



Metod för optimal rengöring av värmeväxlare



Metod för optimal rengöring av värmepåväxlare

Lönsamhetsstudie baserad på fältmätningar och
laborativa undersökningar

Akram Abdul Hamid

Dennis Johansson

Hans Bagge



Energimyndighetens projektnummer: 41832-1

E2B2



Förord

E2B2 Forskning och innovation för energieffektivt byggande och boende är ett program där akademi och näringsliv samverkar för att utveckla ny kunskap, teknik, produkter och tjänster.

I Sverige står bebyggelsen för cirka 35 procent av energianvändningen och det är en samhällsutmaning att åstadkomma verklig energieffektivisering så att vi ska kunna nå våra nationella mål inom klimat och miljö. I E2B2 bidrar vi till energieffektivisering inom byggande och boende på flera sätt. Vi säkerställer långsiktig kompetensförsörjning i form av kunniga människor. Vi bygger ny kunskap i form av nyskapande forskningsprojekt. Vi utvecklar teknik, produkter och tjänster och vi visar att de fungerar i verkligheten.

I programmet samverkar över 200 byggtreprenörer, fastighetsbolag, materialleverantörer, installationsleverantörer, energiföretag, teknik konsulter, arkitekter etcetera med akademi, institut och andra experter. Tillsammans skapar vi nytta av den kunskap som tas fram i programmet.

Metod för optimal rengöring av värmeväxlare är ett av projekten som har genomförts i programmet med hjälp av statligt stöd från Energimyndigheten. Det har letts av Installationsteknik - LTH och har genomförts i samverkan med OCO Nordic.

Ett väl fungerande inneklimatsystem är grundläggande för en god inomhusmiljö och låg energianvändning. Dock är rengöringen ofta eftersatt vilket försämrar både funktion och energieffektivitet. En nyutvecklad metod gör att rengöringen kan optimeras och påtagligt minska energianvändningen och effektopparna i byggnader. Projektet har tagit fram kunskap om när rengöringen behövs, utvecklat en modell som bedömer hur effektiv rengöringen är och tagit fram en process för implementering. Målet är ökad energieffektivitet, hållbarhet och funktion.

Stockholm, 2 januari 2018

Anne Grete Hestnes,

Ordförande i E2B2

Professor vid Tekniskt-Naturvetenskapliga Universitetet i Trondheim, Norge

Rapporten redovisar projektets resultat och slutsatser. Publicering innebär inte att E2B2 har tagit ställning till innehållet.



Sammanfattning

Ett sätt att uppnå god inomhusmiljö i en byggnad är med hjälp av ett mekaniskt ventilationssystem. Ett mekaniskt ventilationssystem kan innehålla diverse komponenter med funktioner för filtrering, tillförsel, uppvärmning och nedkylning av luften som tillförs. För att få ett energieffektivt ventilationssystem behövs dessutom komponenter för återvinning av värmen, som annars följer med frånluften. För att upprätthålla de fasta komponenternas funktioner, samt systemets energieffektivitet, bör komponenterna rengöras. Dock är det inte helt klart hur ofta rengöring bör utföras, och medan det finns klara riktlinjer för filterbyte så finns det inte det för rengöring.

För att ta fram en modell som optimerar rengöring för värmeväxlare, har data samlats in genom fältmätningar på förändringar av tryckfall, temperaturer och flöden. Mätningar har gjorts före och efter rengöring med torrisblästring. I laboratorieexperiment har dessutom effekten av nedsmutsningen av ett värme- och kylbatteri analyserats.

Resultat från fältmätningar visar att temperaturverkningsgraden på värmeväxlare ökar med 10 % - enheter i genomsnitt, samt att tryckfallet minskar i genomsnitt med 11 % i jämförelse med fallet före rengöring. Resultat från laboratorieförsöken visar att tryckfallet ökar med smutsmängden enligt en exponentiell funktion, att värmeöverföringen minskar med smutsmängden, att fläkten behöver öka i varvtal när smutsmängden ökar, och att rengöring återställer ursprungsfunktionaliteten.

Projektet har resulterat i flera modeller som kan användas för bedömning av lönsam rengöringsfrekvens eller lönsamheten i rengöring av ett specifikt aggregat baserat på tryckfallsmätningar. Projektet har dessutom visat att sådan här forskning behövs, och litteraturen visar att en ökad rengöringsfrekvens kan bidra till förbättrat inneklimat, bättre hälsa, sänkt buller, ökad energibesparing, och sänkta utsläpp.

Framtida forskning på inverkan av rengöring bör inkludera intervjuer med brukare och fastighetsägare för att få med deras åsikter om rengöringens inverkan på deras inomhusmiljö och verksamheter. Den bör även inkludera långtidsmätningar på tryckfall och temperaturverkningsgrader i värmeväxlare över tid före och efter en rengöring och energimätningar. Detta bör kopplas till olika verksamhetstyper och orter i landet för att få resultat som täcker vårt breda bostadsbestånd.

Nyckelord: ventilation, effektivitet, rengöring, värmeväxling, tryckfall



Summary

One way of achieving a good indoor environment in a building is by means of a mechanical ventilation system. A mechanical ventilation system may contain various components with functions for filtration, supply, heating and cooling of the air supplied. In order to maintain an energy-efficient ventilation system, heat recovery components are also required, which are included in the extract air. In order to maintain the constituent components, as well as the energy efficiency of the system, the components should be cleaned frequently. However, it is not clear how frequent these should be cleaned, and while there are clear guidelines for filter change, there are none for cleaning.

In order to produce a model that optimizes the cleaning frequency of heat exchangers, data has been collected through field measurements on changes in pressure drops, temperatures and flows. Measurements have been conducted before and after cleaning with dry-ice (torrisblästring). In laboratory experiments, the impact of the fouling of a heating and cooling battery has also been analyzed.

Results from field measurements show that the latent-heat exchange-efficiency of the included heat exchangers has increased by 10% on average and that the pressure drop over these has decreased on average by 11% compared with the case before the cleaning. Results from laboratory tests show that the pressure drop increases with the amount of fouling, according to an exponential function, while the heat transfer efficiency decreases with the increased fouling. They also show that the fan power needs to increase with the increased fouling and that cleaning restores the original functionality.

The project has resulted in several models that can be used to assess the cleaning frequency with regards to the profitability, based on the facility in which the heat exchanger is installed. One model bases the profitability on pressure drop measurements, in case the time passed since cleaning, renovating or installation of the heat exchanger is unknown. The project has also shown that there is a lack of this type of research, and the referenced literature has shown that an increased cleaning rate should contribute to improved indoor climate, better health, reduced noise, increased energy savings, and reduced green-house gas emissions.

Future research on the impact of cleaning ventilation systems should include interviews with users and property owners in order to include their assessment on the impact of cleaning on their indoor environment and businesses. Future research should also include long-term measurements of pressure drop and latent-heat exchange-efficiency in heat exchangers over time before and after cleaning as well as energy measurements. Different types of usage and different locations in the country should also be considered in such measurements, for representative results for the housing stock.

Key words: ventilation, efficiency, cleaning, heat exchange, pressure drop



INNEHÅLL

1	INLEDNING OCH BAKGRUND	7
1.1	MÅL	8
2	GENOMFÖRANDE	9
2.1	FÄLTMÄTNINGAR	9
2.1.1	DOKUMENTATION MED FOTOGRAFIER	10
2.2	LABORATORIEFÖRSÖK	10
2.3	ENERGI OCH EKONOMI	12
2.3.1	FORMLER	13
3	RESULTAT	15
3.1	FÄLTMÄTNINGAR	15
3.1.1	DOKUMENTATION MED FOTOGRAFIER	17
3.2	LABORATORIEFÖRSÖK	19
3.3	FUNKTIONELL FÖRSÄMRING MED ÖKANDE SMUTSMÄNGD ÖVER TID	22
3.3.1	TRYCKFALL	22
3.3.2	TEMPERATURVERKNINGSGRAD	23
3.4	LÖNSAMHETSANALYS	25
3.4.1	KÄNSLIGHETSANALYS	27
3.5	MODELL - TRYCKFALLSMÄTNING OCH ENERGIFÖRLUST	28
3.6	VÄRME- OCH KYLBATTERI, VÄRMEKOMFORT ÖVER TID	32
4	DISKUSSION	33
5	REFERENSER	35
BILAGOR		FEL! BOKMÄRKET ÄR INTE DEFINIERAT.
BILAGA - MÄTPROTOKOLL FÖR FÄLTMÄTNINGAR		36



1 Inledning och bakgrund

Ett sätt att uppnå god inomhusmiljö i en byggnad är med hjälp av ett mekaniskt ventilationssystem. Ett mekaniskt ventilationssystem kan innehålla diverse komponenter med funktioner för filtrering, tillförsel, uppvärmning och nedkylning av luften som tillförs. För att få ett energieffektivt ventilationssystem behövs dessutom komponenter för återvinning av värmen, som annars följer med frånluften. För att upprätthålla de fasta komponenternas funktioner, samt systemets energieffektivitet, bör komponenterna rengöras. Dock är det inte analyserat hur ofta rengöring bör utföras, och medan det finns klara riktlinjer för filterbyte så finns det inte det för rengöring av värmeväxlare.

Internationella undersökningar har visat att nedsmutsning i aggregat med värmebatterier, kylbatterier eller återvinningsvärmeväxlare påtagligt påverkar både energianvändning och funktion vid nedsmutsning (Montgomery & Baker 2006; Siegel et al. 2002; Wilson et al. 2013). Nedsmutsningen ökar dessutom tryckfall (Proctor Engineering Group 1996; Montgomery & Baker 2006) vilket ökar fläkteffekter (Siegel 2002). Nedsmutsningen minskar dessutom flöden genom aggregat (vid samma varvtal på fläkten) och förkortar deras livslängd (Siegel et al. 2002; Wilson et al. 2013), vilket leder till ökat resursbehov för komponenter. Förutom att nedsmutsning leder till ökad energi- och effektanvändning, leder det även till mekanisk förslitning av ventilationskomponenterna (Proctor Engineering Group 1996) vilket kan leda till att inneklimatet försämras (Siegel 2002) eftersom systemet till slut inte kan leverera önskad funktion. I vissa fall går det så långt att komponenterna slutar fungera, och behöver repareras.

Optimal rengöring av batterier och värmeväxlare i inneklimatestsystem kan som en robust och förhållandevis enkel åtgärd påtagligt minska energianvändningen och maxeffekterna i byggnader och energisystem. Tidigare studier på detta har utförts både baserat på laboratorieexperiment och fältmätningar. I en artikel av Montgomery & Baker (2006) har en fallstudie utförts på rengöring av ett ventilationssystem, som visar att rengöring sparar väsentliga mängder energi, att tryckfallet sjunker över komponenterna, och att de kylande funktionerna återställs genom att värmeöverföringstalet för ett kylbatteri återställs. Luongo et al. (2017) har utfört laboratorieexperiment på nedsmutsningen av ett aggregat belagt med biofilmer, och hur rengöringen påverkar värmeöverföring och tryckfall. Även Siegel (2002) har utfört laboratorieexperiment och kommer fram till att smutsmängden per ytenhet påverkar tryckfallet över ventilationsaggregatet, och att kondens samt kornstorlek på smutsen påverkar hur mycket smuts som avsätts på en värmeväxlare. Siegel (2002) har i sin avhandling resonerat kring hur smuts på värmeväxlare kan avge skadliga bioaerosoler som kan leda till diverse hälsoproblem, vilket bekräftas av mätningar gjorda av Liguori et al. (2010) som har mätt bakterier på batterier i sjukhus före och efter rengöring. Detta bekräftas även av Mendell et al. (2006) som har hittat ett statistiskt samband mellan brist på underhåll av ventilationsbatterier och symptom på spottkörtlar.

Kunskap behöver tas fram om hur ofta och vad som indikerar att ett system ska rengöras ur ett lönsamhetsperspektiv. Fältmätningar inom ämnet är få, och inga samband hittas för försämring av temperaturverkningsgrad (återvinning) pga. smutsmängd och nedsmutsning över tid. Det hittas ej heller någon modell för ökning av tryckfall över tid pga. försmutsning. Denna rapport beskriver därför



flera samband (modeller) för bedömning och säkerställning av energieffektivitet, hållbarhet och funktion över tid.

1.1 Mål

En storskalig implementering av rengöring av värmeväxlare i den bebyggda miljön är en enkel åtgärd som kan spara flera procent av den totala energianvändningen och minska effektbehovet i den bebyggda miljön och därmed bidra till våra nationella mål om hållbarhet.

Projektets specifika mål är att:

- utveckla en modell som utifrån anläggningstyp och verksamhet kan bedöma hur effektiv rengöringen är och därmed optimera vid vilken nedsmutsningsgrad och hur ofta rengöring ska utföras med tanke på livscykelekonomin.
- utveckla en mätmetod som kan bedöma nedsmutsningsgrad och när rengöring behöver utföras för att nå optimal livscykelekonomi.
- baserat på resultaten ta fram en implementeringsprocess som är anpassad till olika aktörer inom branschen och i olika typer av verksamheter vilket är nödvändigt för att lägga grunden för en storskalig nytta.



2 Genomförande

En optimal modell för rengöring bör inkludera inverkan av smutsbeläggning över tid på energieffektiviteten för ventilationsaggregat. I denna rapport har fältmätningar, laborationer, och en litteratursökning utförts för att koppla försämringen av energieffektiviteten hos värmeväxlare till drifttiden för aggregaten. Därefter har lönsamhetsbedömningar utförts baserade på resultatet från mätningar och labbförsök, och till sist har en modell för lönsamhetsbedömning av rengöring framtagits. Parallellt med dessa steg har en implementeringsprocess tagits fram med utgångspunkt från de kvantitativa resultat som projektet tar fram. I denna process har OCO Nordic provat olika sätt att kommunicera med olika målgrupper hos kunderna.

2.1 Fältmätningar

Mätningar över ventilationsaggregat har gjorts före och efter rengöring med torrisblästring, enligt anvisningar i ett mätprotokoll utvecklat av LTH, se *Bilaga – Mätprotokoll för fältmätningar*. Mätningar i fält utfördes av *OCO Nordic AB*, i vissa fall med hjälp av *LTH*. Mätningarna har inkluderat värmeväxlare (för återvinning), värmebatterier, och kylbatterier i ventilationsaggregat. Fältmätningar har utförts med målet att hämta information om följande.

- Rengöringens återställning av aggregatets funktionalitet. Huvudsakligen:
 - Temperaturmätningar för bedömning av återställning av temperaturverkningsgrad. Detta har gjorts med *testo 605i* från *Nordtech Instrument*, som har en noggrannhet på $\pm 0,8$ °C vid -20-0 °C, och $\pm 0,5$ °C vid 0-60 °C.
 - Differenstryckmätningar för bedömning av återställning av tryckfall över rengjord värmeväxlare. Detta har gjorts med *testo 510i* från *Nordtech Instrument*, som har en noggrannhet på $\pm 0,05$ hPa vid 0-1 hPa, och $\pm 0,2$ hPa vid 1-150 hPa.
 - Luftflödesmätningar för bedömning av balans/obalans i värmeväxlare, och kontroll av att driftfallet före och efter rengöring är detsamma. Detta har gjorts genom lufthastighetsmätningar i ventilationskanaler bakom och framför värmeväxlare, med *testo 405i* från *Nordtech Instrument*, som har en noggrannhet på $\pm 0,1$ m/s vid hastigheter på 0-2 m/s, eller $\pm 0,3$ m/s vid hastigheter på 2-15 m/s.
- Information om den tid som har gått sedan något av följande har skett:
 1. Senaste rengöring/ installation av aggregatet.
 2. Renovering av aggregatet.
 3. Installation av aggregatet.
- Information om verksamhetstyp och därmed den typ av smuts som sätter sig på aggregatet.

Tillgänglighet på information samt mätförfarandet och omfattningen av mätningarna har resulterat i ett behov för en gradering av kvalitén hos den framräknade förändringen. Därför har ett system tagits fram i vilket större kontroll över aggregatets driftinställningar eller information om dessa ökar den beräknade förändringens och det uppmätta värdets styrka, se nedanstående tabeller.



Tabell 2.1: Rankningssystem för beräknad förändring på temperaturverkningsgrad pga. aggregatrensköring med torrisblästring. Detta eftersom obalans i systemet samt rotationsgrad på en roterande värmväxlare kan påverka de uppmätta parametrarna (temperaturer och därmed temperaturverkningsgrad).

	Inkluderade kontrollparametrar både före och efter rengöring:
Rank	1. Luftflöde till 2. Luftflöde från 3. Vinkelhastighet
1	0-3 av dessa parametrar
2	1-3 av dessa parametrar
3	2-3 av dessa parametrar
4	3 av dessa parametrar

Tabell 2.2: Rankningssystem för beräknad förändring på tryckfall pga. aggregatrensköring med torrisblästring. Detta eftersom obalans i systemet kan påverka tryckfallsmätningen.

	Inkluderade kontrollparametrar både före och efter rengöring:
Rank	1. Luftflöde till 2. Luftflöde från
1	0-2 av dessa parametrar
2	1-2 av dessa parametrar
3	2 av dessa parametrar

2.1.1 Dokumentation med fotografier

Förutom mätningar har även dokumentation utförts i form av fotografier före och efter rengöring i fält. Tanken har varit att utvärdera okulär besiktning som alternativ metod för bedömning av behovet för rengöring. Fotografierna har tagits både av *OCO Nordic AB* och *LTH*, och sedan jämförts med mätdata för det aggregat som även har användbara mätningar för analysen.

2.2 Laborieförsök

I laborieförsök har effekten av nedsmutsningen av ett värme- och kylbatteri analyserats, se Figur 2.2 för laborieförsökställningen. Målet med dessa försök har varit att bestämma batteriets värmeöverföringseffektivitet när det har varit smutsigt till olika grad. Batteriet har smutsats ned i steg och påverkan på temperaturer och tryckfall har mätts och jämförts med värden för när batteriet har varit rent. Figuren nedan visar två bilder från ett av försöken.



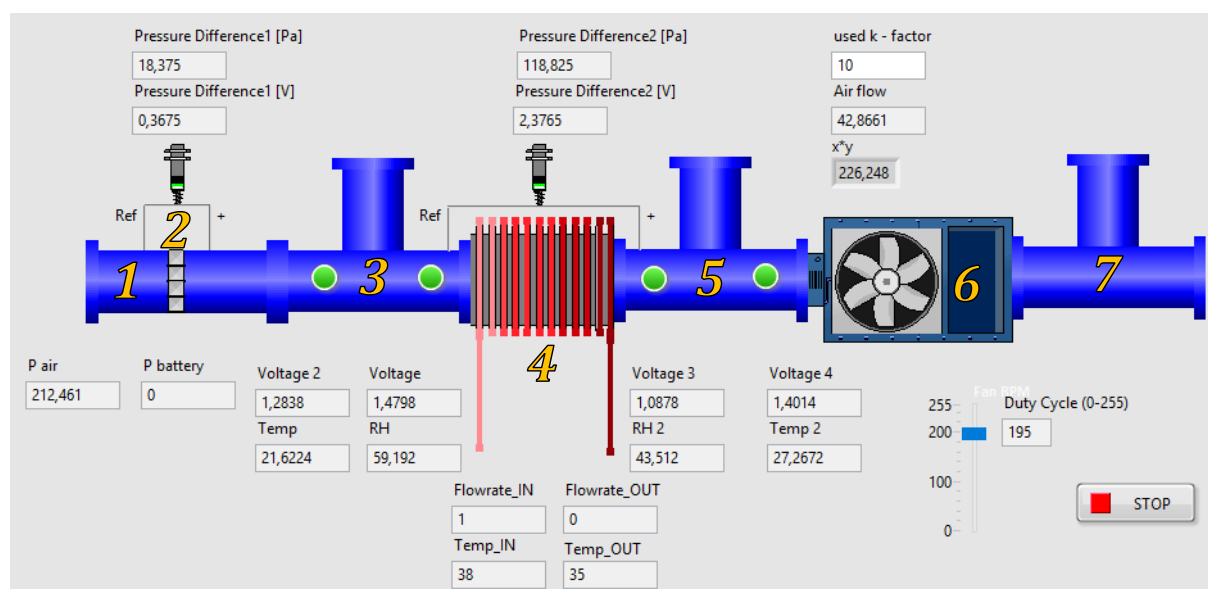
Figur 2.1: Bilder på sista steg i nedsmutsningsförsök med potatismjöl, före (vänster) och efter (höger) rengöring.

Genom mätningar av:

- luftflöde,
- värmevattenflöde,
- temperaturer för luft- och värmevattenflöden,
- och tryckfall över värme- och kylbatteri,

har effekten av nedsmutsningen bedömts genom analyser av värmeöverföringen. Detta har gjorts vid olika smutsmängd över batteriet, med *potatismjöl*, *majsolja*, *vatten* och en typ av smuts som används som standard vid test av filter: *Arizona Test Dust (ISO12103-1:2016 Ultrafine Arizona Simulant)*. Eftersom det vid nedkylning av luft kan uppstå kondens på aggregatet, kan detta påverka värmeöverföringen, och därför har tester utförts med både uppvärmning och nedkylning av luften.

I laboratorieförsöken har flöden samt temperaturer på framledning för värme-/kylvattnet hållits konstanta för tester som har jämförts med varandra. Även temperaturer på "föreluften" har varit relativt stabila (20-21°C). Med olika smutsmängd, har övriga mätparametrar påverkats. Tillsammans utgör temperaturer, flöden och tryckfall en grund för bedömningen av systemets energieffektivitet.



Figur 2.2: Modell i programvara för styrning av ventilationsriggen i laborieförsöken. Programvara och modell är utvecklat av *Michael Lempart, Laborieingenjör LTH*. I modellen syns aktuella värden för olika parametrar under ett laborieförsök. Dessa inkluderar: spänningar över vissa komponenter, temperaturer för luft- och värmevattenflöden, flöden för luft och värmevatten, tryckfall över irisspjäll och K-värde för irisspjäll (för styrning av luftflödet), tryckfall över värme- och kylbatteri, relativ luftfuktighet, och inställning för manuell styrning av varvtal för fläkten. Komponenter, i ordning från vänster till höger: 1) luftintag, 2) irisspjäll, 3) T-koppling som smutsinkast, 4) värme- och kylbatteri, 5) T-koppling för insyn, 6) fläkt, 7) T-koppling för (cirkulation och) utsläpp av luft. Vad som ej syns i modellen är filterboxar före 1) samt mellan 5) och 6). Ett stort tack går till *Assemblin* och *Fredrik Engdahl* som har bidragit med delar till ventilationsriggen.

2.3 Energi och ekonomi

Tidsåtgång för nedsmutsning av aggregat i drift kunde ej bestämmas genom fältmätningar pga. bristfällig information om anläggningarna. Därför har en litteraturstudie utförts för att hitta siffror på smutsbeläggning över tid. I en artikel skriven av Waring & Siegel (2008) finns olika siffror för smutsbeläggning på filter, på olika sorters ventilationsaggregat samt i ventilationskanaler. Waring & Siegel (2008) anger att smutsbeläggning över tid är beroende av flera faktorer, varav en är verksamheten i byggnaden. De har delat upp resultaten från beräkningarna i siffror för 1) *kommersiella lokaler* och 2) *bostäder*. I lönsamhetsanalysen har *medianen* för smutsbeläggning per månad använts.

För att kunna utföra en lönsamhetsanalys, har följande arbetsgång använts:

1. Genom fältmätningar har tryckfallsförändring kopplats till förändring i temperaturverkningsgrad.
2. Genom laborieförsök har tryckfallsförändring kopplats till smutsmängden per ytenhet.
3. Från litteraturen har smutsmängden kopplats till tidsåtgång från rent skick, genom siffror på smutsbeläggning över tid.



4. Genom steg 1-3, har samband mellan tryckfallsökning och tidsåtgång från rent skick tagits fram.
5. Genom steg 1-3, har samband mellan försämring av temperaturverkningsgrad och tidsåtgång från rent skick tagits fram.
6. Genom information om kostnad för rengöring för ett typexempel, samt ett antaget driftfall, och en antagen kalkylränta, har en lönsamhetsanalys utförts för flera beräkningsexempel.

Lönsamhet för en rengöring har beräknats med hjälp av information om kostnader för rengöring med torrisblåstring av OCO Nordic AB. En roterande värmeväxlare med en yta på 1 m² uppskattas kosta 4000 kr att rengöra. Detta pris kan variera bl.a. beroende på åtkomlighet. I resultatet är denna kostnad en parameter som varierar.

2.3.1 Formler

Temperaturverkningsgraden kan uttryckas som:

$$\text{Formel 1} \quad \eta_{\text{till}} = \frac{T_{\text{till}} - T_{\text{ute}}}{T_{\text{in}} - T_{\text{ute}}} \rightarrow T_{\text{till}} = \eta_{\text{till}}(T_{\text{in}} - T_{\text{ute}}) + T_{\text{ute}}$$

Där η är temperaturverkningsgrad och T står för temperatur i °C. Bidraget till temperaturökningen genom återvinningen kan därmed uttryckas som:

$$\text{Formel 2} \quad \Delta T = \eta_{\text{till}}(T_{\text{in}} - T_{\text{ute}})$$

Den månadsvisa försämringen av verkningsgraden innebär då en förminskning av detta bidrag med:

$$\text{Formel 3} \quad \Delta T_f(t) = \eta_f(t) \cdot (T_{\text{in}} - T_{\text{ute}})$$

Förlust i återvinning av värmeenergi pga. försmutsning över tid kan då uttryckas som:

$$\text{Formel 4} \quad E = q \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T_f(t) \cdot t \quad \text{eller...}$$

$$\text{Formel 5} \quad E = q \cdot \rho \cdot c \cdot \eta_f(t) \cdot (T_{\text{in}} - T_{\text{ute}}) \cdot t$$

Där q står för luftflöde i m³/s, ρ för densitet i kg/m³, och c för specifik värmekapacitet i J/(kg·K).

Elkostnaden pga. tryckfallsökningen kan beräknas baserat på följande uttryck:

$$\text{Formel 6} \quad E = d \cdot SFP \cdot q$$

Där n står för d drifttiden i h/år, SFP specifik fläkteffekt i kW/(m³/s), och q luftflöde i m³/s. Med en fläkt som exempel (*FläktWoods aggregat EC-09. REGOTHERM*) kan SFP-talet bestämmas till:

$$\text{Formel 7} \quad SFP_{09} = 0.0029 \cdot \Delta p + 0,68$$

För exemplet ovan bör energi förlorad pga. tryckfallsökningen därmed kunna beräknas enligt:

$$E = d \cdot q \cdot (0.0029 \cdot \Delta p + 0,68)$$



Med antaganden om kalkylränta, energiprisökning och dagens energipris kan följande formel användas för beräkning av nuvärdet på den ackumulerade energiförlusten pga. nedsmutsning över tid.

Formel 8
$$NV = \frac{c}{(1+r)^n}$$

Där c är värdet i kronor under ett år, r är den årliga räntan och n tiden i år.



3 Resultat

I detta avsnitt presenteras först resultat för fältmätningar, som inkluderar en kartläggning av uppmätta tryckfallsförändringar och förbättringar i temperaturverkningsgrad, samt sambandet mellan dessa. Därefter presenteras resultat från laborieförsöken, och de samband som har tagits fram genom dessa. Därefter presenteras lönsamhetsanalysen i vilken resultat och samband från fältmätningar och laborieförsök har nyttjats för att beräkna lönsamheten av en rengöring.

OCO Nordic har under projektets hela gång arbetat med en implementeringsprocess som bygger på kommunikation med tre olika typer av målgrupper. I olika situationer och anläggningar är det olika målgrupper som tar beslut. Målgrupp 1 utgörs av driftstekniker som arbetar praktiskt med anläggningarna, målgrupp 2 av ingenjörer eller projektörer som förstår teorier bakom besparingarna och målgrupp 3 är ekonomer som är intresserade av livscykelekonomi. Det har visat sig att kvantitativa resultat är det som alla är intresserade av med inriktning på deras eget område.

3.1 Fältmätningar

Totalt utfördes 109 st. mätningar på tryckfallsförändring, och 12 mätningar på förändring av temperaturverkningsgrad. Resultat från fältmätningar presenteras i nedanstående tabeller. Förutom absolut förändring i temperaturverkningsgrad så har även absolut förändring i energiverkningsgrad beräknats genom att inkludera inverkan av obalans i ventilationssystemet. Energiverkningsgraden har endast beräknats för mätningar med *både till- och frånluftsflöden*. Det har generellt sett varit svårt att mäta temperaturer eftersom det är svårt att mäta ett medelvärde framför en växlare med en yta, varför det bedöms vara en opraktisk metod för att bedöma rengöringsbehovet.

Resultat från fältmätningar presenterade i följande tabeller visar på en genomsnittlig förbättring av temperaturverkningsgraden på 8,1–9,5%, men som allra minst med 0,9% och som högst med 22%. Resultatet visar även att energiverkningsgraden har ökat med 10% i genomsnitt. Tryckfallet över ventilationsaggregaten har minskat med 12–14% (12 Pa) i genomsnitt, men som allra minst 0% (0 Pa) och som högst 39% (64 Pa). Orimligt höga skillnader har uteslutits, då de bedömts bero på annat än rengöringen som felaktig mätning, obalanser i systemet, slitna tätningar eller andra fel i ventilationssystemet.

Figur 3.1 presenterar ett samband mellan försämring i temperaturverkningsgrad och tryckfallsökning baserat på fältmätningarna. Detta resultat utgör grunden för fortsatta lönsamhetsberäkningar på rengöring av värmewäxlare med återvinning.

Svårigheter som har uppstått med att utföra fältmätningarna enligt *Bilaga – Mätprotokoll för fältmätningar* har varit problem med att få kontroll över driftfallet under mätningen, brist på teknisk kompetens hos personalen som driver anläggningen och svårigheter i tillgänglighet inom och omkring aggregatet. Tillsammans med svårigheten att mäta temperatur direkt efter värmewäxlaren över en stor yta har detta inneburit att det finns betydligt fler tryckfallsmätningar än temperaturmätningar.



Tabell 3.1: Absolut förändring i temperaturverkningsgrad för både från- och tilluft i %-enheter för rengjorda värmeväxlare. Se tabeller i avsnitt 2.1 för beskrivning av rankinnebörd.

Rank	Antal mätningar	Min /%	Medel /%	Max /%	Stdavv /%
1	12	0,9	8,1	22	6,7
2	8	1,6	9,5	22	7,5
3	8	1,6	9,5	22	7,5
4	5	1,6	8,9	22	8,5

Tabell 3.2: Relativ förändring i tryckfall för både från- och tilluft över aggregat för rengjorda aggregat (samtliga). Se tabeller i avsnitt 2.1 för beskrivning av rankinnebörd.

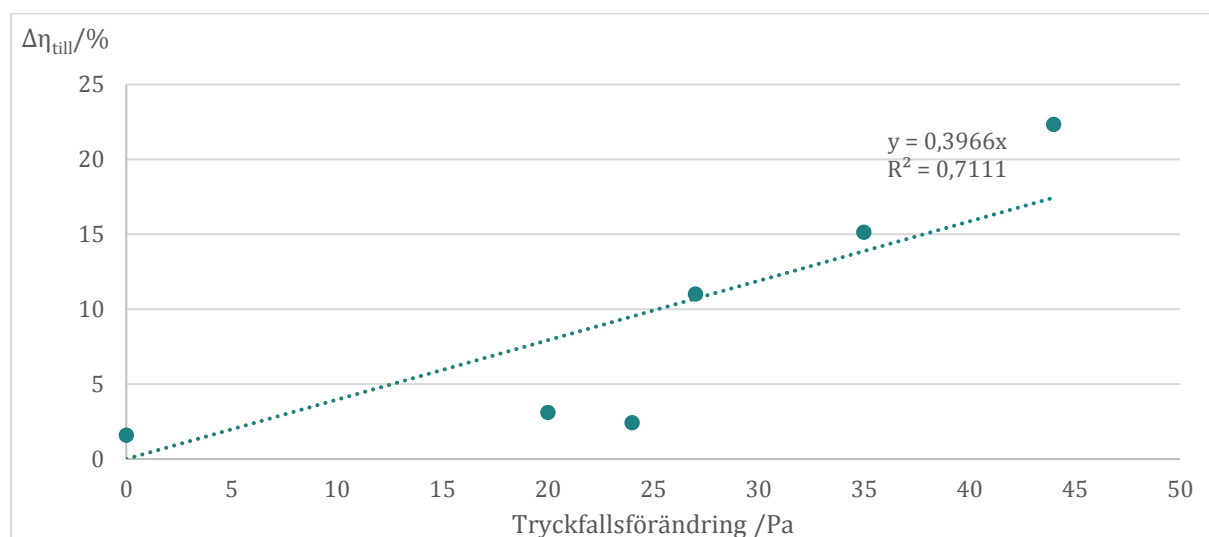
Rank	Antal mätningar	Min /%	Medel /%	Max /%	Stdavv /%
1	109	0	-12	-39	9,2
2	19	0	-14	-33	9,2
3	14	0	-14	-33	10

Tabell 3.3: Absolut förändring i tryckfall för både från- och tilluft över aggregat för rengjorda aggregat (samtliga). Se tabeller i avsnitt 2.1 för beskrivning av rankinnebörd.

Rank	Antal mätningar	Min /Pa	Medel /Pa	Max /Pa	Stdavv /Pa
1	109	0	-11	-64	12
2	19	0	-13	-44	13
3	14	0	-15	-44	15

Tabell 3.4: Absolut förändring i energiverkningsgrad för både från- och tilluft i %-enheter för rengjorda värmeväxlare.

Antal mätningar	Min /%	Medel /%	Max /%
7	5	10	27



Figur 3.1: Resultat från fältmätningar med korrelationen mellan differens i temperaturverkningsgrad (ökning) samt differens tryckfall (minskning) efter rengöring.

3.1.1 Dokumentation med fotografier

Totalt har 173 fotografier tagits före och efter rengöring för bedömning av rengöringsbehovet. Ett fåtal av dessa aggregat som har fotograferats har också kompletta mätningar för att kvalitativt bedöma kopplingen mellan hur smutsigt det ser ut och hur värmeöverföring och tryckfall påverkas. Resultat för rengöring av olika aggregat som tillsynes verkat vara rena har gett olika mätbara resultat. Som exempel på detta visas följande tre figurer i vilka utseendet för två olika aggregat kan jämföras före och efter rengöring. Ingen märkvärdig skillnad vad gäller smutsbeläggningen syns efter rengöring mot utseendet före rengöring för något av aggregaten, förutom det som visas i Figur 3.5. Med andra ord går det inte klart och tydligt att påstå att något av aggregaten i figurer 3.2–3.4 behöver rengöring enbart baserat på de presenterade fotografierna. Trots detta visar rengöringen på mätbara skillnader efter rengöring. Detta gör att okulär besiktning som bedömningsmetod för rengöringsbehovet bedöms vara opålitlig, så länge smutsen inte är klart synlig på aggregatet som i Figur 3.5.



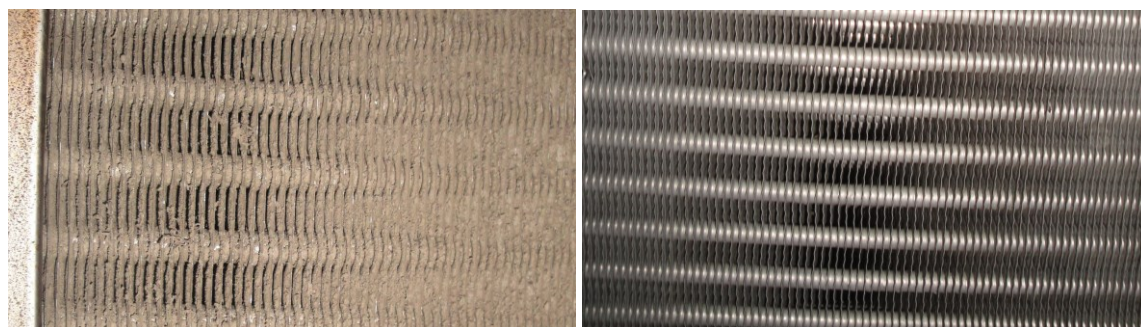
Figur 3.2: Bilder för åskådliggörande av skillnad före (vänster) och efter (höger) rengöring av aggregat. Uppmätt skillnad i temperaturverkningsgrad: 0%, tryckfall: 11 Pa.



Figur 3.3: Bilder för åskådliggörande av skillnad före (vänster) och efter (höger) rengöring av aggregat. Uppmätt skillnad i temperaturverkningsgrad: 24%, tryckfall: 44 Pa.



Figur 3.4: Bilder för åskådliggörande av skillnad före (vänster) och efter (höger) rengöring av aggregat. Uppmätt skillnad tryckfall: 11 Pa.



Figur 3.5: Bild från rengöring som ej inkluderats i denna studie, för åskådliggörande av skillnad före (vänster) och efter (höger) rengöring av aggregat. Uppmätt skillnad tryckfall: 190 Pa.

3.2 Laboratorieförsök

Ventilationsriggen har utvecklats från grunden för detta projekt inklusive konstruktion och byggande av ett mät-, styr- och reglersystem med utveckling av mjukvara för detta. Olika typer av smuts har testats avseende tillämpbarheten i de aktuella försöken. Smutsen som används bör:

- representera vad ventilationsaggregat i drift utsätts för,
- ej förstöra mätutrustning och ventilationsrigg,
- ej vara benäget att mögla,
- vara hanterligt,
- följa med luftströmmen (dvs. ej för stora korn/ partiklar).



Tester resulterade i att vatten, majsolja, potatismjöl och *Arizona Test Dust* (ATD) användes. Det visade sig svårt att få potatismjöl att fästa utan vatten och majsolja, medan ATD fäste utan dessa tillsatser och utan problem varför det i framtida mätningar underlättar om ATD används.

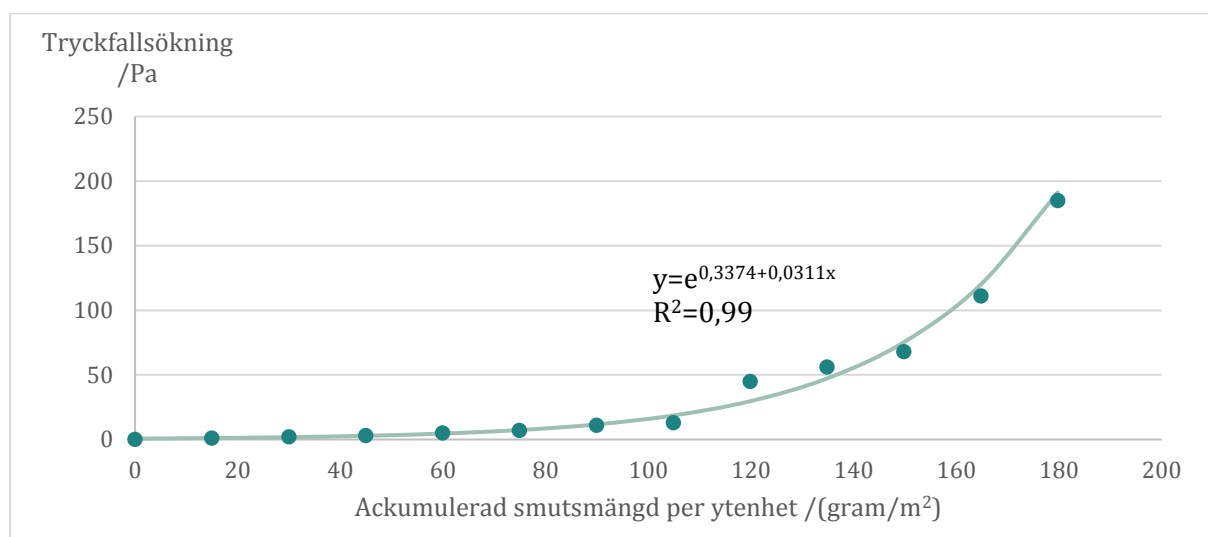
Flöden samt temperaturer på framledning för värme-/kylvattnet har hållits konstanta för tester som har jämförts med varandra. Även temperaturer på "föreluft" har varit relativt stabila (20–21°C). Med olika smutsmängd har övriga mätparametrar påverkats. Tillsammans har temperaturer, flöden och tryckfall utgjort en grund för bedömningen av systemets energieffektivitet.

Nedan presenteras de mer omfattande och detaljerade försöken som utfördes med *ATD*. Luftflödet har hållits konstant under försökets gång (ca. 40 l/s). Flöden samt T_{11} och T_{v1} har hållits konstanta under försöket. Övriga försök med potatismjöl, majsolja och vatten har visat liknande resultat.

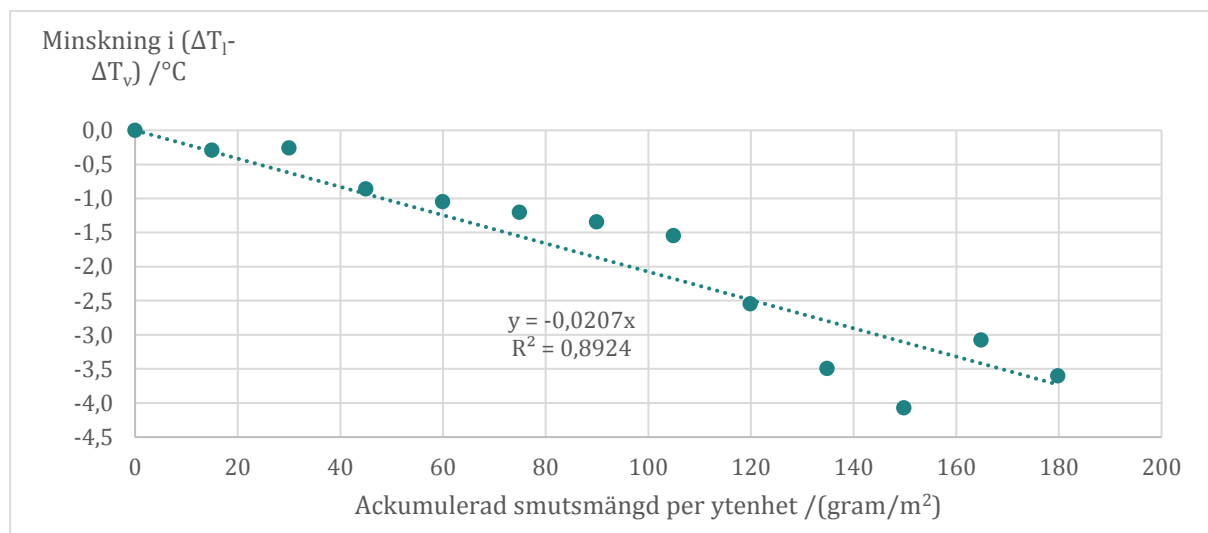
Figur 3.6 visar att tryckfallsökningen ökar med smutsmängden på batteriet. Luftflödet har hållits konstant och angivna punkter är medelvärden på en serie datapunkter uppmätta varje sekund över ett tidsintervall på minst fem minuter. Sambandet mellan dessa parametrar har tagits fram och en kurvanpassning har gjorts i form av en exponentialfunktion. Sambandet bedöms vara rimligt med hänsyn till fältmätningarna som också visar tryckfallsökning i samma nivåer som i laboratorieexperimenten, dock har höga, över 35 Pa, tryckfallsökningar endast observerats i några enstaka fall.

Figur 3.7 visar att värmeöverföringen mellan luften och kylvattnet i batteriet försämras med ökande smutsmängd på batteriets lameller. Figuren beskriver skillnad i temperatur mellan temperaturskillnader för luft- och vattenflödena. Temperatur för inkommande luft och vatten har hållits konstanta under försökets genomförande. Flöden på kylvatten samt luft har också hållits konstanta. Ett linjärt samband mellan dessa parametrar har tagits fram för dessa försök. Angivna punkter är medelvärden på en serie datapunkter uppmätta varje sekund över ett tidsintervall på minst 5 minuter.

Generellt visar resultat från laborieförsöken att: 1) tryckfallet över batteriet ökar med smutsmängden, 2) värmeöverföringen minskar med smutsmängden, 3) fläkten ökar i varvtal när smutsmängden ökar för att hålla samma flöde, 4) rengöring av batteriet återställer ursprungsfunktionaliteten, 5) det är svårare att fästa vissa typer av smuts på batteriet (kan kräva fett/vatten för att fästa), och 6) att de testade smutstyperna påverkar värmeöverföring och tryckfall på samma sätt.



Figur 3.6: Resultat från försök i laboratorium. Nedsmutsning har skett med *Arizona Test Dust*. Med ett medelfel på ± 3 gram/m² för varje mätpunkt.



Figur 3.7: Resultat från försök i laboratorium. Nedsmutsning har skett med *Arizona Test Dust*. Med ett medelfel på ± 3 gram/m² för varje mätpunkt.

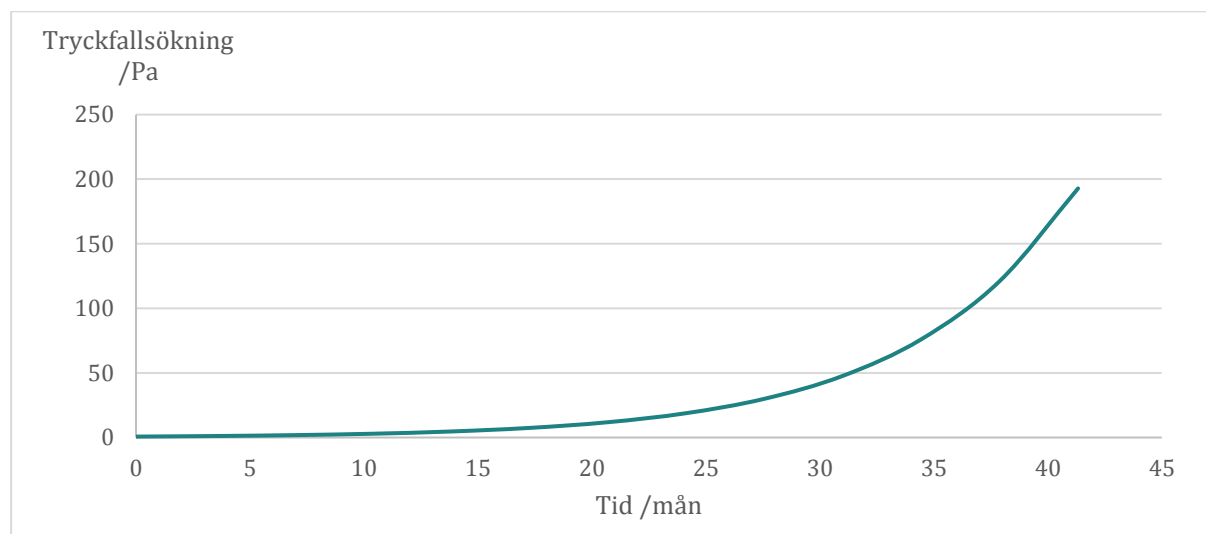


3.3 Funktionell försämring med ökande smutsmängd över tid

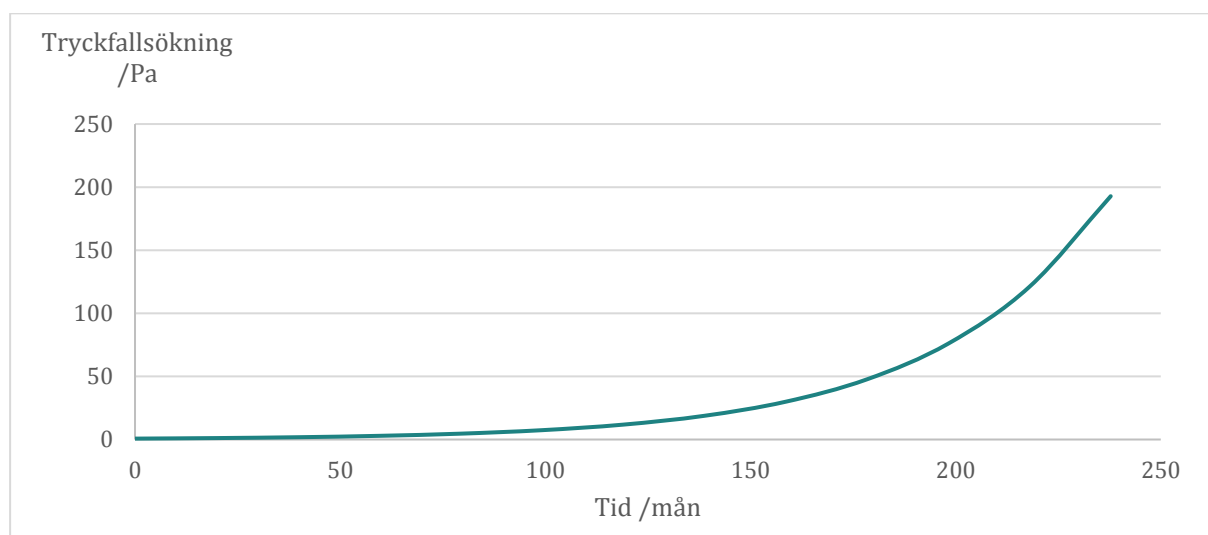
I detta avsnitt kopplas laboratorieförsök med fältmätningar och värden på smutsbeläggning över tid angivna av Waring & Siegel (2008). Framtagna modeller i detta avsnitt har använts för lönsamhetsanalysen.

3.3.1 Tryckfall

Figur 3.8 och Figur 3.9 beskriver tryckfallsökningen för ett ventilationsaggregat (specifikt värmekylbatteri) över tid för *kommersiella byggnader* respektive *bostäder*. Dessa har tagits fram genom att kombinera resultat från laborationsexperiment (Figur 3.6) på tryckfallsökning kopplat till smutsmängd per ytenhet samt angivna värden av Waring & Siegel (2008) för smutsbeläggning över tid på ventilationsaggregat, specifikt på värme-/kylbatterier. Figurerna visar ett ökande tryckfall över tid för aggregat i drift, och olika storlekar på denna ökning beroende på om aggregatet är installerat i en kommersiell byggnad eller bostad. Dessa figurer utgör grunden för beräkning av energiförluster pga. tryckfallsökning som beror på nedsmutsning av värmeväxlare över tid.



Figur 3.8: Modell framställd från resultat framtagna genom laboratorium i kombination med värden av Waring & Siegel (2008) för smutsbeläggning över tid. *Kommersiella byggnader*. Formel: $y=e^{-0,3298+0,1353x}$.

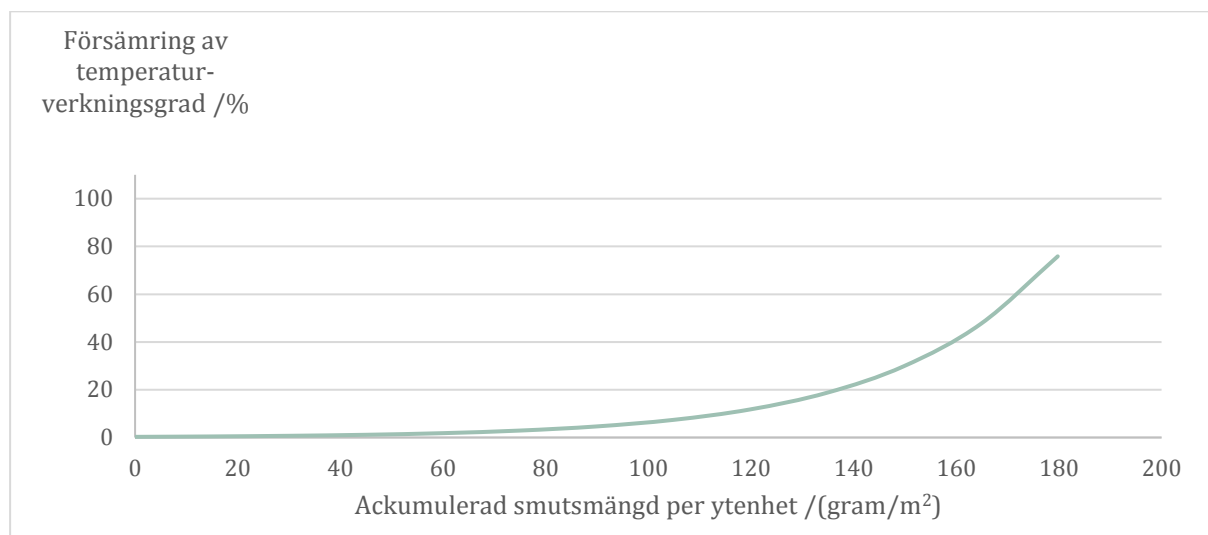


Figur 3.9: Modell framställd från resultat framtagna genom laboratorium i kombination med värden av Waring & Siegel (2008) för smutsbeläggning över tid. *Bostäder*. Formel: $y=e^{-0,3377+0,0235x}$.

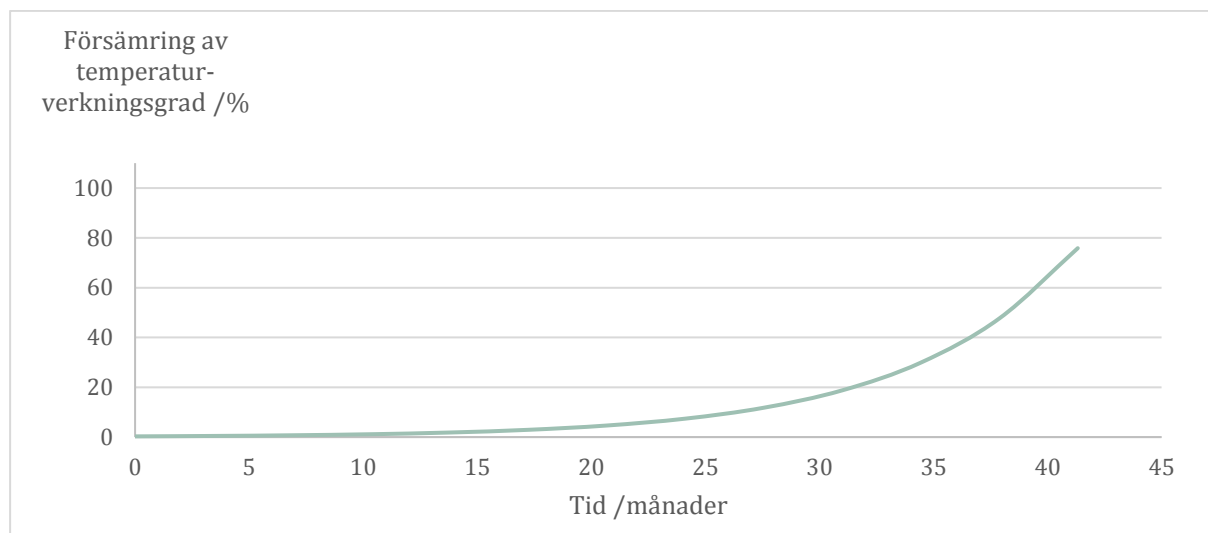
3.3.2 Temperaturverkningsgrad

Samband mellan försämring av temperaturverkningsgrad och tryckfallsökning (Figur 3.1) har använts tillsammans med samband mellan ackumulerad smutsmängd och tryckfallsökning (Figur 3.6) för att ta fram en modell för försämring av temperaturverkningsgrad pga. ackumulerad smuts per ytenhet i en värmeväxlare (Figur 3.10). Figuren visar att försämringen av temperaturverkningsgraden ökar med mängden smuts som har ackumulerats på aggregatet.

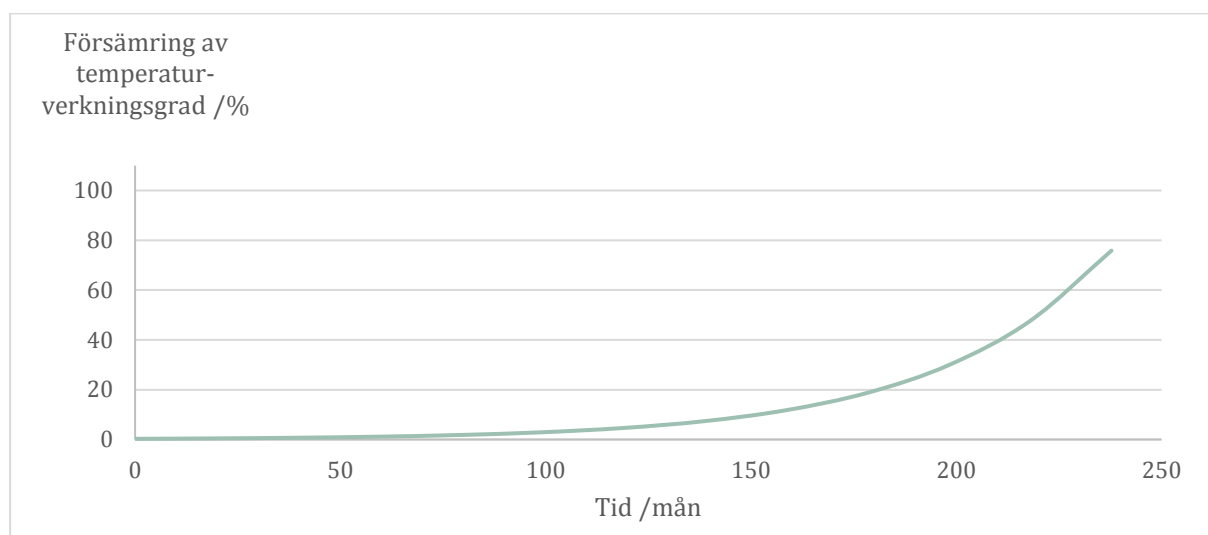
Modellen i Figur 3.10 samt angivna värden av Waring & Siegel (2008) för smutsbeläggning över tid på ventilationsaggregatens värme- och kylbatterier har använts för att ta fram Figur 3.11 och Figur 3.12, som visar försämring av temperaturverkningsgrad över tid för *kommersiella byggnader* respektive *bostäder*. Figuren visar att försämringen av temperaturverkningsgraden ökar över tid för aggregat i drift, och olika storlekar på denna ökning beroende på om aggregatet är installerat i en kommersiell byggnad eller bostad.



Figur 3.10: Modell framställd från resultat framtagna genom fältmätningar och test i laboratorium. *Formel:* $y=0,3966e^{-(0,3374+0,0311x)}$.



Figur 3.11: Modell för kommersiella byggnader. *Formel:* $y=e^{-1,2535+0,1352x}$.



Figur 3.12: Modell för bostäder. Formel: $y=e^{-1,2624+0,0235x}$.

3.4 Lönsamhetsanalys

För att bedöma under vilka månader som värmväxling är användbar i Sverige har en tilluftstemperatur på högst 18°C antagits tillsammans med en värmväxlare som har en temperaturverkningsgrad på 85%. Med utetemperaturer som har hämtats för normalår framtaget i METEONORM (Meteotest 2017) för orterna Malmö och Kiruna, har tilluftstemperaturen beräknats med ovan antaganden, för ett typaggregat med en yta på 1 m² och ett flöde på 1 m/s, vilket ger ett flöde på 1 m³/s. Genom denna beräkning framgick att under maj till september månader behövs ej den fulla potentialen av värmväxlingen i Malmö, därför har denna tidsperiod uteslutits ur energiförlustberäkningarna. Likaså har juni till augusti uteslutits för Kiruna.

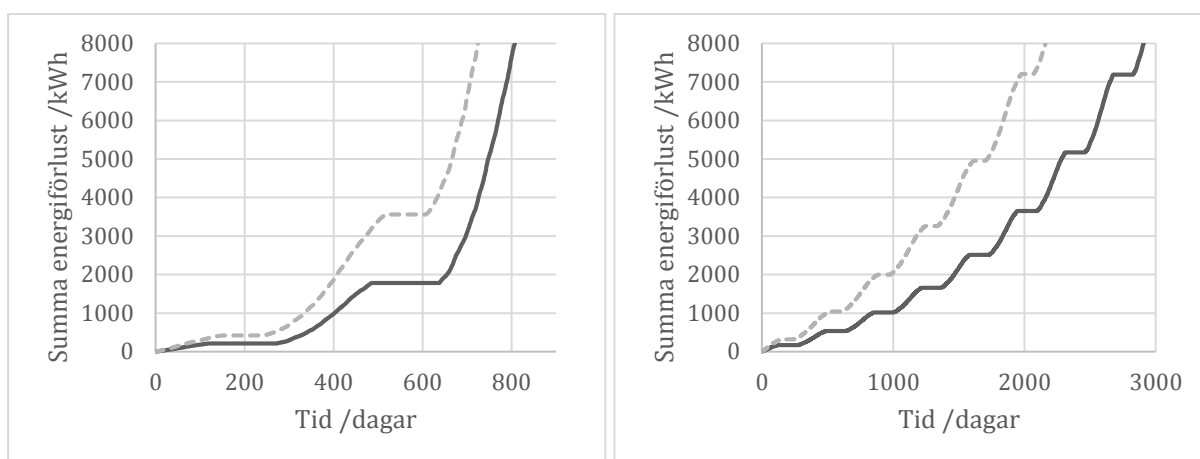
Figur 3.13 visar energiförlusten över tid för ovan beskrivna beräkning. Figuren presenterar resultat från beräkningar för den totala energiförlusten, vilken inkluderar förlust pga. ökad fläkteffekt som beror på tryckfallsökningen över värmväxlaren. Skillnaden mellan beräkningarna är liten, vilket innebär att den ökade fläkteffekten är försumbar i jämförelse med den energiförlust som beror på försämring i värmeåtervinning.

Lönsamhetsberäkningar har utförts på nuvärdet för den ackumulerade ekonomiska förlusten över tid pga. nedsmutsning av värmväxlare och därmed försämring av värmeåtervinningen, se Figur 3.14. I beräkningarna har dagens energipris antagits till 1 kr/kWh, och skillnaden mellan kalkylränta och energiprisökning har antagits till 2 %. Den angivna kostnaden för rengöringen av en typvärmväxlare (4000 kr) har satts som riktlinje i nuvärdesberäkningarna.

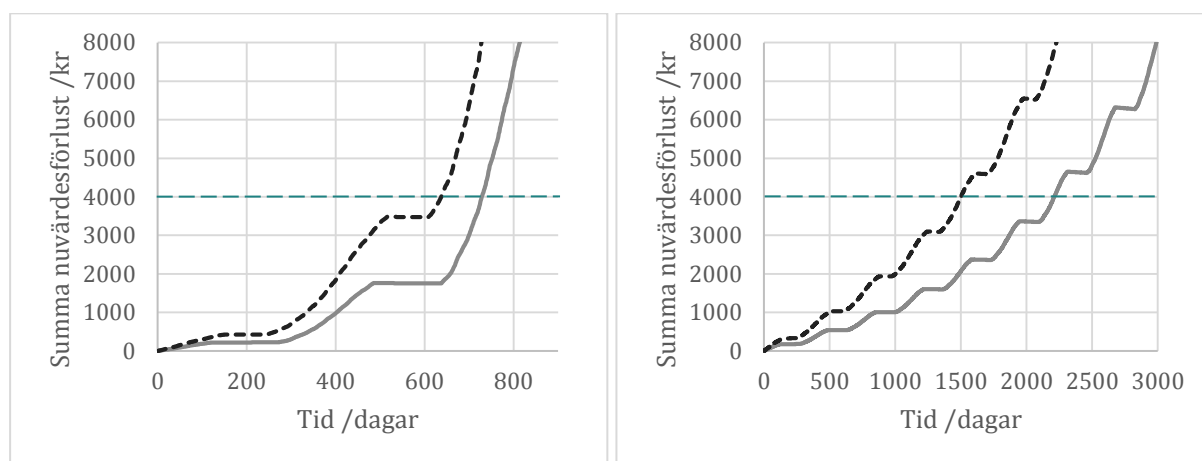
Resultatet från beräkningarna på typaggregatet med de antagna indata visar att:



- **Rengöring bör ske cirka vartannat år i kommersiella lokaler.** Detta visas av att den horisontella linjen för rengöringskostnaden för ett typaggregat (4000 kr) korsar med nuvärdesökningen pga. ökningen i energianvändning, se det vänstra diagrammet i Figur 3.14.
- **Rengöring bör ske vart fjärde till vart sjätte år i bostäder.** Detta visas av att den horisontella linjen för rengöringskostnaden för ett typaggregat (4000 kr) korsar med nuvärdesökningen pga. ökningen i energianvändning, se det högra diagrammet i Figur 3.14.
- **Rengöring bör ske med kortare tidsintervall i nordligare breddgrader.** Detta framgår av att jämföra nuvärdesökningen pga. ökningen i energianvändning mellan orterna, se Figur 3.14.
- **Rengöring bör ske med kortare tidsintervall i kommersiella lokaler än i bostäder.** Detta framgår av att jämföra nuvärdesökningen pga. ökningen i energianvändning mellan det vänstra diagrammet och det högra diagrammet i Figur 3.14.



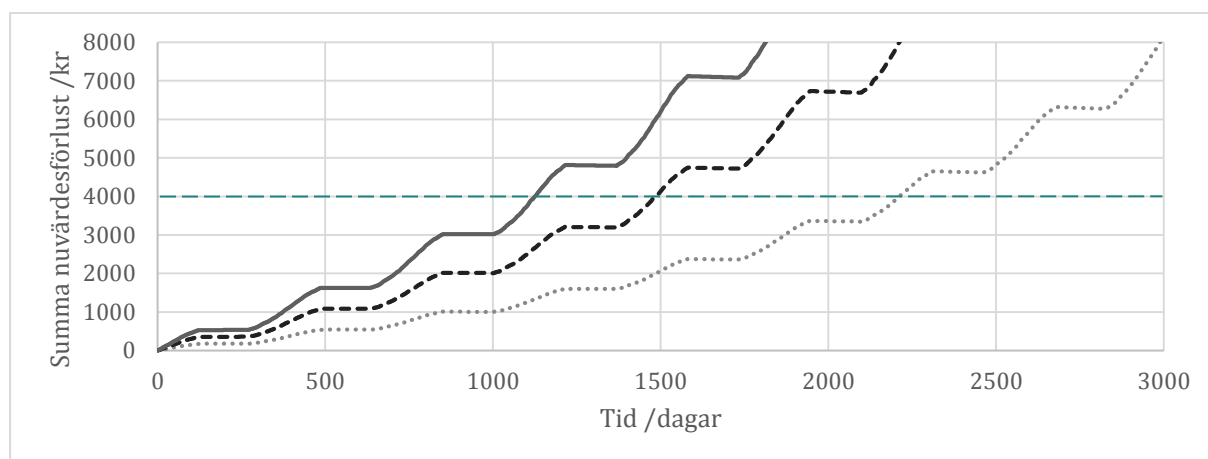
Figur 3.13: Energiförlust över tid pga. nedsmutsning av värmeväxlare och därmed försämring av återvinning (temperaturverkningsgrad), och ökat tryckfall. *Streckad* linje gäller Kiruna och *heldragen* för Malmö. *Kommerciell* byggnad vänster, och *bostad* höger.



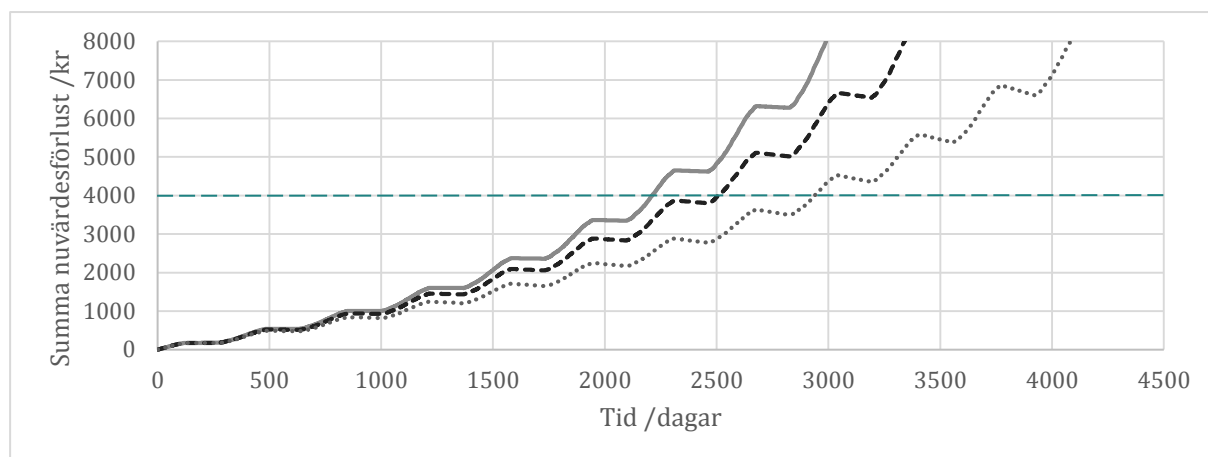
Figur 3.14: Ekonomisk förlust över tid pga. nedsmutsning av värmeväxlare. Streckad linje gäller Kiruna och heldragen för Malmö. Kommersiell byggnad vänster, och bostad höger. Då kostnaden ej ökar väsentligt men tiden går, minskar nuvärdet pga. den konstanta räntan.

3.4.1 Känslighetsanalys

I det följande presenteras figurer innehållande resultat från beräkningar med variationer på parametrar som har antagits, för att illustrera den inverkan som antaganden har på slutresultatet. Denna känslighetsanalys har utförts för två olika parametrar: luftflöde och ränta. Känslighetsanalysen har endast utförts för aggregat i bostäder i Malmö. Resultatet visar att ju lägre skillnaden mellan kalkylränta och energiprisökning är desto kortare blir tidsintervallet för optimal rengöring liksom om luftflödet är högre.



Figur 3.15: Ekonomisk förlust över tid pga. nedsmutsning av värmeväxlare. Malmö, Bostad. Flöde: 3 m³/s heldragen linje, 2 m³/s streckad linje, 1 m³/s prickad linje.



Figur 3.16: Ekonomisk förlust över tid pga. nedsmutsning av värmeväxlare. Malmö, Bostad. Kalkylränta: 2% heldragen linje, 5% streckad linje, 10% prickad linje. Då kostnaden ej ökar väsentligt men tiden går, minskar nuvärdet pga. den konstanta räntan.

3.5 Modell - tryckfallsmätning och energiförlust

Då information finns om när aggregatet senast rengjordes kan samband och grafer i avsnitt **Fel! Hittar inte referenskölla.** nyttjas för bedömning av rengöringsintervall. Genom OCO Nordic ABs arbete har det dock framkommit att det är väldigt svårt eller nästan omöjligt att veta när ett aggregat senast rengjordes, när det installerades eller när det renoverades. Detta innebär att man oftast ej har information om den relevanta tidsperioden för att nyttja samband och grafer i avsnitt **Fel! Hittar inte referenskölla.** Därför behövs en modell som är oberoende av tidsperioden, vilket presenteras i det följande. Modellen baseras på formler presenterade i metodavsnittet, resultat från fältmätningar och resultat från laboratorieexperiment. Inverkan på fläkteffekten har ej inkluderats då denna har visat sig vara försumbar i jämförelse med energiförluster pga. försämrade värmeenergiåtervinning.



Tabell 3.5: Årlig värmeenergiförlust kopplad till tryckfallsökning pga. smuts på värmeväxlare. I detta exempel har ett flöde genom värmeväxlaren antagits till 1 m³/s.

Tryckfalls- ökning /Pa	Försämring av temperaturverkningsgrad /%	Malmö - Årlig energiförlust /kWh	Kiruna - Årlig energiförlust /kWh
1	0,4	376	430
2	0,8	753	860
3	1,2	1129	1291
4	1,6	1506	1721
5	2,0	1882	2151
6	2,4	2259	2581
7	2,8	2635	3012
8	3,2	3011	3442
9	3,6	3388	3872
10	4,0	3764	4302
15	5,9	5646	6454
20	7,9	7529	8605
25	9,9	9411	10756
30	11,9	11293	12907
35	13,9	13175	15058
40	15,9	15057	17209
45	17,8	16939	19361
50	19,8	18821	21512
55	21,8	20703	23663
60	23,8	22586	25814
65	25,8	24468	27965
70	27,8	26350	30117
75	29,7	28232	32268



Tabell 3.6: Årlig värmeenergiförlust kopplad till tryckfallsökning pga. smuts på värmeväxlare. I detta exempel har ett flöde genom värmeväxlaren antagits till 2 m³/s.

Tryckfalls- ökning /Pa	Försämring av temperaturverkningsgrad /%	Malmö - Årlig energiförlust /kWh	Kiruna - Årlig energiförlust /kWh
1	0,4	753	860
2	0,8	1506	1721
3	1,2	2259	2581
4	1,6	3011	3442
5	2,0	3764	4302
6	2,4	4517	5163
7	2,8	5270	6023
8	3,2	6023	6884
9	3,6	6776	7744
10	4,0	7529	8605
15	5,9	11293	12907
20	7,9	15057	17209
25	9,9	18821	21512
30	11,9	22586	25814
35	13,9	26350	30117
40	15,9	30114	34419
45	17,8	33878	38721
50	19,8	37643	43024
55	21,8	41407	47326
60	23,8	45171	51628
65	25,8	48935	55931
70	27,8	52700	60233
75	29,7	56464	64535



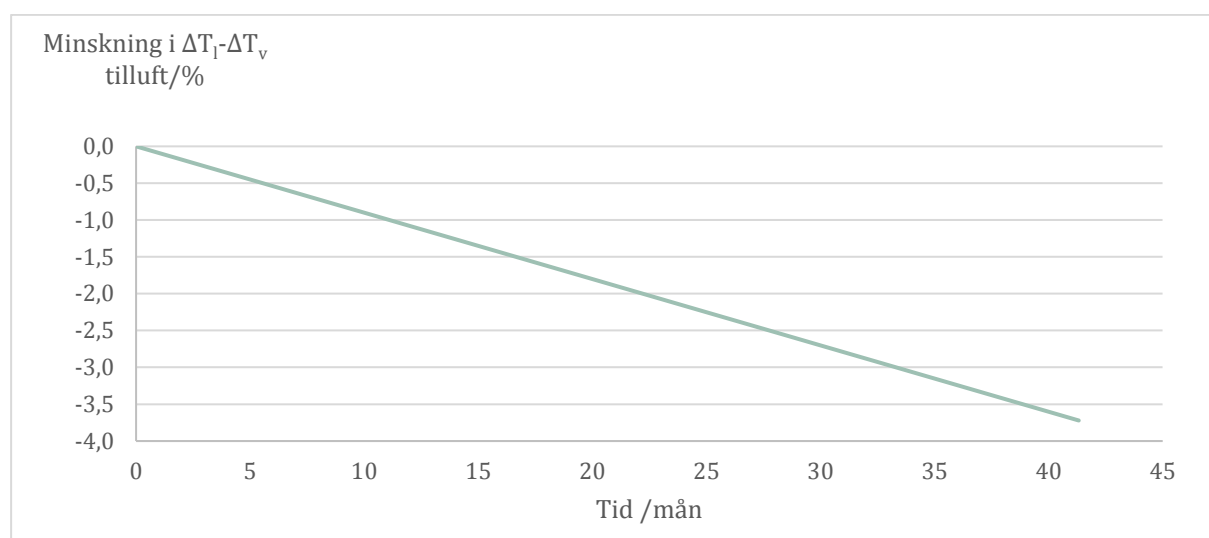
Tabell 3.7: Årlig värmeenergiförlust kopplad till tryckfallsökning pga. smuts på värmeväxlare. I detta exempel har ett flöde genom värmeväxlaren antagits till 3 m³/s.

Tryckfalls- ökning /Pa	Försämring av temperaturverkningsgrad /%	Malmö - Årlig energiförlust /kWh	Kiruna - Årlig energiförlust /kWh
1	0,4	1129	1291
2	0,8	2259	2581
3	1,2	3388	3872
4	1,6	4517	5163
5	2,0	5646	6454
6	2,4	6776	7744
7	2,8	7905	9035
8	3,2	9034	10326
9	3,6	10164	11616
10	4,0	11293	12907
15	5,9	16939	19361
20	7,9	22586	25814
25	9,9	28232	32268
30	11,9	33878	38721
35	13,9	39525	45175
40	15,9	45171	51628
45	17,8	50818	58082
50	19,8	56464	64535
55	21,8	62110	70989
60	23,8	67757	77442
65	25,8	73403	83896
70	27,8	79050	90350
75	29,7	84696	96803

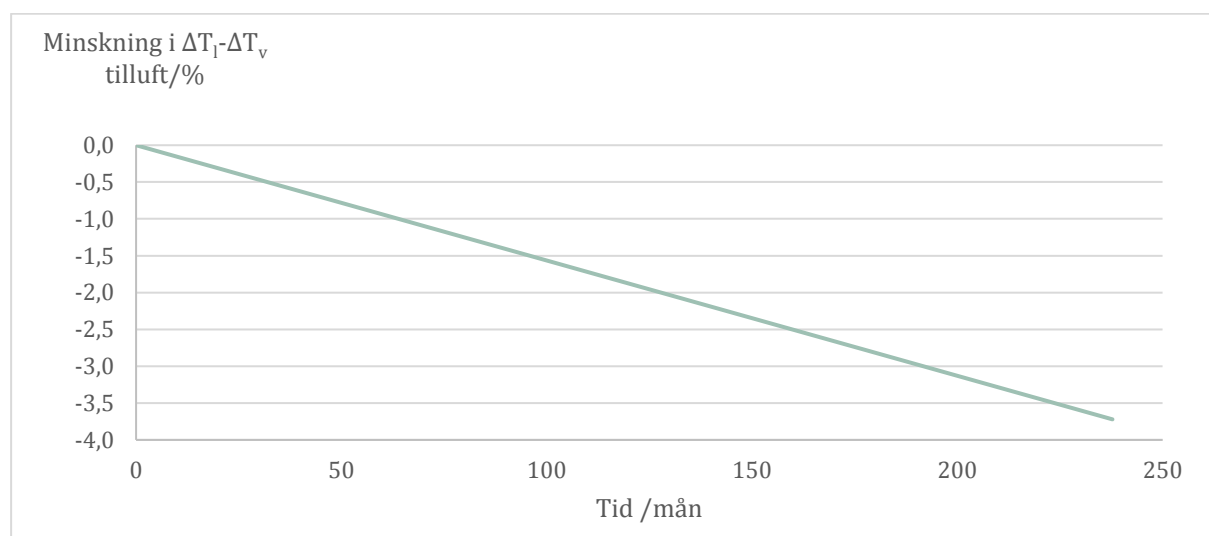


3.6 Värme- och kylbatteri, värmekomfort över tid

Nedanstående figurer är baserade på resultat presenterade i Figur 3.7 samt angivna värden av Waring & Siegel (2008) för smutsbeläggning över tid på ventilationsaggregats värme- och kylbatterier i kommersiella byggnader och bostäder. Figurerna beskriver skillnad i temperatur mellan temperaturökning/temperaturminskning vid uppvärmning/nedkylning för luft- och vattenflödena relaterad till den relevanta tidsperioden. Nedanstående figurer kan användas till att beskriva hur tilluftens temperatur minskar eller ökar över tid, vilket kan kopplas till produktionseffektivitet pga. försämrat inneklimat på arbetsplatser och därmed ekonomiska förluster för arbetsgivare.



Figur 3.17 Modell för *kommersiella byggnader*. Formel: $y = -0,09x$.



Figur 3.18: Modell för *bostäder*. Formel: $y = -0,0156x$.



4 Diskussion

Detta projekt har beskrivit hur effektiv rengöring av värmeväxlare är, och med utgångspunkt från vad rengöring kostar att utföra, optimerat hur ofta rengöring ska utföras med tanke på livscykelekonomin. Det finns energi att spara genom optimal rengöring, liksom effekt och pengar samtidigt som inomhusmiljön kan bli bättre eftersom värmeväxlare idag generellt inte rengörs så ofta som skulle vara optimalt. I olika situationer är besparingen olika stor, och speciellt vid värmeåtervinning eller vid temperaturkänsliga försörjningssystem är nyttan stor.

Dessutom har projektet analyserat hur man ska bedöma när det är dags att rengöra genom att uppskatta nersmutsningsgrad och koppla detta till optimeringen. Att bedöma utifrån okulära metoder har visat sig osäkert och om det sitter smuts utanpå batteriernas lameller skulle det ha rengjorts för länge sedan i de beskrivna tillämpningarna. Att mäta temperaturer är inte lätt så slutsatsen är att anläggningars ägare och driftorganisation bör mäta och hålla koll på tryckfallsökningar i förhållande till katalogdata och hur det var när systemet var nytt och därmed ej nedsmutsat. Dessa tryckfallsökningar finns ibland i aggregatens reglersystem och kan loggas ur dessa. Alternativt bör sådana tryckgivare monteras. Man bör också vara vaksam på åtkomlighet för både mätningar och rengöringar. Projektet har inte kunnat bedöma om man återkommer till den prestanda som aggregatet hade då det var helt nytt, men förmodligen kommer man nära.

Projektet har också utvecklat strategier för spridning av resultaten så att man får ökad omfattning av rengöring av värmeväxlare i Sverige. Det är viktigt att man når rätt målgrupper på rätt sätt beroende på deras roll i anläggningarna. Redan under projektets gång har rengörandet av värmeväxlare ökat kraftigt, åtminstone med relativa mått. Arbetet med implementeringsprocessen har lett till ett flertal nya kunder för OCO Nordic och möjlighet att fördjupa studierna i framtiden genom att mer data som kan ge bättre tidsupplösning kommer att bli tillgängliga.

Det finns en hel del som anläggningsägare och driftorganisationer kan göra för att underlätta för rengöring och för att kunna göra bedömningar om optimal rengöring. Dokumentation om ålder och när rengöring har gjorts senast har sällan existerat i de undersökta anläggningarna. Information om hur aggregat körs har varit svårt att hitta, vilket tyder på att detta måste dokumenteras bättre i svenska anläggningar. Att komma åt aggregatet kan vara svårt och sammantaget kan dessa brister leda till att organisationen har svårt att ta tag i problemet så att rengöring blir mer utbrett.

Andra faktorer som har upptäckts under projektet är att det är svårt att veta vilken verksamhet aggregat betjänar och möjligheten har inte funnits i projektet att analysera smutsen kemiskt. Projektet har kunnat undersöka inverkan av olika smutstyper och tiden sedan rengöring på värmeöverföringen och tryckfallet genom laboratorieförsök samt nyttjande av olika värden för ackumulering av smuts över tid för kommersiella lokaler och bostäder från litteraturen. Framtida forskning skulle behöva gå vidare i kemisk analys av smutsen och hur den fastnar och hur man skapar smuts som är representativ för olika situationer. Laboratorieförsöken har begränsats av lämpliga smutstyper för testerna och det har inte funnits möjlighet att utföra långtidstester.

I laboratorieexperimenten har det kunnat hållas full koll på driftförhållande, temperaturer och tryckfall. Nackdelen med laboratorieexperimenten är att nersmutsningen har accelererats och därmed



inte gör tidsaspekten på hur mycket smuts som fastnar, samt att ventilationsriggen är relativt liten i jämförelse med aggregat i fält. Därför är fältmätningar mer representativa än laboratorieexperimenten för vilka förändringar som kan erhållas vid rengöring av verkliga värmeväxlare. För att gå vidare och få noggrannare optimering av lämplig rengöringsfrekvens bör därför fältmätningar i ett fortsättningsprojekt utökas och inkludera långtidsmätningar för precisare samband mellan tryckfallsökning över tid samt försämring av temperaturverkningsgrad över tid. Sådana mätningar bör även inkludera energimätningar över längre tid före och efter en rengöring. Detta bör kopplas till olika verksamhetstyper och orter i landet för att få resultat som täcker vårt breda bostadsbestånd.

I laboratorieförsöken har olika smutstyper testats. Viss smuts har varit problematisk att använda i försöken då denna inte fäster utan tillskott av vatten eller fett. I försöken med potatismjöl gick det ej att endast tillföra smutsen i testtriggen, utan detta krävde handpåläggning. Därför har endast laboratoriemätningar med ATD, som gett detaljerade resultat, presenterats i denna rapport. Högre hastigheter på luftflödet bör också provas med en större testtrigg än den som har byggts för detta projekt, då ökade hastigheter ger högre tryckfall och påverkar sättning av partiklar med olika storlekar (Siegel & Nazaroff 2002). Framtida laboratorieexperiment bör inkludera fler sorters smuts och scenarier, med en större testtrigg. Dessutom bör återvinningsvärmeväxlare undersökas i laboratorieexperiment, vilket inte verkar ha gjorts tidigare.

Tryckfallsskillnader mellan rent och smutsigt system verkar stämma överens mellan fältmätningar och laboratorieexperiment, vilket gör att resultat från laboratorieexperimenten bedöms vara rimliga. Rimlighetsbedömningar av modellerna för energibesparing och lönsamhet har gjorts kvalitativt. I en framtid kan utökade fältmätningar och intervjuer göras på ett större byggnadsbestånd för att bekräfta modellerna.

Hittills utförd forskning på inverkan av rengöring av ventilationssystem täcker ett antal viktiga aspekter som energianvändning, inneklimat, brukarnas hälsa, och värmekomfort. Dock visar litteratursökningen att hittills utförd forskning ej verkar täcka inverkan av smuts på värmeåtervinning. Den verkar ej heller täcka inverkan på den akustiska miljön på grund av ökat tryckfall, eller inkludera brukarnas åsikter om inomhusmiljön eller brukarnas beteende före och efter rengöring. Framtida forskning på inverkan av rengöring bör inkludera intervjuer med brukare och fastighetsägare för att få med deras åsikter om rengöringens inverkan på deras inomhusmiljö och verksamheter.

Projektet visar på en tydlig nytta med att rengöra värmeväxlare både ur värmeöverföringssynpunkt och ur tryckfallssynpunkt. Nyttan är tydlig i de studerade anläggningarna där det finns filter och bedöms vara ännu större om filter saknas eller missköts. Resultaten är applicerbara på många anläggningar i hela Sverige. Resultatet från detta projekt bör leda till en ökad rengöringsfrekvens med hjälp av presenterade modeller för bedömning av rengöringens lönsamhet. En ökad rengöringsfrekvens bör bidra till förbättrat inneklimat, bättre hälsa, sänkt buller, ökad energibesparing, minskade effektuttag och minskade utsläpp.



5 Referenser

- Liguori, G. et al., 2010. Automated cleaning of fan coil units with a natural detergent-disinfectant product. *Annals of Clinical Microbiology and Antimicrobials*, 408(19), pp.4045–4051. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969710004833>.
- Luongo, J.C., Brownstein, J. & Miller, S.L., 2017. Ultraviolet germicidal coil cleaning: Impact on heat transfer effectiveness and static pressure drop. *Building and Environment*, 112, pp.159–165. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.022>.
- Mendell, M.J. et al., 2006. Indicators of moisture and ventilation system contamination in U.S. office buildings as risk factors for respiratory and mucous membrane symptoms: Analyses of the EPA BASE data. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 3(5), pp.225–233.
- Meteotest, 2017. Meteororm: Irradiation data for every place on Earth. Available at: <http://www.meteororm.com/> [Accessed December 24, 2017].
- Montgomery, R.D. & Baker, R., 2006. Study verifies coil cleaning saves energy. *ASHRAE Journal*, 48(11), pp.34–36.
- Proctor Engineering Group, 1996. *Final Report An Assessment of Relative Technical Degradation Rates*,
- Siegel, J.A. & Nazaroff, W.W., 2002. Modeling Particle Deposition on HVAC Heat Exchangers. , (lbnl-49339), pp.3–8. Available at: <http://epb.lbl.gov/Publications/lbnl-49339.pdf>.
- Siegel, J.A.J.A., 2002. Particulate Fouling of HVAC Heat Exchangers. *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki*, p.202. Available at: http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:No+Title#0%5Cnhttp://www.ce.utexas.edu/prof/Siegel/thesis/siegel_dissertation.pdf.
- Siegel, J., Walker, I. & Sherman, M., 2002. Dirty air conditioners: Energy implications of coil fouling. *Lawrence Berkeley National*, (1986), pp.287–300. Available at: <http://escholarship.org/uc/item/0t8438wg.pdf>.
- Waring, M.S. & Siegel, J.A., 2008. Particle loading rates for HVAC filters, heat exchangers, and ducts. *Indoor Air*, 18(3), pp.209–224.
- Wilson, E.J.H. et al., 2013. A parametric study of energy savings from cleaning coils and filters in constant air volume HVAC systems. *HVAC and R Research*, 19(5), pp.616–626.



Bilaga – Mätprotokoll för fältmätningar



Mätprotokoll – LTH Byggnadsfysik & Installationsteknik för OCO Nordic AB
Upprättat av: Akram Abdul Hamid

2017-01-08

Mätprotokoll

Nedan mätningar ska utföras när systemet är i drift. Detta innebär att både frånluft och tilluft ska vara igång. Om det finns en rotor i systemet ska denna helst vara igång under mätningens gång. Anteckningar om dessa förhållanden ska göras före mätningarna. Rengöringsluckor och andra luckor som finns på systemet bör dessutom vara stängda.

Tabell 1

Tidpunkt	Driftfall		Styrning Tryck/ Flöde/ Annat	Växlartyp Rotor/ Platt/ Medium	Rotor %	Datum YYYYMMDD – HH:MM	Kommentarer/ Avvikelser
	Frånluft %/ Hz/ RPM	Tilluft %/ Hz/ RPM					
Före rengöring							
Efter rengöring							

Maxkapacitet fläkt:

Rengöringsobjektets adress:

Aggregatnummer/ serienummer:

Utfört av:

Lufttemperatur, Relativ Luftfuktighet (605i)

Följande avläsningar bör utföras i kanalen som befinner sig i direkt anslutning till rengöringsobjektet. Finns ej möjlighet att mäta i denna kanal, kan mätvärden tas i de delar av aggregatet som är avsedda för frånluft, tilluft, avluft och uteluft. Se kolumn 1, tabell 1-2.

1. Placera mätagivaren för temperatur och relativ fuktighet mitt i kanalen på ett stativ. Det är viktigt att denna givare inte hamnar för nära några ytor. Finns det ej möjlighet för placering av ett stativ i kanalen, bör ett hål borras för att nå den sökta punkten. Hålet ska täppas till på ett hållbart sätt efteråt (åldersbeständig diffusionstejp bör räcka).
2. Vänta tills mätningen har stabiliserats (någon minut) innan ni antecknar mätvärdena.



Mätprotokoll – LTH Byggnadsfysik & Installationsteknik för OCO Nordic AB
 Upprättat av: Akram Abdul Hamid

2017-01-08

FÖRE RENGÖRING

Tabell 2

	Temperatur (°C)	Relativ Luftfuktighet (%)	Kommentarer/ Avvikelser
Uteluft			
Tilluft			
Frånluft			
Avluft			

OBS! Det bör gå ca 20 minuter efter rengöring, när systemet återigen har satts i drift, innan mätningar utförs på nytt.

EFTER RENGÖRING

Tabell 3

	Temperatur (°C)	Relativ Luftfuktighet (%)	Kommentarer/ Avvikelser
Uteluft			
Tilluft			
Frånluft			
Avluft			





Mätprotokoll – LTH Byggnadsfysik & Installationsteknik för OCO Nordic AB
Upprättat av: Akram Abdul Hamid

2017-01-08

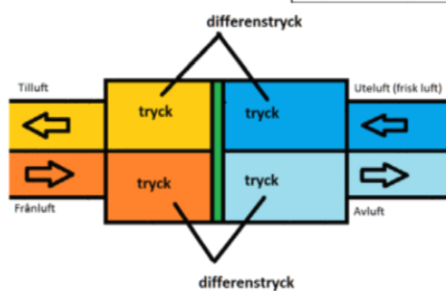
Differenstryck (510i)

Följande avläsningar bör utföras i de delar av aggregatet som är avsedda för frånluft, tilluft, avluft och uteluft.

1. Om systemet har uttag för mätning av differenstryck, ska dessa användas. Annars får hål borras för att mätvärdena ska kunna tas. Hålet ska täppas till på ett hållbart sätt efteråt (diffusionstejp bör räcka).
2. Vänta tills mätningen har stabiliserats (någon minut) innan ni antecknar mätvärdena.

Tabell 4

	Frånluft-Avluft Differenstryck (Pa)	Tilluft-Uteluft Differenstryck (Pa)	Kommentarer/ Avvikelser
Före rengöring			
Efter rengöring			



Systemtryck (510i)

	Före rengöring (kPa)	Efter rengöring (kPa)
Uteluft		
Tilluft		
Frånluft		
Avluft		

Avvikelser:



Mätprotokoll – LTH Byggnadsfysik & Installationsteknik för OCO Nordic AB
 Upprättat av: Akram Abdul Hamid

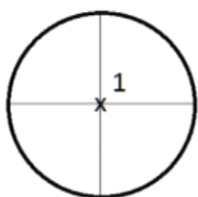
2017-01-08

Lufthastighet (405i)/ Flöde (system)

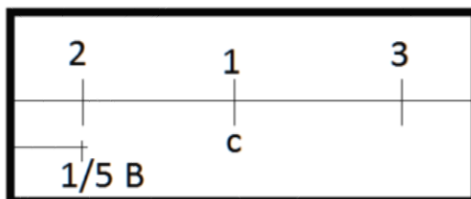
Följande avläsningar bör utföras i kanalen som befinner sig i direkt anslutning till rengöringsobjektet. Helst med en viss raksträcka före/ efter mätpunkten på ca 10x diametern. Finns ej möjlighet att mäta i denna kanal, kan mätvärden tas i de delar av aggregatet som är avsedda för frånluft, tilluft, avluft och uteluft.

Metod för mätning av lufthastighet beror på kanalens utformning/ gränssnitt. Referera till nedan figurer.

Vänta tills mätningen har stabiliserats (när siffrorna ej fluktuerar/ varierar kraftigt) innan ni antecknar mätvärdena.



Figur 1: Mätning i cirkulärt tvärsnitt



Figur 2: Mätning i rektangulärt tvärsnitt. 2 och 3 mäts vid minst 1/5 * bredd.



FÖRE RENGÖRING

Tabell 5

	Lufthastighet/(m/s)			Bredd (cm)	Höjd (cm)	Kommentarer/ Avvikelser
	1	2	3			
Uteluft						
Tilluft						
Frånluft						
Avluft						



Mätprotokoll – LTH Byggnadsfysik & Installationsteknik för OCO Nordic AB
Upprättat av: Akram Abdul Hamid

2017-01-08

EFTER RENGÖRING

Tabell 6

	Lufthastighet/(m/s)			Bredd (cm)	Höjd (cm)	Kommentarer/ Avvikelser
	1	2	3			
Uteluft						
Tilluft						
Frånluft						
Avluft						

Tabell 7

Flödesriktning	Flöde (m ³ /s) eller (l/s)	
	Före rengöring	Efter rengöring
Avluft/ Tilluft		
Uteluft/ Frånluft		

Vätsketemperaturer (830-T4)

Använd den IR-temperaturmätaren för att ta yttemperaturen på vätskeledningar anslutna till ventilationssystemet, om sådana ledningar finns. Det är dock viktigt att det tas på isolerade delar av ledningarna.

1. Hitta en isolerad del av vätskeledningarna, så nära värmebatteriet som möjligt.
2. Tejpa på vitfärgad eltejp. Vänta minst 10 minuter.
3. Använd IR-termometern för att avläsa yttemperatur.

OBS! Det bör gå ca 20 minuter efter rengöring, när systemet återigen har satts i drift, innan mätningar utförs på nytt.

Tabell 8

	Temperatur (°C)	Temperatur (°C)	Kommentarer/ Avvikelser
	Före rengöring	Efter rengöring	
Framledning			
Returledning			

Fotografier

Detta ska ske före och efter rengöring, med den kamera som finns för detta ändamål.



Mätprotokoll – LTH Byggnadsfysik & Installationsteknik för OCO Nordic AB
Upprättat av: Akram Abdul Hamid

2017-01-08

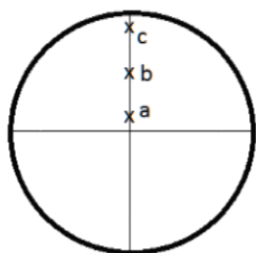
Syftet med fotografierna är både att ge en översiktlig bild av systemets uppsättning samt detaljerade bilder av försmutsningen i systemet.

Alla bilder bör tas med samma inställning på kameran.

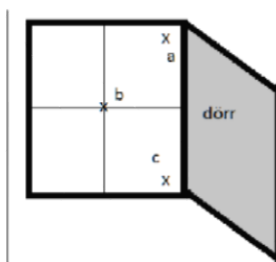
Anteckna på ramen med en White board-penna inför varje foto. Anteckna steg enligt tabell nedan.

Följande bilder vill vi ha in:

1. Större bild på hela aggregatet/ systemet.
2. Om möjligt, två bilder som täcker hela rengöringsobjektets båda sidor.
3. Närbilder med hjälp av ram och stativ byggt för ändamålet. För rotoraggregat: se Figur 3. Om obalans finns på smutsfördelningen i rotorväxlare, ta då bilder på den smutsigaste sidan. För rektangulära batterier: se Figur 4. Ta bilder på rengöringsobjektets båda sidor (ex. lameller på värmeväxlare).



Figur 3



Figur 4

	Bildnummer/ Filnamn/ Datum och tidpunkt		Förklaring
Punkt	Före rengöring	Efter rengöring	
Helhetsbild			Hela aggregatet, översiktspild
Utifrån a-c			Punkt a-c i diagram, ute-sidan, dvs. från avlufts- eller uteluftsutrymmet i aggregatet
Inifrån a-c			Punkt a-c i diagram, inne-sidan, dvs. från tillufts- eller frånluftsutrymmet i aggregatet

Kommentarer/ Avvikelser





Runt 35 procent av all energi i Sverige används i bebyggelsen. I forskningsprogrammet E2B2 arbetar forskare och samhällsaktörer tillsammans för att ta fram kunskap och metoder för att effektivisera energianvändningen och utveckla byggandet och boendet i samhället. I den här rapporten kan du läsa om ett av projekten som ingår i programmet.

E2B2 genomförs i samverkan mellan IQ Samhällsbyggnad och Energimyndigheten åren 2013–2017. Läs mer på www.E2B2.se.

