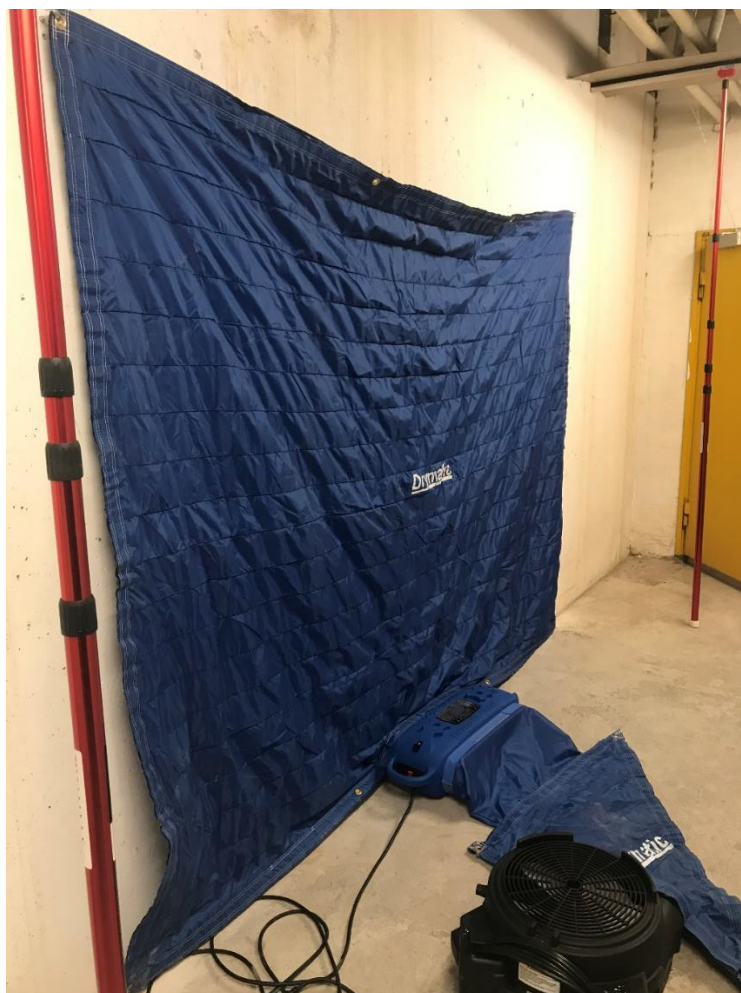


FLEX PCB – Fleksibel PCB-sanering i byggeri

InnoBYG spireprojekt



TSCHERNING



**TEKNOLOGISK
INSTITUT**



FLEX PCB – Flexibel PCB-sanering i byggeri

InnoBYG spireprojekt

Projektteam:

Teknologisk Institut
NAC Europe
G. Tscherning A/S

Forfattere:

Stefania Butera, Rune Østergaard Haven og Lene Dalvang (Teknologisk Institut)
Jesper Natorp (NAC Europe)
Rasmus Krag og Maria Hansen (Tsherning)

Et spireprojekt udarbejdet i regi af InnoBYG - Innovationsnetværket for bæredygtigt byggeri (InnoBYG)

Indhold

1. Forord	4
2. Relevans.....	4
3. Baggrund og formål.....	4
4. Introduktion	5
5. Forsøgsopstilling.....	5
Valg af lokation	5
Anvendte metoder og udstyr	7
6. Forsøgsplan.....	9
7. Resultater	10
Forsøgsopstilling - opstartsmålinger	10
Filtermåling.....	11
Forsøgsopstilling - teglstensvæg.....	13
Forsøgsopstilling - betonvæg	17
Fjernelse af PCB - Diskussion	20
Energiforbrug.....	20
Tidsforbrug.....	20
8. Miljømæssige og økonomiske aspekter	21
Undersøgte scenarier.....	21
Miljømæssig opgørelse.....	22
Økonomisk opgørelse	23
9. Overordnet vurdering af metoden og perspektiver	24
10. Konklusion.....	25

1. Forord

Denne publikation indeholder resultaterne af InnoBYG-spireprojektet "FLEX PCB". Projektet blev gennemført i perioden juni 2019 til oktober 2020 og er et samarbejde mellem NAC Europe, Tscherning og Teknologisk Institut.

Der findes i Danmark mellem 545.700 og 740.800 bygninger, som potentielt skal PCB-saneres (Energistyrelsen, 2013). Potentialet for økonomiske besparelser og energibesparelser er derfor betydeligt.

Nedrivnings- og miljøsaneringsfirmaer repræsenterer omkring 1700 firmaer i Danmark, med cirka 6000 ansatte i 2007 (ca. 10.000 ansatte i 2018), og en omsætning på omtrent 9 mia. kr. i 2011 (Statistikbanken.dk). En teknologisk udvikling inden for dette område vil derfor have en væsentlig økonomiske betydning.

2. Relevans

De samfunds- og branchemæssige aspekter i forbindelse med FLEX PCB-projektet er, at flere bygherrer får mulighed for at optimere indeklimaet i bygninger såsom institutioner, skoler, kontorer og boliger. Desuden vurderes det, at flere bygninger kan renoveres fremfor at nedrives.

3. Baggrund og formål

Termisk behandling af PCB-forurenedede bygninger foregår traditionelt ved at opvarme bygninger til 40-60°C vha. fx oliefyr. De afgassede PCB'er udsuges og fjernes vha. kulfiltre. Teknologien anvendes allerede i dag, men er meget omkostningstung, energikrævende og kræver, at bygningen tages ud af drift i en længere periode med genhusningsomkostninger til følge. Metoden anvendes i dag udelukkende til store projekter, da den udstyrmæssigt kræver meget. Der er derfor fortsat et stort potentiale for teknologioptimering, så en forbedret og mere fleksibel metode vil øge anvendeligheden for termisk stripping - også ved mindre saneringer.

Overfladespecifikke varmekilder, der kan opvarme dele af bygningen i stedet for hele bygningen, er særlig interessant, idet de giver mulighed for væsentlige besparelser, da en langt mindre del af bygningen skal opvarmes. Projektet undersøger effektiviteten og anvendeligheden af et kommercielt tilgængeligt system baseret på fleksible varmemåtte (Drymatic), som pt. anvendes til udtørring af bygninger ifm. vandskadesanering. Varmemåtterne kan muliggøre behandlingen af ét rum ad gangen med en hurtigere opsætning og nedtagning, og dermed øget fleksibilitet og reducerede omkostninger.

Formålet med projektet er at demonstrere og formidle viden om mere effektiv og fleksibel fjernelse af PCB fra bygninger, som gør det muligt at:

- Reducere energiforbruget
- Forenkle logistikken (nemmere opsætning/nedtagning)
- Øge fleksibiliteten (mulighed for at behandle ét lokale ad gangen, mens bygningen er i normal drift).

Projektet vil adressere de to væsentligste årsager til, at bygningsejere i dag ofte vælger at acceptere høje PCB-niveauer i indeklimaet i skoler, børneinstitutioner, boliger osv.: omkostningerne og generne ved nedlukning af en bygning i flere måneder.

4. Introduktion

Projektet udføres af Tscherning A/S og NAC Europe, hvor Teknologisk Institut er videninstitution samt projektleder.

Teknologisk Institut er desuden ansvarlig for den eksperimentelle design, databehandling, afrapportering og formidling, en del af prøvetagning og analyser samt LCA og LCC-screening.

Tscherning, som er nedrivnings- og miljøsaneringsvirksomhed og potentiel aftager af teknologien, bidrager med deres arbejdsstyrke samt stor praktisk erfaring til at udvikle saneringsteknologier, og er ansvarlig for de praktiske forsøg.

NAC Europe er leverandøren af de undersøgte varmemåtter i Danmark, og bidrager til projektet ved at stille udstyret til rådighed samt med faglig sparring.

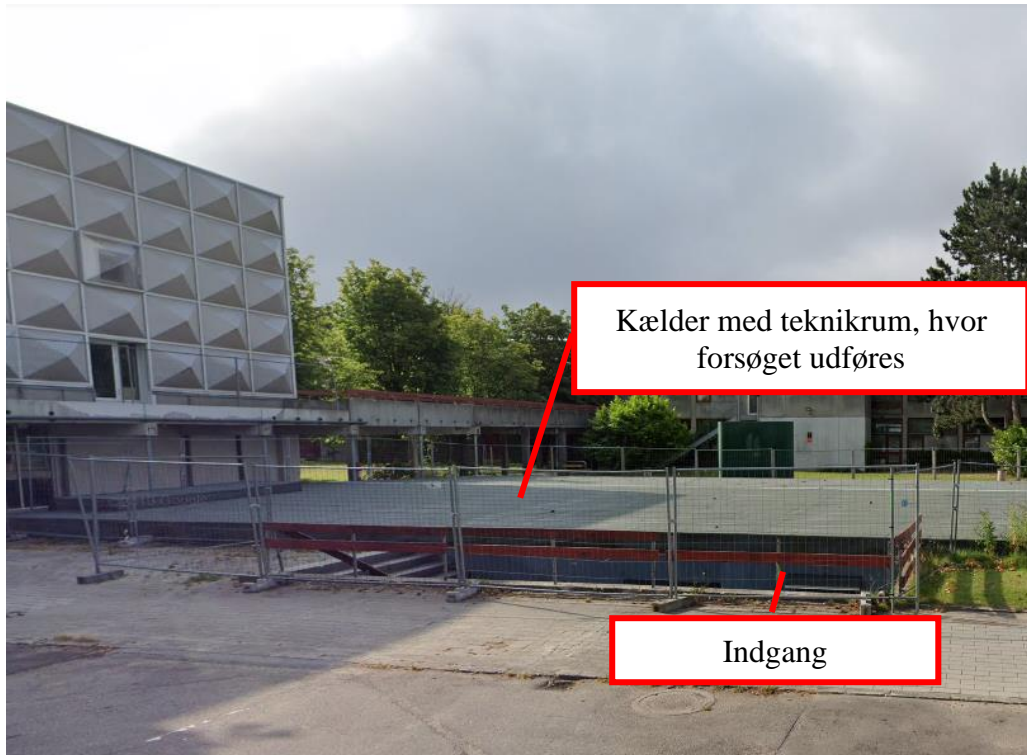
Høje Taastrup Kommune indgår i projektet som projektpartnere. Kommunen stiller lokaler på Selsmoseskolen til rådighed for test af løsningen.

5. Forsøgsopstilling

Valg af lokation

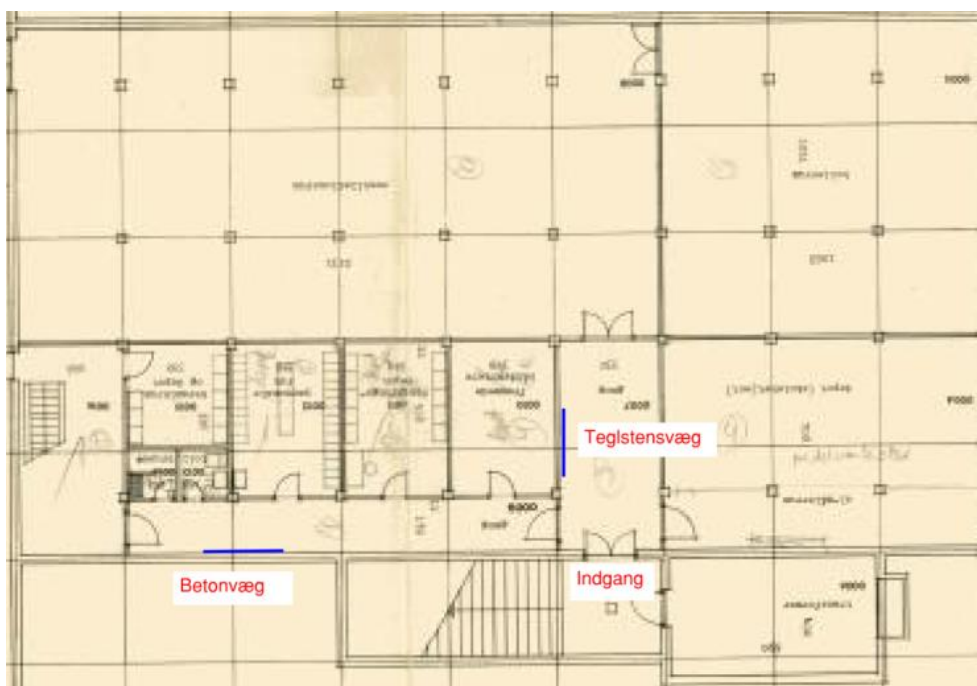
Der er, i forbindelse med identificeringen af mulige lokationer, taget kontakt til flere potentielle bygherrer. Det har dog vist sig at være problematisk at finde lokationer, hvor det er muligt at foretage en undersøgelse over en periode på 2x5 uger. Samtidigt har der også været udfordringer med at finde lokationer, hvor PCB-indholdet i malingen var højt nok til, at det vil give mening at foretage en termisk behandling af området. Meget lave PCB-koncentrationer i malingerne vil ikke give et væsentligt bidrag til indeklimaet, hvorfor det ikke vil være relevant at foretage en termisk behandling af disse tertiære kilder.

Forsøget udføres i en kælder under den gamle blok 1 på Selsmoseskolen, som brændte tilbage i 2015. Der var, inden branden, konstateret høje koncentrationer af PCB på skolen. Forsøgene udføres i kælderen, hvor der ikke er foretaget en sanering for PCB. Området anvendes udelukkende til teknikrum.



Der er, i efteråret 2019, valgt overflader til test af saneringsmetoden (malet teglsten og malet beton). Der er udtaget materialeprøver af malingerne inden forsøget opstartes (Juli 2019) samt målinger af afgasningerne fra vægoverfladerne (FLEC-målinger) 10.-17. sept. 2019. Målingerne er foretaget som FLEC-målinger på de to materialeoverflader (malet teglsten og malet beton). Der er opsamlet luft over en periode på ca. 2 dage hvert sted. Disse resultater anvendes som førmålinger.

Opsætningen af forsøget er indtegnet på nedenstående skitse:



Anvendte metoder og udstyr

Materialeprøver

Ved forsøget blev der udtaget materialeprøver af væggene hver uge under forsøget. Prøverne er udtaget som skrabeprøver, som er opsamlet i alufolie og plastpose, hvorefter de er sendt til analyse for PCB. I forbindelse med prøvetagningen er det så vidt muligt forsøgt at begrænse udtaget af puds og beton. Det er dog ikke helt muligt at undgå disse materialer, hvilket betyder, at der kan ske en fortynding af prøven med et lavere PCB-resultat til følge.

FLEC-målinger

For at vurdere, hvor meget PCB-afgasningen fra vægoverfladerne bliver reduceret ved den termiske behandling, er der udført kammermålinger af PCB-afgasning fra ubehandlet og behandlet vægoverflade. Kammermålingerne er udført med FLEC-metoden (Field and Laboratory Emissions Cell, FLEC® fremstilles af CHEMATEC ApS) og omtales i de efterfølgende afsnit som FLEC-målinger.

Ved kammermålingen efter FLEC-metoden monteres cellen på måleoverfladen, cellen lukkes og måleoverfalden ($\varnothing=150\text{mm}$) udgør en væg i cellen. Cellen er i stand til at skabe et lille afskærmet miljø, hvori måleoverfladens emissionspotentiale kan karakteriseres ud fra den målte luftkoncentration i cellen, når luftmængden igennem cellen kendes og kontrolleres.



Cellen er opbygget, så luftstrømmen over overfladen er laminar og hastigheden relativt ensartet.

Forsyningsluften til cellen består af indeluft, som filtreres gennem et PCB-filter med aktivt kul og HEPA-filter. Luftmængden til cellen styres af en pumpe, og efter pumpen var der yderligere et partikelfilter. Luften blev suget gennem et adsorbenttrør (Supelco, XAD-II) til opsamling af PCB. For at undgå at skabe undertryk i målecellen, hvorved forurenede luft fra omgivelserne eventuelt kunne trænge ind i cellen, blev kun en del af luftstrømmen fra cellen opsamlet til analyse. Den resterende luftmængde, ca. 20 %, blev sendt ud i lokalet.

Resultatet af målingen viser den overfladespecifikke afgang af PCB fra den overflade, som kammeret er monteret på.

Varmemåtter

Der er ved forsøget anvendt Drymatic vægmåtter 2x3 meter samt 2 boost-box'e fra Drymatic til opvarmning af de udvalgte vægområder. Udstyret er udlånt af NAC Europe.



Udstyret virker ved, at boost-box'en er tilkoblet vægmåtten og sender varm luft ind i måtten. Ved vores forsøg er temperaturen tæt på 50°C. Varmen bevirker, at PCB frigives fra vægoverfladen og PCB-koncentrationen i materialet dermed reduceres.

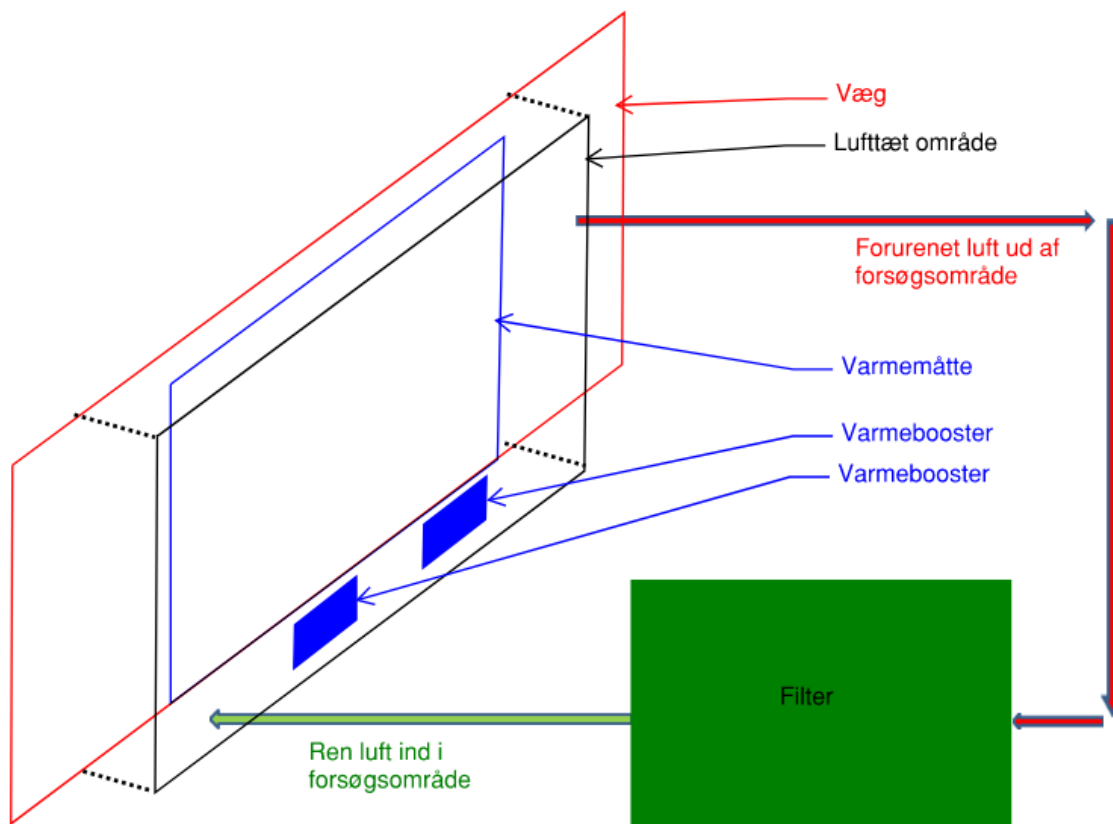
Filter

Tscherning har bistået med ekspertise i forbindelse med opsætning af lufttætte områder og at koble filter på så luften fra området renses for PCB gennem et kulfilter, inden den genbruges i processen (for at begrænse varmespild).



6. Forsøgsplan

Principskitse over forsøgsopstilling:



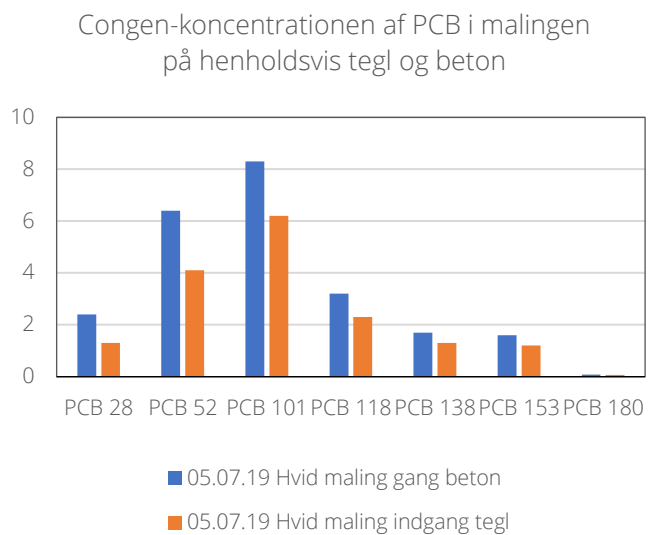
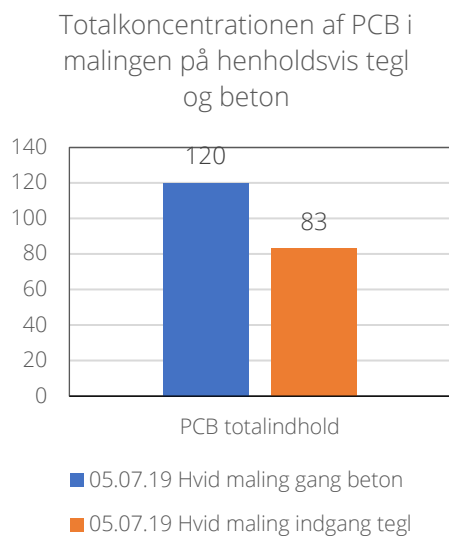
Prøveplanen for forsøget er vist i nedenstående tabel:

Tid	Prøvetype	Teglsten	Beton
Opstartsprøve	Materialeprøver	05.07.2019	05.07.2019
FLEC-målingen før forsøg	Luftprøver	10.-13.09.2019	13.-17.09.2019
Kontrol af rumluft og filter	Luftprøver	07.02.2020	06.05.2020
Uge 1	Materialeprøver	26.03.2020	06.05.2020
Ekstra kontrol af filter	Luftprøver	01.04.2020	
Uge 2	Materialeprøver	01.04.2020	13.05.2020
Uge 3	Materialeprøver	08.04.2020	20.05.2020
Uge 4	Materialeprøver	15.04.2020	26.05.2020
Uge 5	Materialeprøver	24.04.2020	03.06.2020
Uge 6	Materialeprøver	27.04.2020	09.06.2020
FLEC-måling efter forsøg	Luftprøver	24.-27.04.2020	09.-12.06.2020

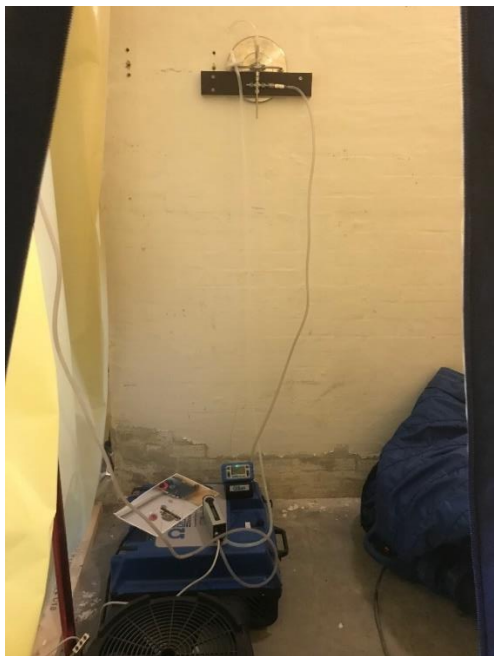
7. Resultater

Forsøgsopstilling - opstartsmålinger

Der blev udtaget malingsprøver på teglstensvæggen og betonvæggen inden opstart af forsøget. Begge prøver viste indhold af PCB svarende til farligt affald. Nedenfor ses totalconcentrationen samt congenfordelingen i malingsprøverne udtaget den 5. juli 2019 (førmålinger).



Der er foretaget FLEC-målinger på begge materialetyper inden varmebehandlingen.



FLEC-måling på teglstensvæg



FLEC-måling på betonvæg

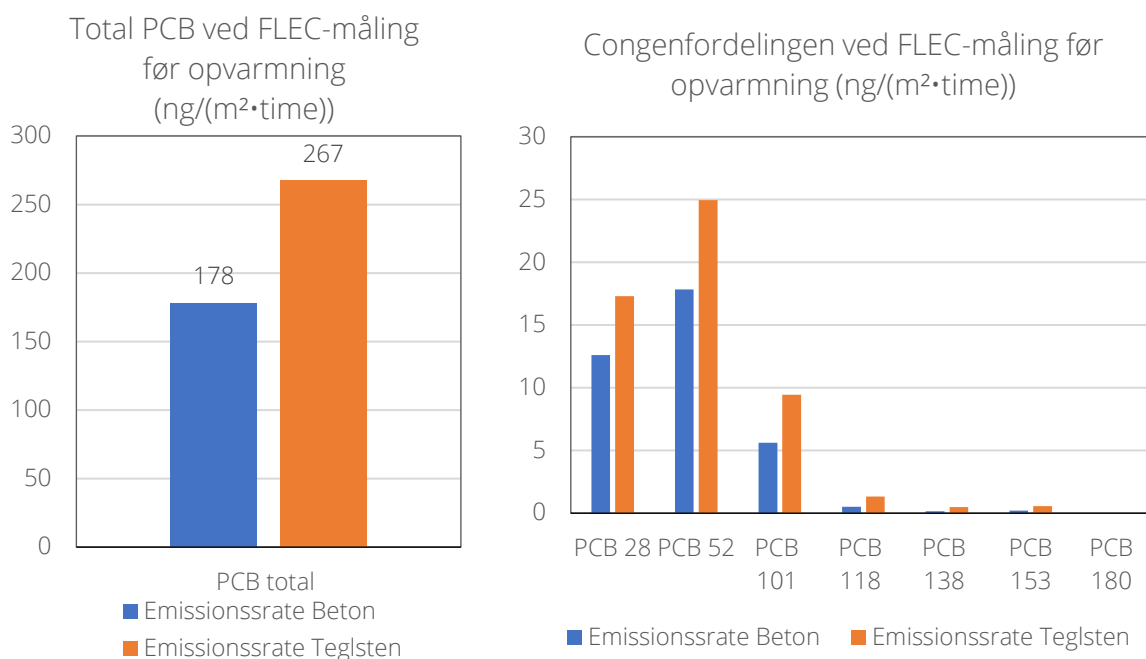
FLEC-målingerne for de to områder viser følgende resultater:

Måling	Beton ng/m ³		Teglsten ng/m ³	
Dato	13-17.09.19		10-13.09.19	
Enheder	ng/m ³	ng/(m ² *time)	ng/m ³	ng/(m ² *time)
PCB 28	99	13	97	17
PCB 52	140	18	140	25
PCB 101	44	6	53	9
PCB 118	4	1	7,5	1
PCB 138	1,1	0	2,7	0
PCB 153	1,5	0	3,1	1
PCB 180	<0,61		<0,27	
PCB sum	290	37	300	53
PCB total	1400	178	1500	267

Målte koncentrationer i cellen (C, ng/m³) kan ved følgende formel omregnes til de arealspecifikke emissionsrate (E, ng/(m² · time))

$$E = \frac{C \cdot Q}{A}$$

hvor Q er luftmængden tilført cellen (m³/time) og A er måleoverfladens areal (m²).

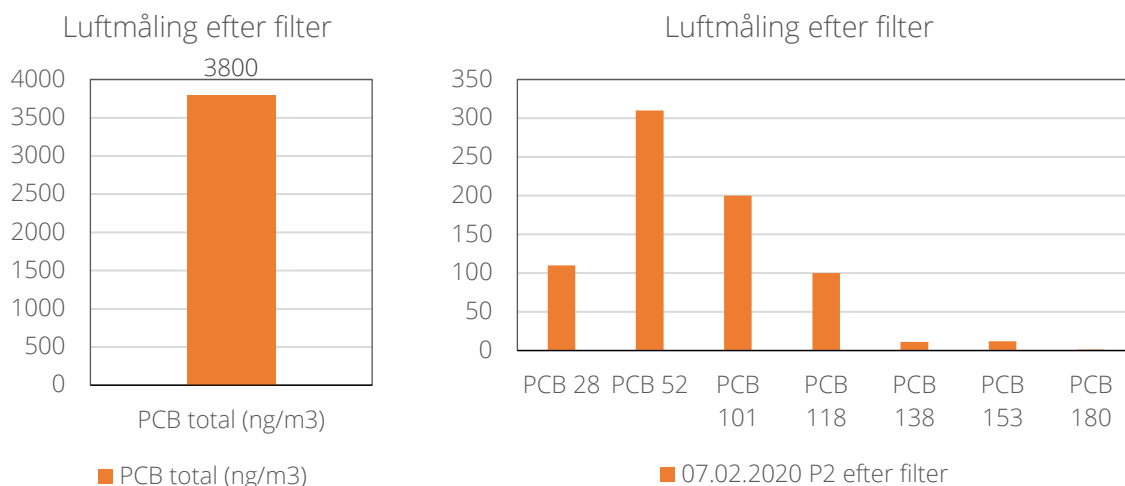


Filtermåling

For at sikre, at den indblæste luft ikke indeholder uacceptabelt høje PCB-koncentrationer, er PCB-koncentrationen i luften efter filtret kontrolleret. Dette er foretaget i forbindelse med begge forsøgsopstillinger. Luftmålingerne er først udtaget efter temperaturen på rumluften er i niveau med forsøgets ønskede temperatur. Baggrunden for dette er, at temperaturen i rumluften har en effekt

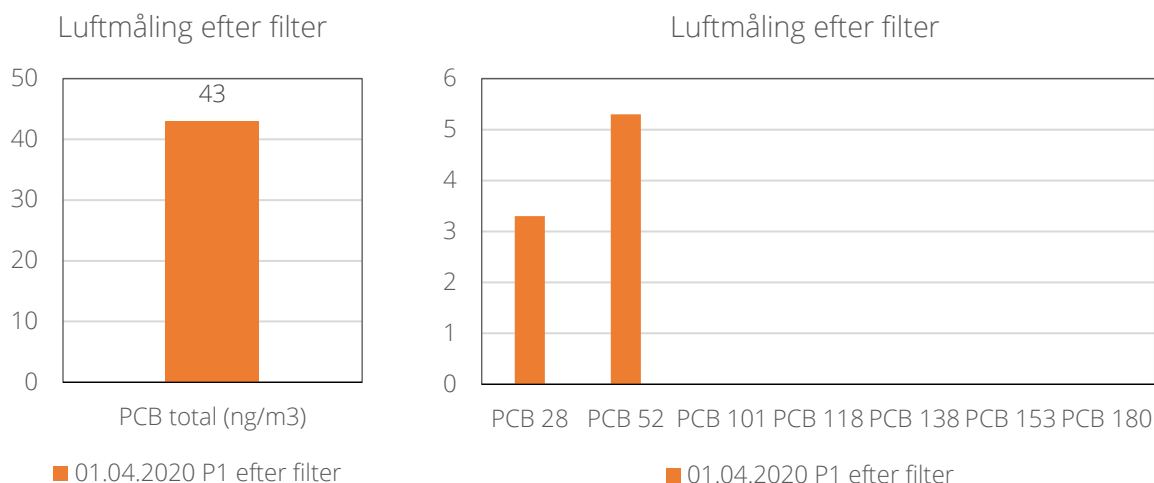
på, om PCB-en i luften bliver bundet til kullene i filtrene eller om temperaturen bevirker, at indlejret PCB i kullene frigives ved opvarmning.

Ved første måling (teglsten), som blev foretaget efter opstart af forsøget på teglstensvæggen, viste analyseresultaterne meget høje PCB-koncentrationer. Det tyder på, at opvarmningen af kullene har bevirket, at PCB'en frigives fra kullene.

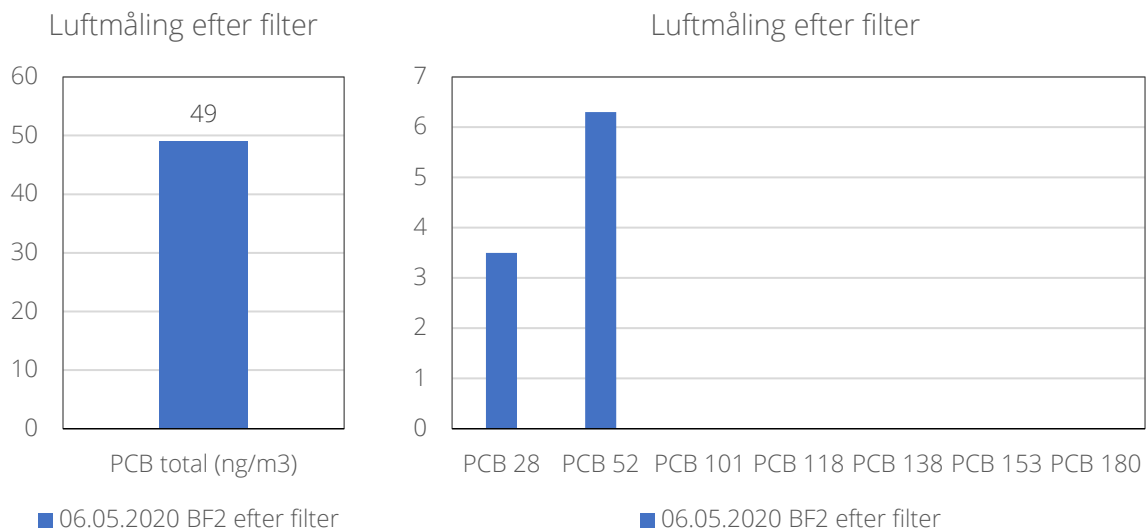


Forsøget blev stoppet og der blev indkøbt nyt filtermateriale.

Forsøget blev genoptaget den 23. marts. Der blev udtaget en ny filterprøve den 1. april. Resultaterne af denne prøve ligger indenfor den acceptable PCB-koncentration.



Efter opstart på andet forsøg med betonvæg, er der igen udtaget en luftprøve til kontrol af filtret. Resultaterne af denne prøve ses i nedenstående diagram.



Forsøgsopstilling - teglstensvæg

Første forsøgsopstilling er opsat på teglstensvæggen. Forsøget er igangsat i uge 3. Opstillingen er kontrolleret, der er opsat dataloggere til opsamling af data for temperatur, luftfugtighed og CO₂.



Figur 1. Testopstilling ved teglvæg



Figur 2. Booster til opvarmning af Drymatic væg

Dataloggere blev opsat den 4. februar 2020, hvor forsøget blev igangsat. Vi ønskede temperaturen så høj som mulig. Da dette forsøg blev sat på pause, var temperaturen nået ca. 44°C. Inden forsøget igen blev startet, blev rør og filter isoleret. Temperaturen mellem måtten og væggen steg til ca. 48°C.

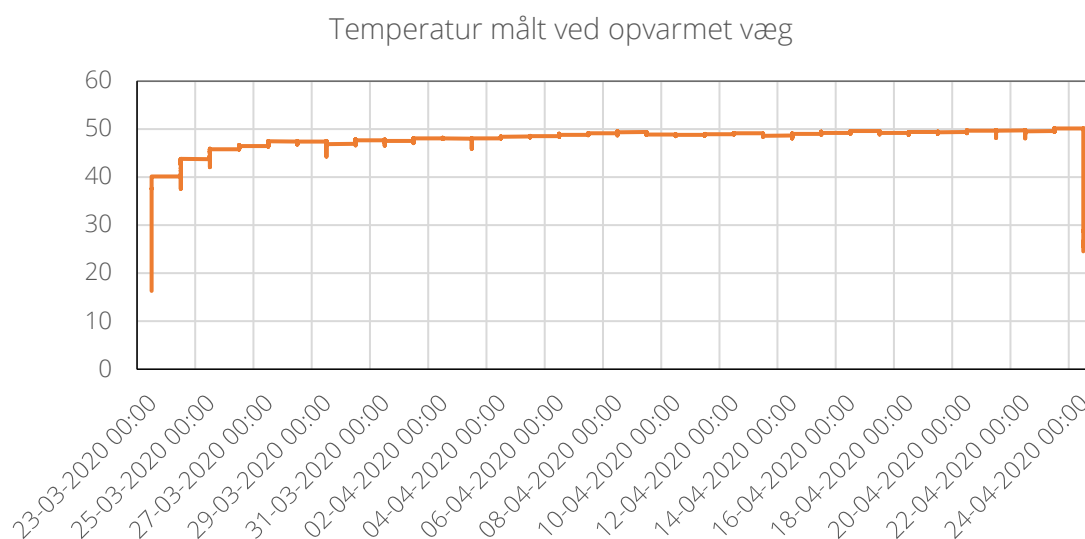
Der blev udtaget en materialeprøve den 07.02.20 samt en materialeprøve den 14.02.20. Begge prøver er udtaget på maling bag Drymatic væggen, hvor der har været ca. 48 °C i henholdsvis 1. og 2. uge efter igangsætningen af forsøget.

Den 07.02.20 blev der ligeledes udtaget prøver af rumluften samt af luften efter filteret. Det viste sig, at der var stor afgasning af PCB fra filteret, hvorfor forsøget blev stoppet den 14.02.2020.

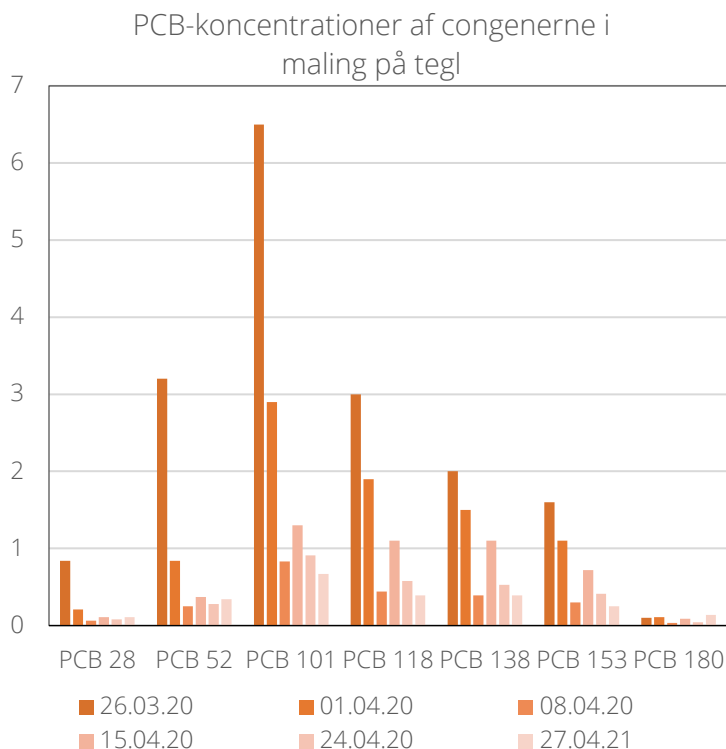
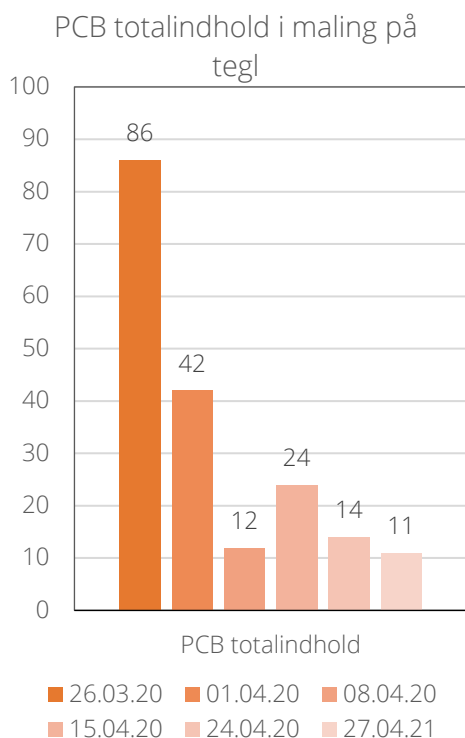
Der anskaffes nye kul til filteret.

Forsøget genoptages den 23. marts, hvor der tændes for opvarmningen. Der udtages en prøve af malingen på teglstensvæggen den 26. marts 2020. Der bliver efterfølgende udtaget materialeprøver af malingen hver uge indtil den 27. april.

Temperaturen ved vægoverfladen måles i hele perioden. På nedenstående kurve fremgår temperaturen.



I nedenstående diagrammer ses henholdsvis totalindholdet af PCB i malingsprøverne uge for uge samt congenfordelingen. PCB-koncentrationen i malingslaget er reduceret til forurenede affald allerede efter 1 uge.



Det fremgår af ovenstående skitser at PCB-niveauet i malingslaget reduceres med 80-90 %.

Den 24. – 27. april udtages der en FLEC-prøve på teglstensvæggen samme sted, hvor der tidligere er udtaget en FLEC-prøve. I dette område er der ikke fjernet maling i forbindelse med prøvetagningerne.

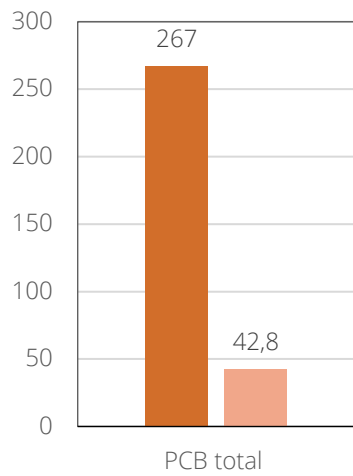
Måling	Teglsten ng/m ³ før		Teglsten ng/m ³ efter	
	10-13.09.19		24-27.04.20	
Dato				
Enheder	ng/m ³	ng/(m ² *time)	ng/m ³	ng/(m ² *time)
PCB 28	97	17	97	4
PCB 52	140	25	140	7
PCB 101	53	9	53	3
PCB 118	7,5	1	7,5	0,3
PCB 138	2,7	0,5	2,7	
PCB 153	3,1	1	3,1	0,1
PCB 180	<0,27		<0,27	
PCB sum	300	53	300	14
PCB total	1500	267	1500	43

Målte koncentrationer i cellen (C, ng/m³) kan ved følgende formel omregnes til de arealspecifikke emissionsrate (E, ng/(m² · time))

$$E = \frac{C \cdot Q}{A}$$

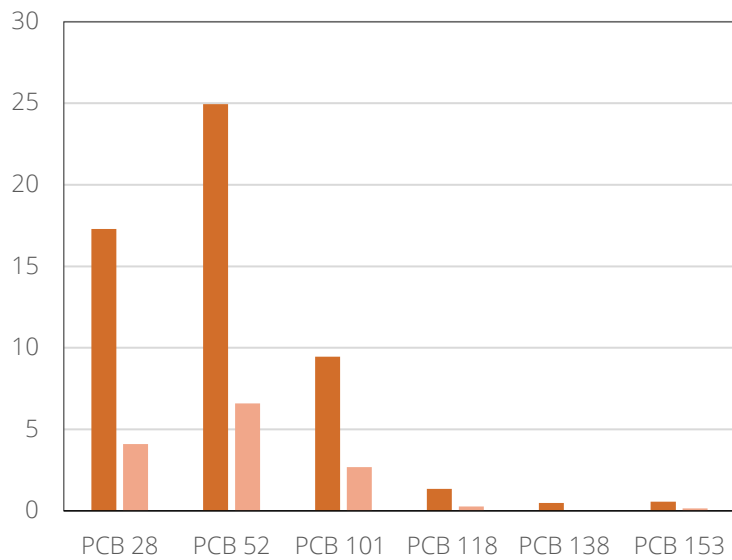
hvor Q er luftmængden tilført cellen (m³/time) og A er måleoverfladens areal (m²).

Emmissionsrate
teglsten (ng/(m²·time))



■ Emissionsrate Før
■ Emissionsrate Efter

Emmissionsrate teglsten (ng/(m²·time))



■ Emissionsrate Før ■ Emissionsrate Efter

Der ses et betydeligt fald i emmissionsraten efter forseglingen. PCB-afgasningen fra teglstensvæggen er reduceret med mellem 80-90 %.

I forbindelse med FLEC-målingen på teglstensvæggen var det svært at få forsøgsopstillingen tæt, da væggen er ujævn. Der er derfor mulighed for en større fejlkilde i forbindelse med dette forsøg, sammenlignet med forsøget med betonvæggen.

Forsøgsopstilling - betonvæg

Anden forsøgsopstilling er opsat på betonvæggen. Forsøget er igangsat den 6. maj 2020. Opstillingen er kontrolleret, der er opsat dataloggere til opsamling af data for temperatur, luftfugtighed og CO₂. Dataloggeren, som har målt bag varmemåtten, blev nedtaget den 15. maj pga. tekniske problemer (muligvis pga. for høj temperatur).



Figur 3. Testopstilling ved betonvæg

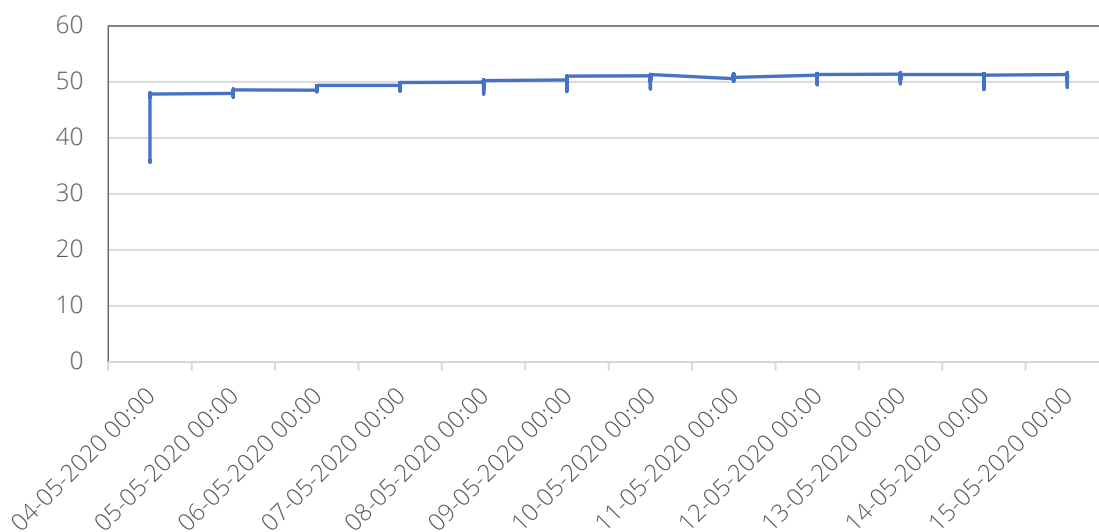


Figur 4. Opstilling med lufttæt rum og isoleret filter

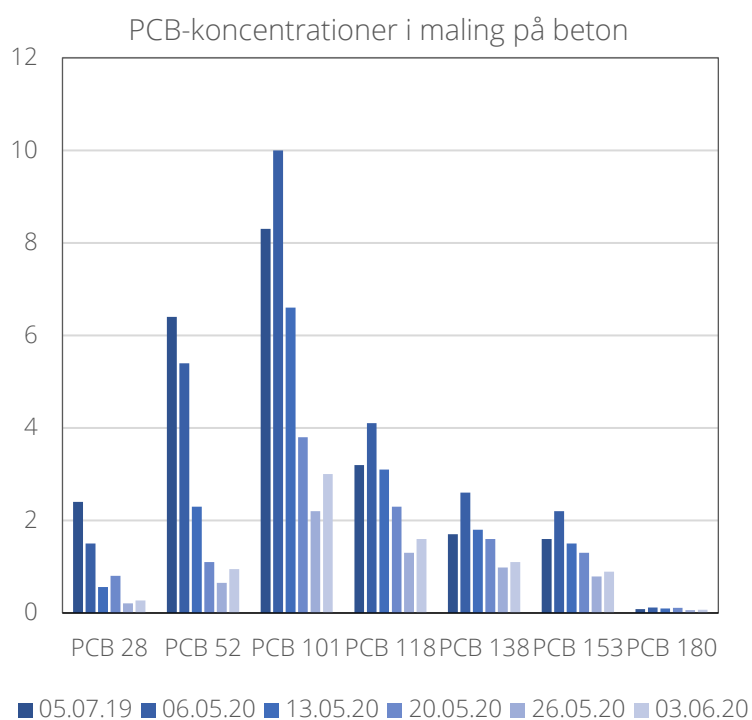
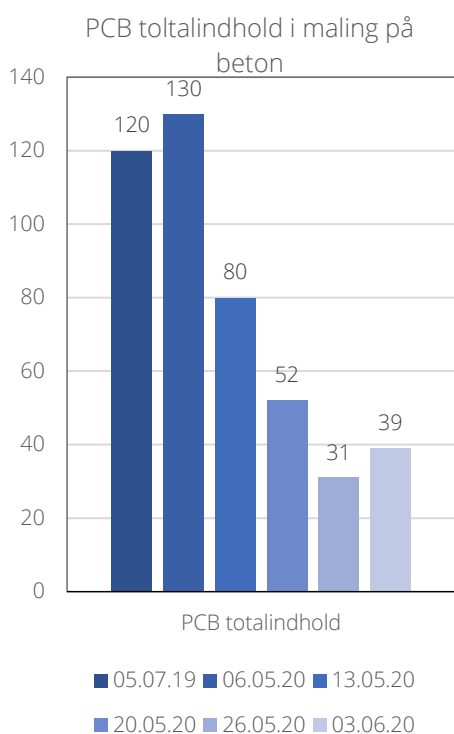
Der udtages en prøve af malingen på betonvæggen den 6. maj 2020. Der bliver efterfølgende udtaget materialeprøver af malingen hver uge indtil den 9. juni.

Temperaturen ved vægoverfladen måles i perioden fra den 4. – 15. maj. På nedenstående kurve fremgår temperaturen. Det vurderes på baggrund af opstillingen og de registrerede forhold ved prøvetagningen, at temperaturen har været stabil gennem hele forsøget fra den 6. maj til 9. juni 2020.

Temperaturen målt ved den opvarmede betonvæg



I nedenstående diagrammer ses henholdsvis totalindholdet af PCB i malingsprøverne uge for uge samt congenfordelingen. PCB-koncentrationen er reduceret til forurenet affald efter 4 ugers opvarmning.



Det fremgår af ovenstående skitser, at PCB-niveauet i malingslaget reduceres med 60-70 %.

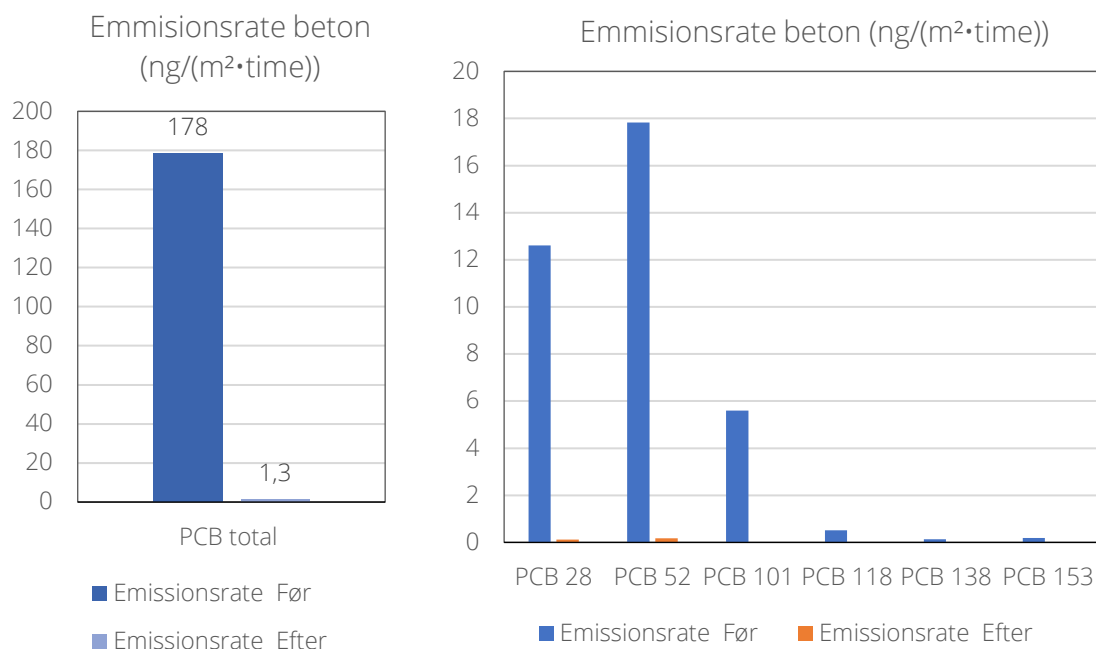
Den 9. -12. juni udtages der en FLEC-prøve på betonvæggen samme sted, hvor der tidligere er udtaget en FLEC-prøve (førmåling). I dette område er der ikke fjernet maling i forbindelse med prøvetagningerne.

Måling	Beton ng/m ³ før		Beton ng/m ³ efter	
Dato	13-17.09.19		9-12.06.20	
Enheder	ng/m ³	ng/(m ² *time)	ng/m ³	ng/(m ² *time)
PCB 28	99	13	0,91	0,1
PCB 52	140	18	1,4	0,2
PCB 101	44	6	<0,6	
PCB 118	4	1	<0,6	
PCB 138	1,1	0	<0,6	
PCB 153	1,5	0	<0,6	
PCB 180	<0,61		<0,6	
PCB sum	290	37	2,3	0,3
PCB total	1400	178	10	1,3

Målte koncentrationer i cellen (C, ng/m³) kan ved følgende formel omregnes til de arealspecifikke emissionsrate (E, ng/(m² · time))

$$E = \frac{C \cdot Q}{A}$$

hvor Q er luftmængden tilført cellen (m³/time) og A er måleoverfladens areal (m²).



Der ses et betydeligt fald i emmissionsraten efter forseglingen. PCB-afgasningen fra betonvæggen er reduceret med op til 99 %.

Fjernelse af PCB - Diskussion

Der er i malingslaget målt en PCB-reduktion på 80-90 % og 60-70 % hhv. på teglstenvæg og på betonvæg. Forskellen mellem de to forsøg kunne ligge i, at det er foretaget udbagning af teglstensvæggen i 2 uger mere end på betonvæggen (tidligt i februar, inden kulfiltrene blev udskiftet) og det kan muligvis forklare, at PCB-koncentrationen i malingslaget for betonvæggen ikke er faldet lige så meget som for teglstenene.

Tværtimod er PCB-afgasningen blevet reduceret med hhv. 80-90 % og 99 % på teglstenvæg og på betonvæg. En mulig forklaring på den observerede forskel kunne ligge i et øget usikkerhedsniveau ifm. FLEC-målingen på teglstensvæggen, hvor der har været vanskeligt at få forsøgsopstillingen tæt, pga. væggenes ujævnhed.

Energiforbrug

Det målte strømforbrug ved teglstenvæggen og betonvæggen udgør hhv. 2809,1 kWh og 1558,4 kWh for de 4 uger testperioder. Strømforbruget er dermed 80 % større ved forsøget på teglstenvæg end på betonvæg. Dette skyldes formentlig rummets placering (indgangsdøren er placeret i rummet) og størrelse (rummet er større, dermed er der større volumen af kold luft, som er med til at køle det opvarmede område ned).

Tidsforbrug

Der er ikke blevet målt tidsforbrug ved forsøget på Selsmoseskolen, da en værdi fra et pilotforsøg ikke vil være relevant ifm. fuldskalaforsøg. Det har dog været muligt for Tscherning at estimere et tidsforbrug ved et forsøg på rums niveau: Tscherning skønner, at en behandling af et helt rum (kun vægge) på $42 \text{ m}^2_{\text{VEGAREAL}}$ ($10 \text{ m}^2_{\text{ETAGEAREAL}}$ og 3 m til loftet), vil tage ca. 15 mennesketimer. Dette svarer til $1,3 \text{ mennesketimer/m}^2_{\text{ETAGEAREAL}}$. Resultater fra MUDP-projektet PCB-frit byggeri (2018) viser, at tidsforbruget ifm. en traditionel termisk oprensning beløber sig på $0,61 \text{ mennesketimer/m}^2_{\text{ETAGEAREAL}}$.

8. Miljømæssige og økonomiske aspekter

Den miljømæssige og økonomiske performance af den undersøgte teknologi er blevet evalueret vha. en miljømæssig og økonomisk screening. Det er ikke foretaget en rigtigt LCA, da det tilgængelige datagrundlag for varmemåtte-metoden er meget begrænset. Formålet med denne øvelse er både at evaluere metodens bæredygtighed, men også at identificere dens kritiske punkter, som kræver yderligere optimering inden teknologien kan implementeres succesfuldt.

Den funktionelle enhed, dvs. den enhed, der anvendes i analyserne, er her $1 \text{ m}^2_{\text{ETAGEAREAL}}$ i en bygning forurenede med PCB. Resultaterne for den termiske oprensning vha. varmemåtter (Scenarie A) sammenlignes med resultaterne for traditionel termisk oprensning (Scenarie B) samt termisk oprensning med varmepaneller (Scenarie C), som blev undersøgte ifm. MUDP-projektet PCB-frit byggeri (2018).

Undersøgte scenarier

Scenarie A: Termisk oprensning med varmemåtter

Til dette scenarie er der blevet brugt energiforbrugsdata fra pilotskala forsøg i Selsmoseskolen (gennemsnit af de to forsøg). Forsøget er dog blevet opstillet som et pilotskalaforsøg mhp. at demonstrere metodens effektivitet. Derfor kan data såsom energi- eller tidsforbrug samt forbrug ifm. ventilation ikke uden videre skaleres op til et fuldskalaforsøg. Dermed skal data for energiforbrug betragtes som et meget konservativt og overestimeret overslag. Et fuldskalaforsøg på rumniveau anbefales som næste skridt. Data for ventilation og kulfiltrerforbrug stammer fra fuldskalaforsøg i Lille Værløse skole fra PCB-frit byggeri projekt, evt. korrigeret efter Tschernings vurdering og erfaring (det er fx antaget, at det ikke vil være behov for ventilationslanger ved et fuldskalaforsøg på rumniveau, og at ventilationsrørene kan genbruges igen og igen et rum efter det andet).

Scenarie B: Traditionel termisk oprensning

Til dette scenarie er der udelukkende blevet brugt direkte data fra forsøget på Lille Værløse Skole, bl.a. energi- og materialeforbrug.

Scenarie C: Termisk oprensning med varmepaneller.

Til dette scenarie er der blevet brugt energiforbrugsdata fra pilotskala forsøg med varmepaneller i Brøndby Strand fra PCB-frit byggeri projekt. Data for ventilation og kulfiltrerforbrug stammer fra fuldskalaforsøg i Lille Værløse skole fra PCB-frit byggeri projekt (Der er i PCB-frit byggeri MUDP-projektet blevet kørt to parallelle forsøg med to forskellige varmepaneller med to forskellige overfladetemperaturer. I dette afsnit er data præsenteret som et gennemsnit af resultaterne for de to enkelte forsøg).

Miljømæssig opgørelse

Alt energi- og materialeforbrug ifm. forsøget er præsenteret i Tabel 1. **Tabel 1**

Tabel 1 Miljømæssig opgørelse pr. $m^2_{ETAGEAREAL}$ for de tre undersøgte metoder

<u>Termisk oprensning</u>			<u>Varmepaneller</u>			<u>Varmemåtter</u>		
Strømforbrug			Strømforbrug			Strømforbrug		
Strøm	5,38E+01	kWh	Strøm	3,71E+03	kWh	Strøm	1,32E+03	kWh
Fyringsolie	2,28E+01	L						
Forbrug af materialer			Forbrug af materialer			Forbrug af materialer		
Ventilationsanlæg	3,36E-04	unit	Ventilationsanlæg	3,36E-04	unit	Ventilationsanlæg	3,36E-04	unit
Plastslanger (LDPE)	1,49E-03	kg	Plastslanger (LDPE)	1,49E-03	kg	-	-	
Ventilationsrør	6,26E-02	m	Ventilationsrør	6,26E-02	m	Ventilationsrør	5,56E-03	m
Blæsere	2,24E-04	unit	Blæsere	2,24E-04	unit	Blæsere	2,24E-04	unit
Kalorifere	1,64E-03	unit	Varmepaneller - rustfrit stål	4,23E+00	kg	Varmemåtter - Nylon 66	2,00E+00	kg
Oliefyfyr	3,73E-05	unit						
Olie lager tank	7,47E-06	unit						
Kulfiltre	1,11E+00	kg	Kulfiltre	1,11E+00	kg	Kulfiltre	1,11E+00	kg

Resultaterne viser, at strømforbruget ifm. varmemåtter er væsentlig højere (24 gange) end ved en traditionel termisk oprensning, selvom det er 2 gange lavere end ved varmepaneller (hhv. 1321 kWh/ $m^2_{ETAGEAREAL}$, 53,8 kWh/ $m^2_{ETAGEAREAL}$ og 3706 kWh/ $m^2_{ETAGEAREAL}$).

Ved at omregne strøm- og olieforbruget til kg CO₂ ækv. er det muligt at sammenligne metoderne på det samlede energiforbrug. Resultaterne (præsenteret i Tabel 2) viser igen, at termisk oprensning er metoden med den laveste miljøbelastning fra energiforbrug, sanering vha. varmemåtter har 15 gange højere miljøbelastning, mens sanering vha. varmepaneller giver 43 gange større miljøbelastning.

Tabel 2 Miljøpåvirkninger knyttet til energiforbruget for de tre undersøgte metoder

Samlet GWP miljøbelastning	
Termisk oprensning	32,3 kg CO ₂ ækv./ $m^2_{GULVAREAL}$
Varmepaneller	1415,8 kg CO ₂ ækv./ $m^2_{GULVAREAL}$
Varmemåtter	504,8 kg CO ₂ ækv./ $m^2_{GULVAREAL}$

Dog skal det understreges, at strømforbrugsdata for varmemåtter stammer fra et pilotskalaforsøg og ikke uden videre kan skaleres op til et fuldskalaforsøg. Derudover er der stor spredning mellem energiforbrug i de to forsøg (hhv. på teglsten- og betonvæg), hvilket fremhæver, at det er brug for et mere robust datagrundlag. Der er derfor potentiale for en væsentlig reduktion af strømforbrug, som kan gøre metoden med varmemåtter mere konkurrencedygtigt ift. en traditionel termisk oprensning. Det skal dog bemærkes, at forsøget med traditionel termisk oprensning på Lille Værlose Skole er blevet kørt i 8 uger (forsøget er blevet overdimensioneret ud fra et forsigtighedsprincip), kontra en opvarmning i kun 4 uger med varmemåtter på Selsmoseskolen, hvilket har været med til at begrænse energiforbruget.

Derudover er der i forsøget med varmemåtter ikke anvendt olie, hvilket gør metoden særlig interessant ifm. bæredygtighed, da man kan vælge en vedværende strømforsyning og dermed sænke klimabelastningen yderligere.

Økonomisk opgørelse

Alle økonomiske omkostninger ifm. forsøget er præsenteret i Tabel 3.

Tabel 3 Økonomisk opgørelse pr. $m^2_{ETAGEAREAL}$ for de tre undersøgte metoder

Termisk oprensning	[kr/m ²]	Varmepaneller	[kr/m ²]	Varmemåtter	[kr/m ²]
Arbejdskraft termisk stripning	213,9	Arbejdskraft	81,7	Arbejdskraft	525,0
Strøm	26,9	Strøm til panelerne	1853,1	Strøm	660,7
Olie	250,3	Strøm til blæsere	6,3	Måtter	74,9
Ventilationsanlæg	583,3	Strøm til ventilationsanlæg	12,4	Boostbar	50,8
Blæsere, kaloriferer, Oliefyr	408,3	Panel	1622,2	Blæser	153,4
Kulfiltre (materiale)	66,7	Ventilationsanlæg	583,3	Ventilationsanlæg	262,5
Bortskaffelse kulfiltre inkl. kørsel	13,1	Kulfiltre (materiale)	66,7	Kulfiltre (materiale)	66,7
Krydsfiner	5,8	Bortskaffelse kulfiltre inkl. kørsel	13,1	Bortskaffelse kulfiltre inkl. kørsel	13,1
Reglar	1,7	Andre materialer (groft estimat)	31,2		
Rockwool	3,1	Blæsere	145,8		
Andre materialer (groft estimat)	5,6				
Affald (afleveringspris)	0,3				
I alt	1578,9	I alt	4415,9	I alt	1807,0

Resultaterne viser, at omkostningerne ifm. varmemåtter er kun 14 % højere end en traditionel termisk oprensning, og væsentlig lavere (60 %) end ved varmepaneller (hhv. 1807 kr/ $m^2_{ETAGEAREAL}$, 1579 kr/ $m^2_{ETAGEAREAL}$ og 4416 kr/ $m^2_{ETAGEAREAL}$). Det store, yderligere potentiale for strømbesparelser taget i betragtning, kan saneringsmetoden vha. varmemåtter betragtes som en lovende teknologi for mere fleksibel PCB-sanering. Derudover skal det understreges, at de undersøgte omkostninger er udelukkende direkte udgifter. Indirekte besparelser, fx relaterede til en mere fleksibel logistik (bygning kan holdes i drift under behandling/mindre genhusning) er ikke omfattet af beregningerne.

9. Overordnet vurdering af metoden og perspektiver

Der er i projektbeskrivelsen lagt op til, at projektet kan betragtes som succesfuldt, når:

1. Mere fleksible PCB-saneringer kan udføres, dvs. PCB kan fjernes fra en bygning uden at skulle lukke den fuldstændig ned.
2. Energiforbruget kan reduceres med min. 15 % ift. almindelig termisk stripping.
3. Tidsforbruget ifm. opsætning/nedtagning af systemet kan reduceres ved min. 20 % ift. almindelig termisk stripping.
4. De nye optimerede muligheder er formidlet bredt til miljøsanerings- og miljørådgiverbranchen.

Overordnet vurderer vi, at succeskriterierne er delvis opfyldt:

1. Projektet har vist, at det er teknisk muligt at fjerne PCB fra PCB-forurenede overflade vha. varmemåtter til et niveau svarende til forurenede affald. PCB-niveauet i malingslaget er blevet reduceret med 80-90 % på teglstenvæg, og med 60-70 % på betolvæg, mens PCB-afgasningen er blevet reduceret med hhv. 80-90 % og 99 %. Dette har været muligt med en opvarmning i 4 uger, kontra en opvarmning i 8 uger ved traditionel termisk oprensning på Lille Værløse Skole ud fra et forsigtighedsprincip. Den kortere behandlingstid har været med til at begrænse energiforbruget.
2. Det har ikke været muligt at reducere energiforbruget ift. traditionel termisk stripping. Dog skal det understreges, at formålet med de udførte forsøg har været at samle viden om termisk oprensning vha. varmemåtter overhovedet kunne være en effektiv metode til fjernelse af PCB. Projektet er blevet udført i form af et pilotskala forsøg, og har ikke omfattet et fuldskalaforsøg, hvor realistiske energiforbrugsdata kunne indsamles. Et fuldskalaforsøg på rumniveau anbefales som næste skridt, og der forventes det, at energiforbruget pr. $m^2_{ETAGEAREAL}$ vil reduceres, da varmetabet bedre kan begrænses på rumniveau end på enkelt vægniveau. Det er dog uklart, om det vil være realistisk at reducere energiforbruget ift. en traditionel termisk oprensning.
3. Det har ikke været muligt at reducere tidsforbruget ifm. opsætning/nedtagning af systemet, da der skal ophænges måtter, lægges ventilationsrør osv. i et rum ad gangen. Dermed forventes det, at tidsforbruget pr. $m^2_{ETAGEAREAL}$ altid vil blive større til opsætning og nedtagning end ved konventionel opvarmning. Til gengæld giver den nye metode mulighed for at anvende termisk oprensning på mindre bygninger/projekter, hvor der i dag slet ikke vil blive miljøsaneret, da det vil ikke kunne betale sig at bruge en traditionel termisk oprensning, som kun er egnet til større projekter. Endvidere, er den vigtigste styrke af metoden med varmemåtter fleksibiliteten, da bygningen kan holdes i drift og der er ingen (eller meget begrænset) behov for genhusning under sanering.
4. TI har afholdt et webinar d. 09.11.2020 (med 33 tilmeldte) mhp. at formidle viden om den nye metode til miljøsanerings- og miljørådgiverbranchen. En artikel og 2 blogindlæg er derudover blevet udarbejdet.

10. Konklusion

Projektet Flex-PCB har undersøgt mulighederne for en termisk oprensning af PCB-forurening vha. overfladespecifikke varmekilder i form af en kommercielt tilgængelig, fleksibel varmemåtte (Drymatic), som pt. anvendes til udtørring af bygninger ifm. vandskadesanering. Varmemåtterne kan muliggøre behandlingen af ét rum ad gangen med en hurtigere opsætning og nedtagning, og dermed øget fleksibilitet og reducerede omkostninger.

Metoden er blevet testet ved 2 pilotskalaforsøg på en teglsten- og en betonvæg i Selsmoseskole (Taastrup), hvor den har vist sig at være effektiv, med reduktion af PCB-niveau både i malingslaget (80-90 % og 60-70 % hhv. på teglstenvæg og på betonvæg) og som PCB-afgasning (80-90 % og 99 % hhv.) efter 4 uger behandling på ca. 50 °C.

Den miljømæssige og økonomiske performance af den undersøgte teknologi er blevet evalueret vha. en miljømæssig og økonomisk screening i form af en opgørelse for 1 m²_{ETAGEAREAL} i en bygning forurenet med PCB. Resultaterne for den termiske oprensning vha. varmemåtter sammenlignes med resultaterne for traditionel termisk oprensning, samt termisk oprensning med varmepaneller, som blev undersøgt ifm. MUDP-projektet PCB-frit byggeri (2018).

Resultaterne af den miljømæssige opgørelse viser, at det ikke har været muligt at reducere energiforbruget ift. traditionel termisk stripping: strømforbruget ifm. varmemåtter er væsentlig højere end ved en traditionel termisk oprensning, selvom det er lavere end ved varmepaneller. Dog skal det understreges, at formålet med forsøget har været at undersøge metoden effektivitet til at fjerne PCB via et pilotskala forsøg, og ikke at indsamle realistiske energiforbrugsdata ved et fuldskalaforsøg på rumniveau, hvor det forventes, at energiforbruget pr. m²_{ETAGEAREAL} vil reduceres.

Der er derfor potentiale for en væsentlig reduktion af strømforbrug, som kan gøre metoden med varmemåtter mere konkurrencedygtig. Derudover er der i forsøget med varmemåtter ikke anvendt olie, hvilket gør metoden særlig interessant ifm. bæredygtighed, da man kan vælge en vedværende strømforsyning og dermed sænke klimabelastningen yderligere.

Resultaterne af den økonomiske opgørelse viser, at omkostningerne ifm. varmemåtter er kun 14 % højere end en traditionel termisk oprensning, og væsentlig lavere end ved varmepaneller. Evt. yderligere strømbesparelser vil gøre PCB-sanering vha. varmemåtter en lovende teknologi for mere fleksibel PCB-sanering. Indirekte besparelser, fx relaterede til en mere fleksibel logistik, er ikke blevet kvantificeret.

Det forventes, at det ikke vil være muligt at opnå tidsbesparelser ved større projekter, da metoden kræver en separat opsætning i hvert rum. Til gengæld giver den nye metode mulighed for at anvende termisk oprensning på mindre bygninger/projekter, hvor der i dag slet ikke bliver miljøsaneret, da det vil ikke kunne betale sig at bruge en traditionel termisk oprensning, som kun er egnet til større projekter. Endvidere ligger den største fordel ved metoden med varmemåtter i fleksibiliteten, da bygning kan holdes i drift og der er ingen (eller meget begrænset) behov for genhusning under sanering.