceret eksponeringsniveauer og påvirket sikkerhedskulturen positivt.

4 Metode

I projektet er flere metoder blevet kombineret:

- **Målinger og analyse af partikeleksponering:** Der foretages detaljerede baselinemålinger af partikelkilder og eksponeringsniveauer i udvalgte fokusområder på fire virksomheder.
- **Validering af sensorer:** Low-cost sensorer testes og kalibreres både i laboratorie og i felten for at sikre præcision og anvendelighed.
- **Undersøgelse af sikkerhedskultur:** Interviews, spørgeskemaundersøgelser og systematiske sikkerhedsobservationer bruges til at forstå og klassificere virksomhedernes sikkerhedskultur.
- **Intervention:** Virksomhederne bruger sensorerne til selv at monitorere og reducere eksponering for partikler. Effektiviteten af sensorerne og de implementerede sikkerhedskulturmæssige tiltag evalueres.

- **Eftermåling og analyse:** Afsluttende målinger og interviews udføres for at vurdere interventionens langtidseffekt og validere resultaterne.

5 Udførelse

Projektet blev gennemført i fem faser:

1. **Identifikation af eksponering og sikkerhedskultur:** Baselinemålinger og kortlægning af forebyggelseskultur og sikkerhedskultur i virksomhederne.
2. **Etablering af sensorer:** Udvælgelse, installation og kalibrering af low-cost sensorer samt udvikling af vejledninger til brug.
3. **Testfase:** Virksomhederne anvender sensorerne til egenkontrol og risikohåndtering, mens data indsamles løbende over testperioden. Undervejs blev sensordata ved de to planlagte kontrolmålinger valideret mod referenceudstyr for at sikre datakvalitet og dokumentere sensorernes præstation over tid.
4. **Eftermåling:** Opfølgende målinger og analyser af partikelkoncentrationer og sikkerhedskultur.
5. **Dataanalyse og formidling:** Projektets resultater analyseres, valideres og formidles gennem videnskabelige artikler og rapporter samt på workshops og ved præsentationer på videnskabelige konferencer.

Projektet involverer fire testvirksomheder (en renovationsvirksomhed, et distributionscenter, en producent af plastemner og en producent af et fiberholdigt produkt) og er blevet gennemført gennem et tværfagligt samarbejde mellem Teknologisk Institut (DTI) og Det Nationale Forskningscenter for Arbejdsmiljø (NFA).



6 Beskrivelse af, om og hvordan projektets formål og hensigt er blevet opnået

6.1 Undersøgelse af sikkerhedskulturen

Sikkerhedskulturen er i projektet undersøgt med en kombination af spørgeskemaer og systematiske observationer – den samme metode er brugt i alle fire virksomheder, så resultaterne kan sammenlignes på tværs.

For det første er der gennemført spørgeskemaundersøgelser om virksomhedernes arbejdsmiljøindsatser, baseret på det nationale VAI-spørgeskema. Her har ledelsesrepræsentanter, arbejdsmiljø- og tillidsrepræsentanter i virksomhederne bl.a. vurderet, om arbejdsmiljø er en del af virksomhedens forretningsstrategi, hvordan forebyggelse prioriteres, i hvilken grad medarbejdere inddrages, hvordan nyansatte og unge instrueres, hvor systematisk ulykker følges op, og hvor let det er at finde, forstå og efterleve arbejdsmiljøregler og vejledninger. Svarene er indsamlet både før og efter interventionsperioden og sammenholdt med nationale benchmarkdata for danske virksomheder af tilsvarende størrelse.

For det andet er sikkerhedsklimaet (et mål for et øjebliksbillede af sikkerhedskulturen) blandt medarbejderne undersøgt med et uddrag af det nordiske spørgeskema vedrørende sikkerhedsklima NOSACQ-50 (<https://nfa.dk/NOSACQ>). Her har timelønnede medarbejdere anonymt vurderet ledelsens prioritering af sikkerhed, deres egen og kollegers adfærd, fælles ansvar for sikkerhed, håndtering af ulykker og nærvæd-ulykker, samt hvor åbent man kan tale om sikkerhed. Også disse målinger er gentaget efter interventionen og sammenlignet med internationale benchmarkdata.

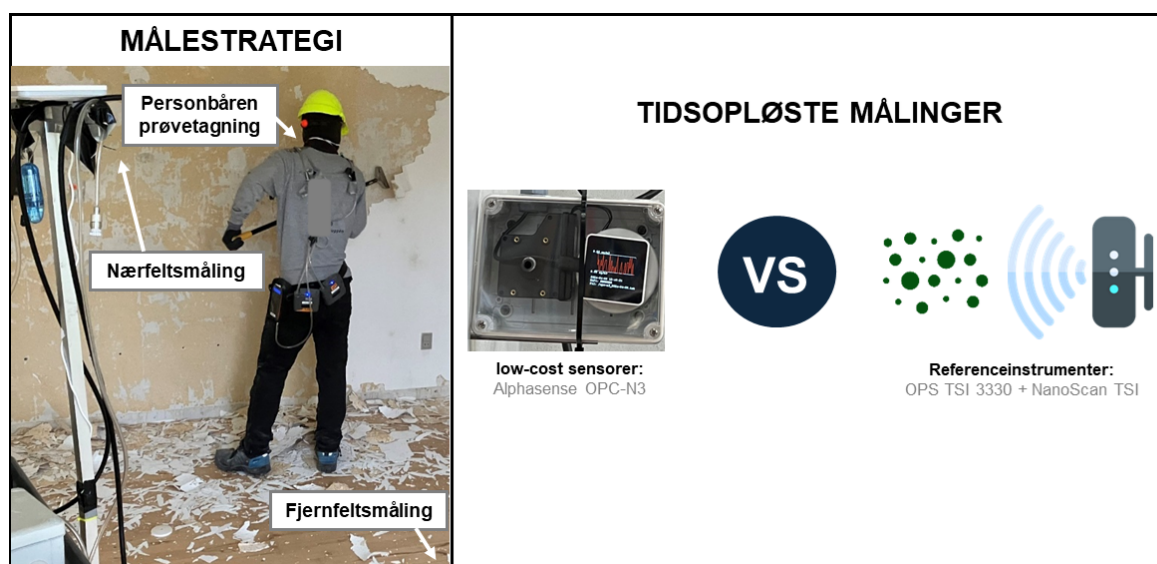
Endelig er der gennemført systematiske sikkerhedsobservationer med NFA's Safety Observer-app (<https://nfa.dk/safetyobserver>) i de konkrete områder, hvor sensorerne blev brugt. Her har observatører registreret 'korrekte' og 'ikke-korrekte' forhold og 'korrekt' og 'ukorrekt' adfærd inden for faste temaer som brug af værnemidler, tekniske hjælpemidler, orden og ryddelighed, adgangsveje, maskin- og køretøjsikkerhed, velfærdsforhold og førstehjælp. Der er således beregnet et sikkerhedsindeks (procent korrekt(e) forhold/adfærd), som også er målt før og efter interventionen.

Tilsammen giver disse tre datakilder – ledelses-/AM-spørgeskema, medarbejdersikkerhedsklima og observationer – et trianguleret billede af

sikkerhedskulturen (fra passiv, reaktiv og aktiv til proaktiv) i hver virksomhed, samt hvordan kulturen har udviklet sig gennem projektet.

6.2 Undersøgelse af partikeleksponering

I projektet er medarbejdernes eksponering for partikler og fibre kortlagt ved gentagne, avancerede arbejdspladsmålinger før og efter interventionsperioden. Målingerne er gennemført både som stationære (nærfelt og fjernfelt) og personbårne målinger i medarbejdernes åndedrætszone (Figur 1).



Figur 1. Studiedesign og målestrategi.

Der blev i starten af projektet gennemført detaljerede baselinemålinger i de udvalgte procesområder i hver virksomhed (fx renoveringsopgaver, skæring af glasuld, smelteovn, plastproduktion, distributionscenter). Her blev der:

- opsamlet respirabelt og inhalerbart støv på filtre med cykloner og kassetteholdere koblet til pumper, så der kunne bestemmes massekoncentrationer (mg/m^3) for respirabelt støv og totalstøv, både stationært og personbåret
- foretaget kvartsanalyser (XRD) på støvfiltre for at bestemme indholdet af krystallinsk silica (respirabel og total kvarts), udelukkende i forbindelse med renoveringsopgaver, hvor det var relevant for den undersøgte eksponeringssituation
- udført fiberprøvetagning (i glasuldsproduktionen) med specialfiltre, efterfølgende analyseret med scanning elektronmikroskopi (SEM/EDS) efter

WHO's fiberkriterier (Verdenssundhedsorganisationens definition af respirable fibre: længde > 5 μm , diameter < 3 μm og længde/diameter-forhold > 3:1) for at bestemme koncentration og type af fibre (fibre/cm³)

- gennemført realtidsmålinger af partikelantal og størrelsesfordeling med direkte visende instrumenter (NanoScan SMPS, OPS, FMPS, DiSCmini), som dækker fra ca. 10 nm til 10 μm . Det gav tidsopløste data for antalskoncentrationer (partikler/cm³), størrelsesfordelinger og lungedeponeret overfladeareal (LDSA), både tæt på kilder (nærfelt) og i baggrundsluften (fjernfelt), samt i åndedrætszonen. De målte størrelsesfordelingsdata muliggjorde desuden beregning af PM_x-massefraktioner (fx PM₁, PM_{2.5}, PM₄, og PM₁₀) baseret på estimeret partikelmasse ud fra antal/størrelse-fordelingen.

Disse målinger blev typisk gennemført over 3–5 dage pr. fokusområde med det mål at dække repræsentative arbejdsdage og centrale opgaver (fx tør/våd tapetfjernelse, tør/våd fejning, gulvoptagning, kileskæring af glasuld, betjening af smelteovn, drift af blanderi og sprøjttestøbmaskiner, truckkørsel og pakning).

Efter interventionsperioden – hvor low-cost-sensorerne havde været i brug, og virksomhederne havde gennemført egne tiltag – blev der gennemført eftermålinger i de samme områder og med samme metode (fase 4). Igen blev der med stationært og personbåret udstyr udført en kombination af filtermålinger af respirabelt støv og totalstøv, kvartsanalyse (hvor relevant), fibre (i glasuldsproduktionen) samt realtidsmålinger af partikelantal og størrelsesfordeling med de avancerede instrumenter.

Ved at sammenligne før- og eftermålingerne – både massebaserede (mg/m³), antalsbaserede (partikler/cm³), kvarts- og fiberkoncentrationer samt størrelsesfordelinger – er det således undersøgt, hvilke typer partikler og fibre medarbejderne udsættes for, i hvilke koncentrationer, og om eksponeringsniveauerne har ændret sig som følge af de arbejdsmiljøtiltag, der blev iværksat under projektet.

6.3 Udvalgelse og validering af low-cost-sensorer

Måling med low-cost-sensorer blev valgt som et praktisk og relativt billigt supplement til de avancerede målinger. Der er brugt den samme sensortype i alle virksomheder, nemlig en optisk partikelsensor (OPC-N3), som kan tælle og størrelsesbestemme partikler i luften og omregne til cirkaværdier for støv (PM₁, PM_{2.5} og PM₁₀). Sensorerne måler meget hyppigt (én gang i sekundet) og kan derfor vise, hvordan

partikelbelastningen ændrer sig i løbet af dagen og i forbindelse med konkrete aktiviteter.

I udvælgelsen blev der lagt vægt på, at sensorerne skulle være driftssikre, tilstrækkeligt følsomme til indendørs arbejdsmiljøer og ikke mindst økonomiske. På den baggrund blev OPC-N3 valgt som et af de mest gennemprøvede og tilgængelige low-cost-alternativer, der allerede er udbredt til luftkvalitetsmålinger.

Inden sensorerne blev taget i brug i virksomhederne, blev de kalibreret op mod mere avanceret udstyr. Først i laboratoriet, hvor man sammenlignede sensorernes målinger med velkendte referencemålere under kontrollerede forhold. Senere i felten, hvor sensorerne målte side om side med avancerede instrumenter i de rigtige arbejdsmiljøer (Figur 1). Ud fra disse sammenligninger blev der beregnet justeringer og korrektioner, så sensordata bedre svarede til de 'rigtige' værdier, og man derfor kendte deres begrænsninger, fx at de kan undervurdere koncentrationer ved meget høje støvniveauer, og at følsomheden falder lidt over tid, når sensorerne udsættes for støv.

Hos hver virksomhed blev der typisk opstillet to sensorer i de områder, hvor baselinemålingerne havde vist mest relevant partikeleksponering. I industrivirksomhederne betød det for eksempel sensorer ved en støbemaskine og et mixingområde, ved en kileskærer og en smelteovn, eller ved et pakkeområde og langs en truckrute i en hal. I renoveringsmiljøet blev én sensor placeret i trappeopgangen tæt på det aktive arbejdsområde, mens en anden blev flyttet med ind i de rum, hvor der blev arbejdet.

Sensorerne kørte kontinuerligt i hovedparten af interventionsperioden: omkring 10–11 måneder i industrivirksomhederne og cirka 7 måneder i renoveringsprojektet. I denne periode gav de løbende information om udviklingen i partikelbelastningen, som både forskergruppen og virksomhederne kunne bruge til både at identificere spidsbelastninger og vurdere effekten af ændrede arbejdsmetoder og til at understøtte dialogen om, hvornår og hvor det er vigtigst at sætte ind med forebyggende tiltag.

7 Erfaringer og konklusioner

7.1 Effekt af monitorering med low-cost-sensorer

Monitoreringen har samlet set haft tre typer af effekt.

For det første har sensorerne gjort partikeleksponeringen synlig i hverdagen. Virksomhederne har kunnet se, hvornår på dagen og ved hvilke aktiviteter partikelbelastningen stiger – fx ved tør fejning eller gulvoptagning i renoveringsmiljøet, ved kileskæring af glasuld, ved drift af støbmaskiner og ved trucktrafik og pakning i en hal. Det har givet et langt mere konkret grundlag for dialogen mellem ledere, arbejdsmiljøorganisation og medarbejdere om risiko og prioriteringer. For det andet har sensorerne fungeret som et praktisk værktøj til at afprøve og dokumentere effekten af tiltag. Ved at følge udviklingen før og efter ændringer i arbejdsmetoder eller teknik – fx skift fra tørre til våde arbejdsgange, justering af ventilation, ændrede rengøringsrutiner eller bedre afskærmning – har virksomhederne kunnet se, om og hvornår en indsats faktisk sænker partikelbelastningen. I nogle tilfælde, som i distributionscentret og ved brug af våde metoder i renoveringsarbejdet, har det været muligt at påvise tydelige reduktioner; i andre har sensorerne primært vist, at niveauet allerede var lavt, og realistisk set svært at sænke yderligere.

For det tredje har monitoreringen understøttet en mere systematisk og fremadrettet tilgang til arbejdsmiljøet. Selvom sensorerne ikke erstatter avancerede målinger eller formelle eksponeringsvurderinger, har de bidraget til, at arbejdsmiljøet i højere grad løbende følges og diskuteres, frem for kun ved enkeltstående målekampanjer. Det har styrket bevidstheden om, at selv kortvarige spidsbelastninger kan være vigtige, og har givet virksomhederne et konkret redskab til at reagere hurtigt, justere arbejdsformer og understøtte en kultur, hvor data bruges aktivt til forebyggelse.

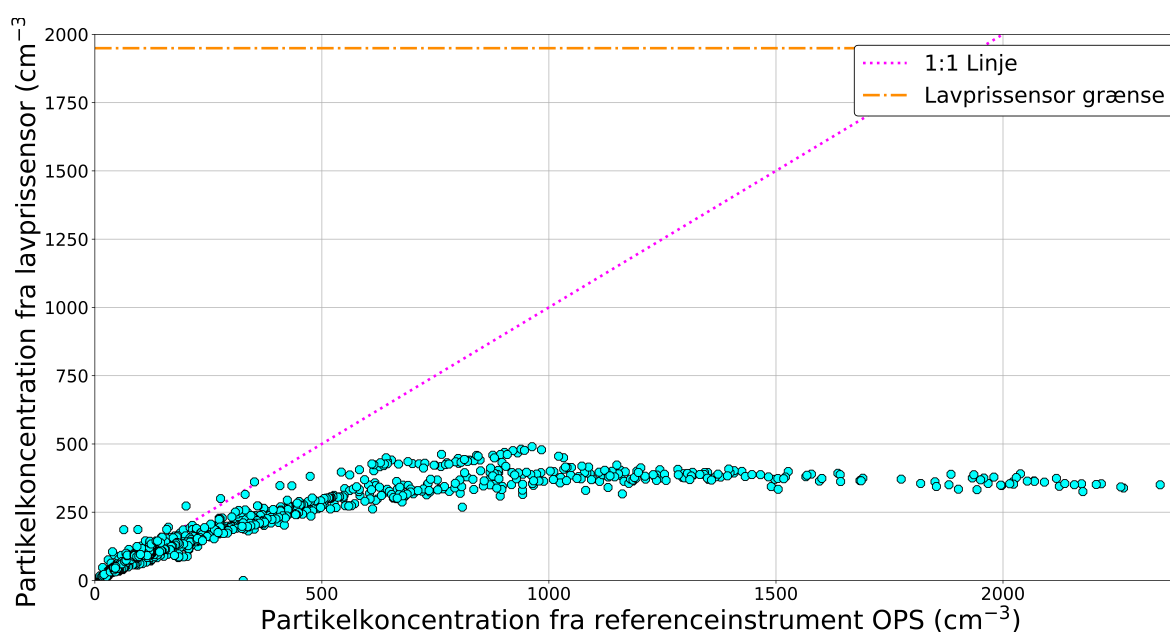
7.2 Performance af low-cost-sensorerne

Low-cost-sensorerne har overordnet fulgt de samme mønstre som det avancerede udstyr, men med tydelige begrænsninger.

Ved lave til moderate partikelkoncentrationer har sensorerne vist en god overensstemmelse med referenceinstrumenterne: de har registreret stigninger og fald på de rigtige tidspunkter og med nogenlunde samme relative størrelse. Kalibrerede sensordata for PM₁, PM_{2.5} og PM₁₀ har i disse intervaller ligget tæt på de massebaserede målinger fra OPS/DustTrak, og antalskoncentrationerne for de større partikler har fulgt tendenserne i NanoScan/OPS-data.

Ved høje koncentrationer – især i de mest støvbelastede situationer i renoverings- og skæremiljøer – har sensorerne derimod haft svært ved at følge med. Her begynder signalet at mættes, så PM-værdierne systematisk bliver for lave og ikke længere kan

bruges som pålidelige absolutte tal (Figur 2). Samtidig er det dokumenteret, at sensitiviteten falder gradvist over længere tids brug i støvede omgivelser, hvilket betyder, at et ikke-korrigeret sensorsignal med tiden vil undervurdere belastningen sammenlignet med de avancerede og kalibrerede dokumentationsmålinger. Værdierne bliver systematisk for lave og kan ikke længere bruges som pålidelige absolutte tal. Samtidig er det dokumenteret, at sensitiviteten falder gradvist over længere tids brug i støvede omgivelser, hvilket betyder, at et ikke-korrigerede sensordata med tiden vil undervurdere belastningen sammenlignet med de avancerede og kalibrerede dokumentationsmålinger.



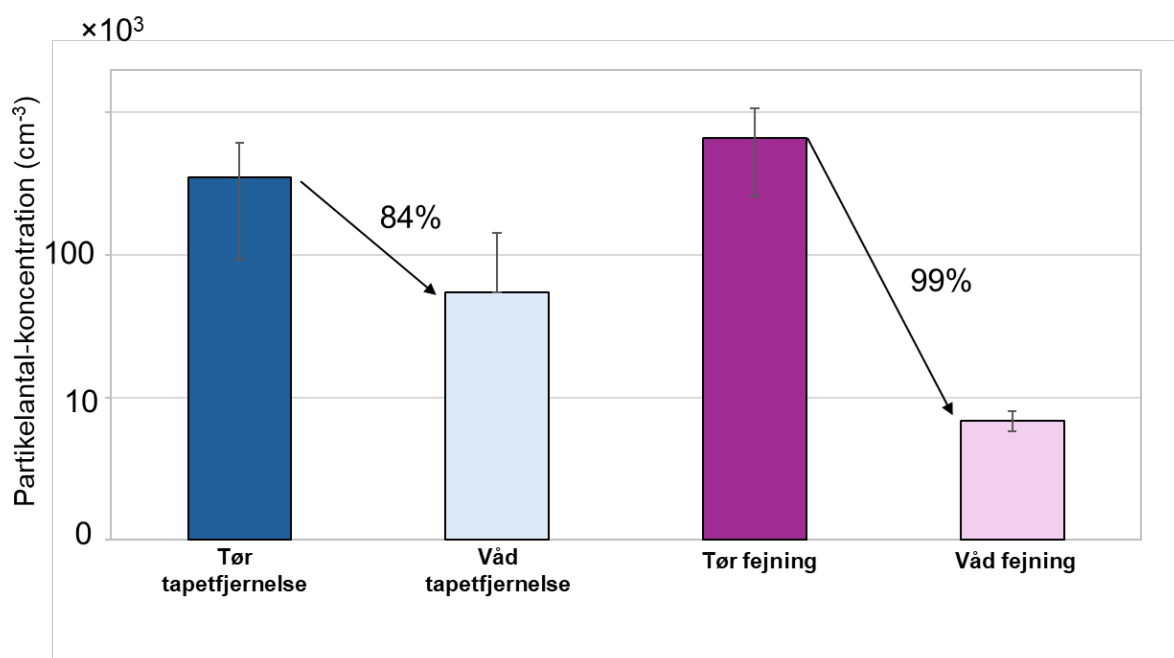
Figur 2. Figuren viser, at lavprissensoren i stigende grad mættes ved stigende partikelkoncentration. Det begrænser nøjagtig måling af partikelantal og partikelmasse (PM_1 , PM_4 , $PM_{2.5}$ og PM_{10}) (Baseret på data rapporteret i Brostrøm et al., 2025 (1), CC BY-NC-ND 4.0).

Samlet set har low-cost-sensorerne performet tilfredsstillende som et relativt måleredskab til at identificere mønstre, kilder og spidsbelastninger og til at følge effekten af tiltag over tid. De avancerede målinger har derimod været nødvendige for at få det præcise, kvantitative billede af niveauer, partikelstørrelser, kemisk sammensætning og fibereksposering – og til at dokumentere eksponeringen i forhold til gældende grænseværdier.

7.3 Brugen af low-cost-sensorer til vurdering af interventioners effekt

Det har fungeret godt at bruge low-cost-sensorerne til at vurdere effekten af konkrete interventioner, når de er brugt rigtigt. Sensorerne har især været nyttige til at sammenligne før og efter bestemte ændringer i praksis: fx skift fra tør til våd metode i renovering, ændrede rengøringsrutiner, justering af ventilation eller omlægning af arbejdsprocesser omkring maskiner og trucktrafik. Fordi sensorerne måler med høj tidsopløsning, har virksomhederne kunnet se, om en given ændring i arbejds gang faktisk gav lavere partikelbelastning i de perioder, hvor aktiviteten foregik. Det har også været muligt at se, om forbedringer holdt sig over dage og uger, så længe man tog højde for den langsomme, faldende følsomhed i sensorerne.

Der, hvor interventionerne gav tydelige ændringer – som når våde metoder blev indført i stedet for tørre (Figur 3), eller hvor rengøring og materialehåndtering blev skærpet – har sensordata meget klart vist lavere niveauer og færre spidsbelastninger. I miljøer, hvor niveauet i forvejen var lavt, har sensorerne især kunnet bekræfte, at ændringerne ikke forøgede belastningen, og har kunnet bidrage til at udpege områder, hvor yderligere tiltag realistisk set vil have begrænset effekt.



Figur 3. Gennemsnitlige partikelantalskoncentrationer målt i indåndingszonen med personlig monitor (DiSCmini) under forskellige renoveringsopgaver (fejlstænger: ± standardafvigelse). Bemærk, at y-aksen er logaritmisk skala (Baseret på data rapporteret i Brostrøm et al., 2025 (1), CC BY-NC-ND 4.0).



Til gengæld har sensorerne ikke kunnet bruges alene til med stor sikkerhed at dokumentere små eller langsomme ændringer i det samlede eksponeringsniveau, især når ændringerne lå inden for den usikkerhed, som følger af kalibrering og tilsmudsning over tid. Her har de avancerede dokumentationsmålinger været nødvendige som kontrol. I praksis har den bedste funktion derfor været, at sensorerne hurtigt har kunnet vise, om en intervention ser ud til at virke i hverdagen, så arbejdsmiljøindsatsen kan justeres løbende. De avancerede målinger bruges til at bekræfte og kvantificere de vigtigste ændringer.

7.4 Ændring i sikkerhedskultur efter synliggørelse af data på partikeleksponering

På tværs af de fire virksomheder lå sikkerhedskulturen allerede før projektet på et relativt højt niveau. To virksomheder kunne karakteriseres som proaktive (strategisk og systematisk arbejdsmiljøarbejde), mens de øvrige to lå i den aktive kategori, hvor arbejdsmiljøet prioriteres, men med mindre fokus på medarbejderinvolvering og udvikling. Alle lå generelt over nationale og internationale benchmarks både for arbejdsmiljøindsatser og for sikkerhedsklima, og sikkerhedsobservationer viste i udgangspunktet høj regeloverholdelse og brug af personlige værnemidler.

Efter interventionsperioden blev dette niveau enten fastholdt eller svagt forbedret i alle virksomheder. Flere steder steg vurderingen af, at forebyggelse prioriteres højt, at der følges op på sikker udførelse af arbejdet, og at konkrete ulykkesforebyggende indsatser gennemføres. Særligt i de virksomheder, hvor sensorresultaterne aktivt blev brugt i dialog mellem ledelse og medarbejdere, ses en tydeligere lærings- og løsningsorienteret tilgang til hændelser og nærved-ulykker.

Observationer viste fortsat meget høje sikkerhedsindeks (ofte over 90–95 %), hvilket peger på en stabil høj grad af formel compliance. De gennemgående forbedringspunkter handler derfor primært om kultur og holdninger: mere systematisk fokus på unge medarbejdere, stærkere medarbejderinvolvering i beslutninger om sikkerhed, og en endnu mere åben, lærende og ikke-straffende rapporteringskultur omkring fejl og nærved-ulykker.

8 Perspektivering af, hvordan projektets resultater på kort og langt sigt kan bidrage til at forbedre arbejdsmiljøet

På kort sigt kan projektets resultater bruges af de deltagende og lignende virksomheder. De deltagende virksomheder har fået konkret viden om, hvor og

hvornår partikeleksponeringen er højest, hvilke arbejdsopgaver der giver spidsbelastninger, og hvilke tekniske og organisatoriske tiltag – fx våde metoder, bedre procesudsugning, ændret rengøring, justeret ventilation eller ændret materialehåndtering – der faktisk reducerer eksponeringen. Det gør det muligt hurtigt at rette indsatsen mod de mest belastende situationer og dokumentere effekten. Samtidig har synliggørelsen af data styrket dialogen om risiko, brug af værnemidler og planlægning af arbejdet, hvilket allerede nu kan omsættes til mere målrettede arbejdsmiljøindsatser i hverdagen.

På længere sigt kan resultaterne bidrage til en generel opkvalificering af arbejdsmiljøarbejdet i brancher med støv- og fibereksponering. Projektet viser både mulighederne og begrænsningerne ved low-cost-sensorer og giver et praktisk afprøvet koncept for, hvordan sensorer kan kombineres med klassiske dokumentationsmålinger og bruges som et løbende arbejdsmiljøværktøj. Det kan inspirere til udvikling af branchevejledninger, standarder og uddannelsesmateriale om håndtering af partikeleksponering – herunder brug af realtidsdata i risikovurdering, i dialogen i arbejdsmiljøorganisationen og i uddannelse af medarbejdere og ledere.

Endelig peger projektet frem mod en mere datadreven og forebyggende sikkerhedskultur, hvor eksponering ikke kun vurderes med enkeltstående målinger, men derimod følges løbende. Det kan på sigt medvirke til færre støv- og fibereksponeringer, færre arbejdsrelaterede luftvejs- og hjertekarsygdomme og en mere robust sikkerhedskultur i de involverede brancher.

9 Fortegnelse over publikationer og produkter fra projektet

Artikel 1: Brostrøm, A., Thalmann, J., Liisberg, J. B., Husovská, F., Møller, S. H., Rasmussen, J. T., Jensen, T. N., Jensen, S. B., Jensen, K. A., Cole-Hunter, T., & Fonseca, A. S. (2025). Task specific assessment of particle exposure and low-cost sensor performance in indoor construction environments. *Atmospheric Environment: X*, 26, Article 100336. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2025.100336>

Artikel 2: Evaluating the accuracy and applicability of Low-Cost Sensors for particle exposure management in plastics recycling and manufacturing (in preparation).

Artikel 3: Evaluating the accuracy and applicability of Low-Cost Sensors for particle exposure management in mineral wool-based insulation manufacturing (in preparation).

Artikel 4: Calibration and validation of low-cost aerosol sensors: Insights from laboratory testing and real-world industrial environments (in preparation).

Artikel 5. Fonseca, A.S. *et al.* Occupational exposure and safety culture improvements using low-cost particle sensors (in preparation).

Poster præsenteret på Arbejdsmiljøforskningsfondens Årskonference i 2023.

Oplæg på Arbejdsmiljøkonference Lab 23 i Nyborg, 2023.

A.S. Fonseca, P.L. Ferree, S.B. Jensen, S.H. Møller, T.N. Jensen, J.T. Rasmussen, P. Kines, J.B. Liisberg, F. Pleva, J. Thalmann, A. Brostrøm, K. A. Jensen (2024) Implementation of sensor-based workplace measurements for improved handling of particle exposures in the working environment. Oral presentation. European Aerosol Conference (EAC), 25-30 August 2024, Tampere, Finland.

A.S. Fonseca, A. Brostrøm, S.H. Møller, J.T. Rasmussen, T.N. Jensen, P. Kines, J.B. Liisberg, F. Pleva, J. Thalmann, S.B. Jensen, T. Cole-Hunter, K. A. Jensen (2025) Low-cost sensors for improved workplace risk control. Oral presentation. SENTIATECH Congress i Valencia (21.-22. oktober 2025).

Projekthjemmeside: <https://www.teknologisk.dk/projekter/partikeleksponering-paa-arbejdspladsen/partikeleksponering-paa-arbejdspladsen/45978>

Udover de videnskabelige publikationer er der blevet produceret en sammenfattende rapport til hver af de fire deltagende virksomheder.

Endelig vil der blive udarbejdet og publiceret to faktablade som led i projektets formidlingsindsats. Det første faktablad offentliggøres i marts 2026 med titlen "*Lavprissensorer til vurdering af partikeleksponering ved indendørs bygge- og renoveringsarbejde*". Det andet faktablad udarbejdes og publiceres, når de videnskabelige artikler 4 og 5 er blevet offentliggjort, så resultaterne herfra kan indgå samlet og sammenhængende i formidlingen.

10 Anerkendelser

Projektet er gennemført med støtte fra Arbejdsmiljøforskningsfonden, som med sin bevilling har muliggjort den omfattende kortlægning og afprøvning af sensorbaserede løsninger i praksis. Fonden har finansieret projektet, men har ikke haft indflydelse på design, dataindsamling, analyser eller tolkning af resultaterne.

Der rettes en stor tak til de deltagende virksomheder og deres medarbejdere for engagement og åbenhed og for den betydelige tid, der er afsat til målinger, interview, spørgeskemaer og afprøvning af nye arbejdsmiljøtiltag i en travl hverdag. Uden denne konstruktive og positive medvirken ville projektets resultater og læring ikke have været muligt.

11 Referencer

1. Brostrøm A, Thalmann J, Liisberg JB, Husovská F, Møller SH, Rasmussen JT, et al. Task specific assessment of particle exposure and low-cost sensor performance in indoor construction environments. *Atmos Environ X*. 2025 Apr;26:100336. doi:10.1016/j.aeaoa.2025.100336