

Kontinuerlig funksjonskontroll for effektiv drift av bygninger



Natasa Nord
Vojislav Novakovic
Frode Frydenlund

 **SINTEF**
 **NTNU**



Kontinuerlig funksjonskontroll for effektiv drift av bygninger

Copyright SINTEF Energi AS

Publisert: Desember 2012

Publisert av SINTEF Energi AS
Sem Sælands vei 11
7034 Trondheim

I samarbeid med NTNU (In cooperasjon with
NTNU - Norges teknisk-naturvitenskapelige
universitet)

ISBN 978-82-594-3586-6
www.sintef.no/energi

Omslag: Astrid B. Lundquist/Shutterstock



Forord

Denne boken er tiltenkt byggeiere, prosjektledere, prosjekterende, entreprenører, drifts- og service ansvarlige, automatikk leverandører og myndighetene. Boken tar for seg emner som har interesse for alle aktører som er fokusert på å utføre dokumentert og betydelig energisparing heller enn å bruke den intuitive metoden. Den er skrevet på en enkel og beskrivende måte for å kunne være til nytte for mange.

Bakgrunnen for boken er resultatene som ble oppnådd i det nasjonale prosjektet Program for kontinuerlig funksjonskontroll for effektiv drift av bygninger (PFK). Prosjektet har gått over åtte år, der de siste seks årene var støttet av Norges forskningsråd. Syv industripartnere har vært involvert i prosjektet gjennom åtte år. Partnerne i prosjektet representerte

byggeiere, entreprenører, statens organ for miljøvennlig omlegging av energibruk og energiproduksjon og rådgivende firma. Det setter vi stor pris og ønsker herved å takke for deres verdifulle bidrag.

I løpet av prosjektperioden, har vi bidratt i to internasjonale prosjekter under Det Internasjonale Energi Byrået (IEA), Gjennomføringsavtale om energiøkonomisering i bygninger og samfunnssystemer (ECBCS) Programme, Annex 47 og Annex 53. På den måten har den internasjonale ekspertisen og ideer blitt overført og tatt inn i det nasjonale prosjektet. I løpet av prosjektperioden har det blitt publisert to doktorgradsavhandlinger, tre masteroppgaver og mer enn 20 journaler og konferanseartikler.

Innhold

1. Mål og omfang for prosjektet	4
2. Medlemmer og prosjektorganisering	5
3. Hva er kontinuerlig funksjonskontroll?	5
4. Internasjonalt samarbeid	9
5. Kontinuerlig funksjonskontroll internasjonalt	12
6. Verktøy for kontinuerlig funksjonskontroll utviklet i dette prosjektet	13
7. Nødvendigheten og viktigheten av kontinuerlig funksjonskontroll for norsk bygningsindustri	30
8. Vitenskapelige publikasjoner og tekniske rapporter	32
9. Kilder	34

1. Mål og omfang for prosjektet

Hovedmålet var å utvikle, verifisere og implementere egnede verktøy for vurdering av bygningers energiytelse gjennom hele livsløpet. Motivasjonen for et slikt prosjekt kom fra praktiske erfaringer med drift og vedlikehold av bygninger, fra den fragmenterte naturen av byggebransjen, og fra teknologiutviklingen innen regulering og overvåking av bygninger. Alle aktører involvert i bestillingen, planleggingen, fremstillingen og driften av bygninger har gode hensikter med å oppfylle anerkjente krav om godt inneklima, rasjonell bruk av energi, minimal påvirkning av utemiljøet og rimelig økonomi. Erfaringer er imidlertid at produktet fra denne prosessen, det ferdige bygget med tekniske installasjoner, i alt for mange tilfeller viser uoverensstemmelse mellom de fremsatte krav og det som i virkeligheten er oppnådd. Begrunnelsen for disse avvikene kan være forskjellige og varierer fra feil i prosjekteringen og/eller i utførelsen, mangel på inspeksjon i byggefasen, uegnede strategier for regulering, aldring av komponenter til mangelfullt vedlikehold.

Kontinuerlig funksjonskontroll eller Lifetime commissioning (LTC), har i den senere tid blitt internasjonalt anerkjent som et lovende verktøy for å løse de nevnte utfordringene. Kontinuerlig funksjonskontroll omfatter mange forskjellige verktøy, metoder og aktiviteter som kan være til hjelp. ASHRAE Guideline 2005 definerer kontinuerlig funksjonskontroll som en prosess som skal sikre at systemet er prosjektert, installert, funksjonstestet og i stand til å bli drevet og vedlikeholdt for å yte i overensstemmelse med hensikten og for å holde bygningen i optimal tilstand gjennom hele levetiden [1].

Kontinuerlig funksjonskontroll er tett knyttet til **bygningens energieffektivitet** fordi det gjør det mulig å oppnå de ambisiøse målene. Hvordan kan kontinuerlig funksjonskontroll fremme energieffektivitet og reduksjon av CO₂ utslipp i bygninger? I planleggingsfasen for en bygning settes det opp flere mål

relatert til totalt energibruk, bygningens energiytelse og inneklima. Disse målene kan bli tatt fra relevante standarder eller byggeiere og brukere kan ha sine egne mål. Det er for eksempel populært at byggherrer og utbyggere ønsker å være anerkjent som "fyrtårn" når det gjelder energieffektivitet og redusert miljøpåvirkning. Verktøy og metoder for kontinuerlig funksjonskontroll støtter dette ved å følge opp bygningene gjennom prosjektering, bygging, i overtakelsesfasen og videre gjennom drift og vedlikehold. Kontinuerlig funksjonskontroll kan defineres som **kvalitetskontroll** for bygningens energiytelse.

Kontinuerlig funksjonskontroll som tema for forskning og praktisk arbeid er relevant for nesten alle aktører som er involvert i løpet av bygningens livsløp, inkludert byggeiere, prosjekterende, entreprenører, ansvarlige for drift og vedlikehold, leverandører av utstyr for regulering og overvåking, leietakere og brukere.

Både forskningsmessige og praktiske tema innen kontinuerlig funksjonskontroll er relatert til anvendelse av elementer fra byggeindustrien og andre industrier. Både i oljeindustrien og i kjernekraftverk er det for eksempel detaljert anleggsdokumentasjon og overvåking er et ufravikelig krav, fordi hele delsystemer er levert ferdig med instrumenter og forberedt for en enkel overvåking. Overvåking av en bygningens energiytelse kan imidlertid være vanskelig og utfordrende beroende på, for eksempel: lavkost karakteren og, den fragmenterte naturen av byggebransjen, tekniske utfordringer, mangel på ekspertise og dårlig kommunikasjon mellom aktørene i løpet av hele bygningens levetid, eierforhold ved drift og vedlikehold og total økonomi. Kontinuerlig funksjonskontroll vil derfor lette overgangen fra intuitive metoder for drift som i dag karakteriserer bygningsnæringen til mer systematisk arbeid som fokuserer på å oppnå energisparing som virkelig monner.

Kontinuerlig funksjonskontroll kan defineres som kvalitetskontroll for bygningens energiytelse.

Overvåking av en bygningens energiytelse kan imidlertid være vanskelig og utfordrende ..

2. Medlemmer og prosjektorganisering

Program for kontinuerlig funksjonskontroll for effektiv drift av bygninger (PFK) er et Kompetanseprosjekt med brukermedvirkning (KMB) med aktørene fra byggebransjen som inkluderer bedrifter, private og offentlige institusjoner og FoUorganisasjoner som medlemmer.

Faglig målsetning for PFK har vært å bidra til at kontinuerlig funksjonskontroll blir en naturlig del av byggeprosessen og i ledelsen av drift- og vedlikeholdsaktivitetene i bygninger.

PFK skal bygges opp til et internasjonalt ledende fagmiljø for kompetanse, forskning og utvikling innen kvalitetssikring av effektiv prosjektering og bygging, riktig og sikker drift, rasjonell energibruk og tilfredsstillende inneklima i bygninger.

PFK ble vedtatt startet på stiftelsesmøtet holdt 29. april 2005. Det var representanter for Telenor (eiendomsavdeling), Statoil (eiendomsavdeling) og Statsbygg samt det rådgivende selskap ProTeknologi som sammen med fagmiljøet ved Geminisenter Energiforsyning og klimatisering av bygninger ved NTNU og SINTEF som innså nødvendigheten og besluttet opprettelse av PFK. Flere medlemmer sluttet seg til senere.

Norges forskningsråd støttet programmet økonomisk i perioden 2007-2012.

PFK-medlemmer betalte en årlig medlemsavgift. Ved opprettelsen ble det besluttet at PFK skulle ha en varighet på minimum fem år. Grunnet begrenset tilgang på finansiering, varte programmet til slutt i åtte år.

I løpet av de åtte årene har PFK-prosjektet hatt følgende sju deltakere:

- Telenor (eiendomsavdeling)
- Statoil (eiendomsavdeling)
- Statsbygg
- Forsvarsbygg
- ProTeknologi / Norconsult
– rådgivende firma
- GK Norge AS
– entreprenør innenfor VVS, kulde, energi, automatisering
- Enova SF

Geminisenteret Energiforsyning og klimatisering av bygninger ved NTNU og SINTEF var den utførende enhet som også sto for den daglige ledelsen av PFK.

3. Hva er kontinuerlig funksjonskontroll?

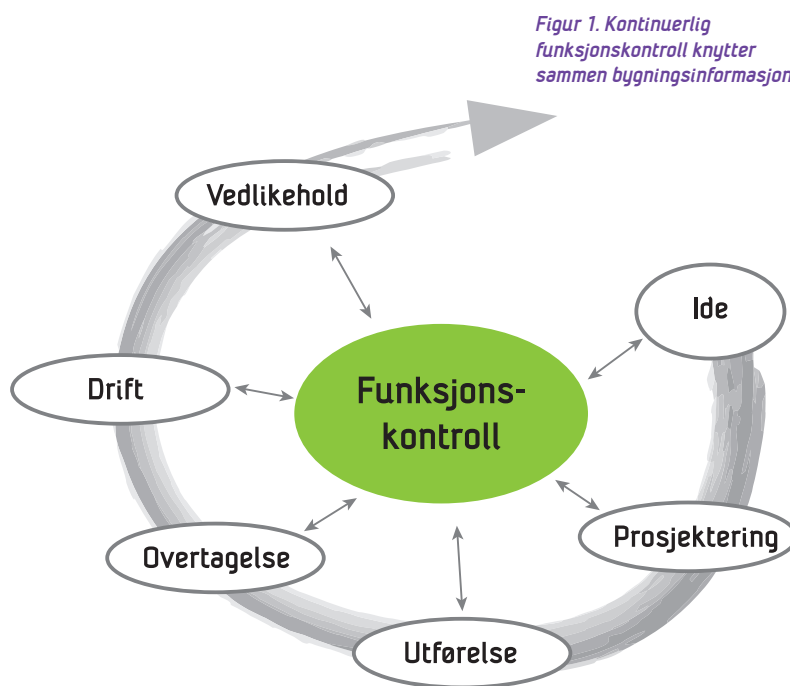
Det er mange forklaringer på hva kontinuerlig funksjonskontroll er, verifisering, dokumentasjon, overvåkning og optimalisering av bygningens ytelse. Kort forklart er funksjonskontroll en kvalitetsorientert prosess for å verifisere hvor godt bygningen møter kravene gjennom hele levetiden. Funksjonskontroll har tidligere utelukkende blitt forstått som en prosess på slutten av byggeperioden, også kalt **overtakelse**. Den nye forståelsen er at funksjonskontroll er en kontinuerlig prosess som strekker seg fra tidlig prosjekteringsfase og gjennom hele driftsfasen. Dermed blir alle ideer og mål fra prosjekteringsfasen overført videre til bygningens driftsfase. En illustrerende figur hvordan funksjonskontroll fungerer gjennom hele bygningens livsløp er gitt i figur 1.

I **Norge** har funksjonskontroll for større bygninger vært sett på som ferdigstillelse og overtakelse. Det har ikke vært ansett for å være en prosess fra starten av byggeprosjektet til slutten for bygningens levetid. Norske bestemmelser beskriver formalitetene angående prosessen for overtakelse, som innholdet i protokollen for ferdigstillelse, rutiner for endringsarbeid, prosedyrer i overtakelse osv. Det snakkes ikke om noen rutiner i løpet av utviklingen av byggeprosjektet. Noen store byggeiere har etablert egne funksjonskontroller basert på problemstillinger fra offshore og farmasøytisk industri.

For en nybegynner kan det være vanskelig å forstå hva kontinuerlig funksjonskontroll er og hvilken nytte vi har av det. For å klargjøre temaet, er det her satt opp en liste over hva **kontinuerlig funksjonskontroll ikke er**:

- En tilleggsfase i et prosjekt
- En isolert testing
- Testing, innjustering, utbalansering
- Oppstart av utstyr og komponenter.

Kontinuerlig funksjonskontroll vil trolig involvere testing, innjustering og utbalansering, oppstart av utstyr og forskjellige typer tester, men disse er bare



delers av den større og hele prosessen med funksjonskontroll som forekommer gjennom alle fasene i et prosjekt.

3.1. Hvorfor er kontinuerlig funksjonskontroll nødvendig?

Det er en økende oppfatning av at mange bygninger ikke yter som tenkt. Grunnene kan være mangelfull prosjektering og utførelse, feil på utstyr, feil i oppsetting av reguleringsystemer og uhensiktsmessige driftsprosedyrer [3]. På den andre side, beroende på unormale fysiske forandringer og aldring av komponenter samt mangelfullt vedlikehold, kan komponenter i klimasystemet bli rammet av komplett sammenbrudd eller kun delvis feilfunksjon [4]. Selv om bygningssystemer normalt er fulgt opp av anlegget for sentraldriftskontroll (SD-anlegg) ved en feil, vil ikke dagens SD-anlegg gi god nok støtte til å finne den underliggende feilen. Diagnostisering av feilen er derfor overlatt til driftsoperatøren [5]. De uunngåelige konsekvensene, helt likegyldig av feilkilden, vil være både en økning i energibruken og forringelse av innneklimaet.

.. mange bygninger ikke yter som tenkt ..

.. vil ikke dagens SD-anlegg gi god nok støtte til å finne den underliggende feilen.

En kort liste over noen feil i tre typiske klimasystem er gitt i tabell 1. Feilene er valgt fra IEA, ECBCS, Annex 25, som kom frem til disse resultatene ved kartlegging blant rådgivere, entreprenører og driftsansvarlige. Listen klassifiserer feilene basert på systemtyper, registrerte feilene og prosjektfasene hvor feilene ble registrert

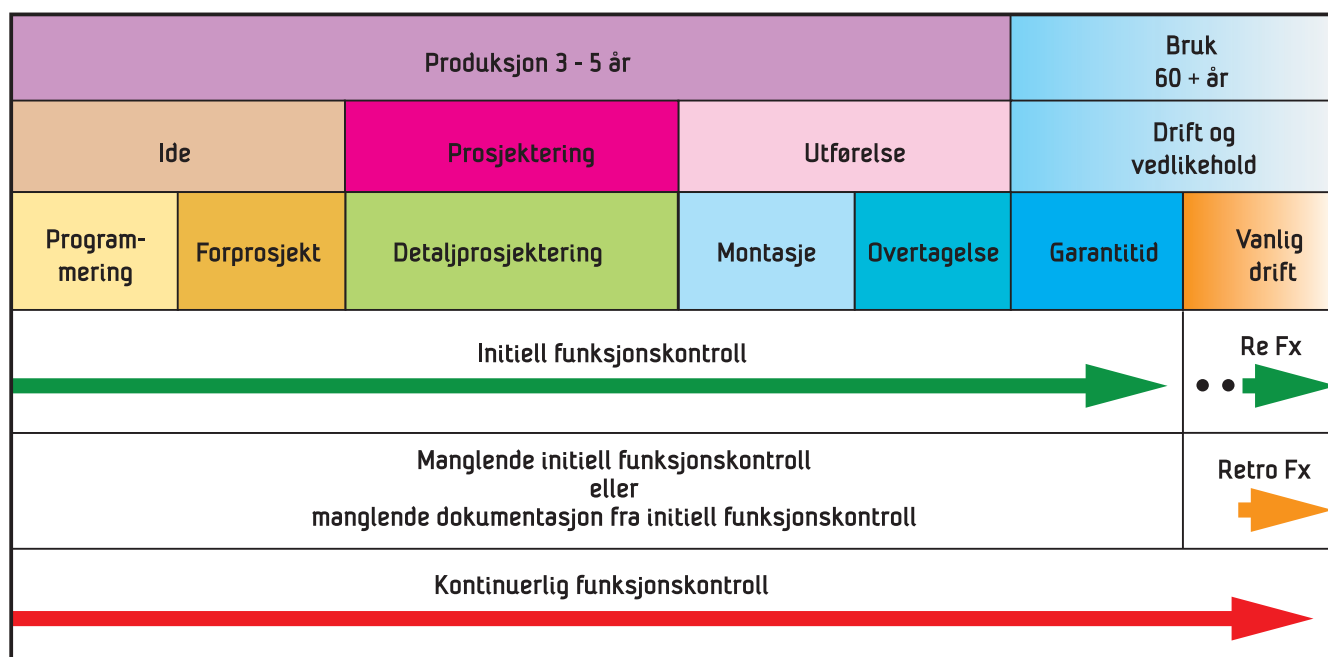
(prosjekteringsfeil, feil i vedlikehold, brukerfeil osv.).

Siden kompleksiteten av bygninger øker, kan det alltid oppstå nye feil. Energisparing vil derfor i nær fremtid bli oppnådd hovedsakelig gjennom optimal kontroll og tidlig påvisning av feil i klimasystemene.

Tabell 1. Oversikt over noen typiske feil i tre forskjellige klimasystem fra Annex 25 [5]

System	Feil	Kommentar
Vannbårne varmesystem	Ubalanse i oppvarming mellom forskjellige deler av bygningen	Prosjekteringsfeil
	Over- og underdimensjonering av radiatorer i visse rom eller i spesielle deler av systemet	Prosjekteringsfeil
	Feilinnstilling av utetemperaturkompenseringslinjen	Driftsfeil
	Feilberegning av optimal tidspunkt for start og stopp ved automatisk innstilling av driftsmodus	Driftsfeil
	Lekkasje i reguleringsventiler i sekundærkretsen	Driftsfeil
Kjølemaskiner og varmepumper	Kompressor pumper ikke	Vedlikeholdsfeil
	Underdimensjonerte anlegg	Prosjekteringsfeil
	For stort trykktap i fordampere	Prosjekteringsfeil
VAV-system	Kondensering pga. dårlig varmeisolering	Fabrikasjonsfeil
	Varmeoverskudd fra interne laster	Brukerfeil
	Utilstrekkelig støyreduksjon	Prosjekterings- og fabrikasjonsfeil
	Tette luftfilter	Vedlikeholdsfeil

Figur 2. Plassering av kontinuerlig funksjonskontroll



3.2. Verktøy og metoder for kontinuerlig funksjonskontroll

Verktøy og metoder for kontinuerlig funksjonskontroll kan bli mange. Noen av dem er utviklet i dette prosjektet og er presentert nærmere. En enkel forklaring på hvordan disse verktøyene virker kan angis som: organisering og utnyttelse av informasjon om bygningen og data fra SD-anlegget med påfølgendefremstilling av nyttig informasjon til driftsansvarlige.

SD-anlegg gir store mengder data om bygningens ytelse. Denne informasjonen er anvendelig for driftsoperatører og ledelse. Driftsoperatører kan bruke data om bygningens ytelse ved vedlikehold og til forbedring av bygningens ytelse. Energiledelse fordrer teknisk kunnskap for å forstå hvor godt eller hvor dårlig en bygning og dens systemer fungerer, for å kunne identifisere muligheter for forbedringer og implementere effektive oppgraderinger.

Godt utdannet og engasjert driftspersonell er svært viktige for at energiledelse skal bli en økonomisk suksess [5]. For bedre å utnytte vedlikeholdsdata fra SD-anlegg, er det viktig å fremskaffe **nyttig informasjon** om bygningens ytelse til driftspersonellet, slik at de har en faktisk forståelse for hva som virkelig skjer i en bygning.

Uansett anvendt logikk som utgjør grunnen for funksjonskontrollverktøy, er hovedpoenget med verktøyet **vurdering av bygningens ytelse**. Verktøy for vurdering av bygninger kan bli organisert i tre kategorier: benchmarking, energioppfølging og diagnostikk. **Benchmarking** (referansemåling) er et makroskopisk nivå for vurdering av ytelse, hvor målinger er brukt til å sammenligne ytelsen med andre. Typisk for benchmarking av bygninger er å benytte grove data, som for eksempel regning fra energileverandøren, og noen prosedyrer for normalisering av variabler som værforhold og gulvareal. **Energioppfølging** over tid er en logisk fortsettelse av engangsforeteelsen benchmarking. Energioppfølging kan resultere i en generell forståelse av lastkurver. Selv om nødvendige data for **diagnostikk** er mer omfattende enn for energioppfølging, er dette spranget i kompleksitet avgjørende for å oppnå informasjon som er nødvendig for å få hjelp til korreksjon ved problemer.

Benchmarking (referansemåling) og energioppfølging er nyttige for identifisering av ineffektivitet i hele bygningen, og kan føre til fokusering av innsatsen på områder med stort energibruk. Diagnostikk tillater imidlertid deteksjon av spesifikke problemer og gir hjelp til å avdekke disse problemene [6].

Verktøy for funksjonskontroll for vurdering av bygningens ytelse kan bli definert som:

- Funksjonstesting av ytelse (functional performance testing (FPT))
- Feilsøking og diagnostisering (fault detection and diagnosis (FDD)).

FPT er prosessen for å bestemme klimasystemets evne til å levere varme, ventilasjon og kjøling i samsvar med prosjekteringsformål [5]. FPT er mer viktig under byggefasen og overleveringsfasen av bygningen, mens FDD-verktøy er nødvendig under drift og vedlikehold. FDD-verktøy kan være manuelle eller automatiserte. **Manuelt verktøy** inneholder forskjellige retningslinjer for driftsoperatører. **Automatisert funksjonskontroll** innebærer analyse av systemets ytelse for å kunne avdekke og diagnostisere problemer som ville påvirke driften av systemet ved normal bruk [7].

Bruk av et funksjonskontrollverktøy er avhengig av hvordan et verktøy er laget og hvordan det brukes. Disse verktøyene kan være automatiserte eller manuelle. Automatiserte verktøy er innlagt i reguleringssystemer for klimaanlegg. Et viktig hjelpemiddel for praktisk anvendelse for hvilket som helst verktøy i eksisterende bygninger er SD-anlegg.

3.3. Hvor plassere kontinuerlig funksjonskontroll i hverdagen?

Kontinuerlig funksjonskontroll kan bli anvendt gjennom bygningens levetid og er en team-orientert prosess [5]. Siden kontinuerlig funksjonskontroll skal forstås som et hjelpemiddel eller verktøy for å forbedre bygningens ytelse gjennom hele bygningens levetid, er den anbefalt ved oppføring av nye bygninger så vel som for eksisterende bygninger. Ved å benytte forskjellige verktøy og metoder, kan kontinuerlig funksjonskontroll bli anvendt gjennom hele bygningens levetid for forskjellige formål som vist i figur 2.

Godt utdannet og engasjert driftspersonell er svært viktige for at energiledelse skal bli en økonomisk suksess.

4. Internasjonalt samarbeid

*.. det ofte er betydelige
avvik mellom den
prosjekterte og den
virkelige totalbruken av
energi i bygninger ..*

Gjennom prosjektet har vi bidratt i to internasjonale prosjekter etablert ved Det Internasjonale Energi Byrået (IEA), Gjennomføringsavtale om energiøkonomisering i bygninger og samfunnssystemer (ECBCS). IEA – ECBCS Programmet gjennomfører forsknings- og utviklingsaktiviteter mot nær null-energi og karbonutslipp i bygd miljø. Aktiviteter innen forskning og utvikling fokuserer på integrering av energieffektive og bærekraftige teknologier i sunne bygninger og samfunn. Prosjekter og aktiviteter i ECBCS har produsert langvarige beslutningstakende verktøy og integrerte teknologiske systemer [8]. Prosjektene under ECBCS er kalt Annexer med fortløpende nummer. Disse prosjektene er svært gode midler for å utveksle informasjon om metoder i forskjellige land og spre relevant informasjon til de enkelte land. IEA – ECBCS støttet flere prosjekter direkte eller indirekte relater til kontinuerlig funksjonskontroll: Annex 25, 40, 47 og 53.

4.1. Bidrag til Annex 47 og Annex 53

Vårt fagmiljø deltok i tre av disse fire påfølgende prosjektene, Annex 40, 47 og 53. Annex 40 ble avsluttet allerede før vårt nasjonale PFK-prosjekt ble startet. Vår deltakelse ble her finansiert gjennom SMARTBYGG-prosjektet og våre aktiviteter og resultater dannet det faglige grunnlaget for etablering av både vårt nasjonale PFK-prosjekt og vår deltakelse i de to senere Annexene.

Annex 47 med tittelen Kostnadseffektiv funksjonskontroll for eksisterende og lavenergi bygninger, ble startet i 2005. Målsettingen for IEA – ECBCS Annex 47 var å muliggjøre kostnadseffektiv funksjonskontroll for eksisterende og fremtidige bygninger for å bedre deres effektivitet under drift, slik at lavenergi-bygninger er mulige. Metoder ved funksjonskontrollen utviklet gjennom dette prosjektet vil være til hjelp ved overgang fra intuitiv drift av bygninger til mer systematisk drift som fokuserer på å oppnå betydelig energisparing [9]. Annex 47 varte i tre år.

Hovedresultater fra IEA – ECBCS Annex 47 omfatter:

- Metoder og verktøy for funksjonskontroll av avanserte systemer og lavenergibygninger
- Metoder og verktøy for bruk i felt
- Informasjon om kostnader og fordeler som kan bli brukt til å fremme utvidet bruk av funksjonskontroll
- Flytskjema og datamodeller for initial funksjonskontroll og systemer for lavenergi-bygninger.

Våre bidrag til Annex 47 var relatert til verktøy for funksjonskontroll for eksisterende bygninger, kost-nytte analyser og datamodeller for funksjonskontroll. Våren 2006 var vi vertskap for Annex 47 Ekspertmøte i Trondheim.

Annex 53 med tittelen Total energibruk i bygninger: Metoder for analyse og evaluering, ble startet i 2009. Målsettingen med dette prosjektet var å forstå og identifisere de mest signifikante faktorene for den virkelige energibruken i bygninger. Motivasjonen til prosjektet kom fra det faktum at det ofte er betydelige avvik mellom den prosjekterte og den virkelige totalbruken av energi i bygninger, der en rekke faktorer spiller en betydelig rolle, inkludert adferd til brukere / beboere. Det endelige resultatet av dette prosjektet er styrking av den robuste måten å forutsi energibruk i bygninger. På kort og lengre sikt blir det enklere å vurdere riktige energieffektiviserings tiltak og – teknologier.

Hovedmålsettingen er å:

- Utvikle en ny metode for analyse av energibruk i bygning
- Demonstrere hvordan disse data kan bli brukt til å skaffe nyttige indikatorer for energiytelse i bygninger
- Utvikle metoder og teknologier for langtids overvåking av energibruken i bygninger [10].

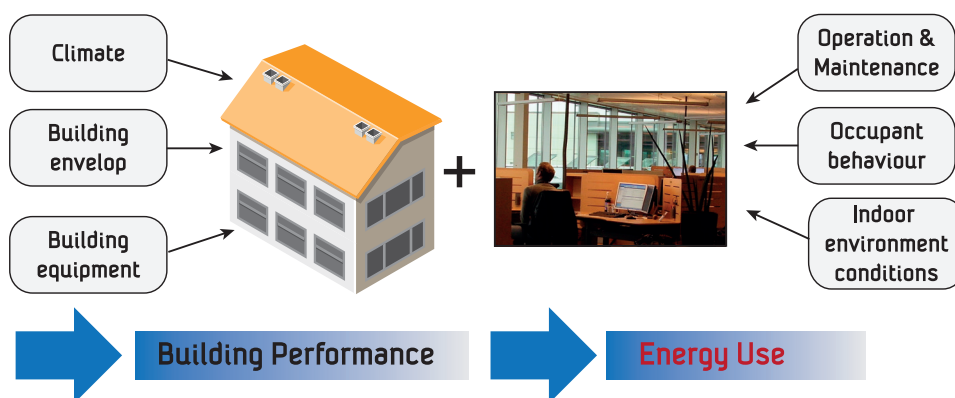
Forskningsaktiviteten i Annex 53 definerte seks viktige faktorer som påvirker virkelig

bruk av energi i bygninger. Disse faktorene er vist i figur 3.

Basert på vår erfaring med samling av bygningsdata og energiovervåking, har vi levert detaljerte data fra to eksempelbygg som bidrag til Annex 53. En av våre

eksempelbygg var benyttet som et ledende eksempel på hvordan en bygning skulle bli dokumentert. Ved bruk av våre data laget kinesiske kollegaer fra Annex 53 en forklarende poster som er vist i figur 4. Vi bidro også med stoff relatert til statistiske metoder og teknologier for overvåking.

Figur 3. Faktorer som påvirker energibruken i bygninger definert i Annex 53 [10]



Figur 4. Eksempelbygg fra Norge i Annex 53

The ultimate outcome of Annex 53 is better understanding and strengthening the knowledge for robust prediction of total energy usage in buildings, thus enabling the assessment of energy-saving measures, policies and techniques. For that this annex pursues to study how the occupant behaviors influence building energy consumption on this base, and hence to bring the occupants behaviors into the building energy field so as to conduct the building energy works (research, practice, policy, etc) more dosed with the real world.

The deliverables of Subtask B is:

- Demonstration of case studies of energy use by end use in buildings
- Demonstration of measurement and data acquisition technologies for long term monitoring (On-line Database)



International Energy Agency
Energy Conservation in
Buildings and Community
Systems Programme

**ANNEX 53 Total Energy
Use in Buildings
-Analysis and Evaluation
Meethod**



Case Information

STB CASE CONTRIBUTOR

AUSTRIA Vienna University of Technology
BELGIUM University of Liège
CHINA Tsinghua University
Swire Properties Ltd.
FRANCE Insa de Lyon
ITALY Politecnico di Torino
JAPAN Tohoku University Chubu
Electric Power Co., Inc.
NORWAY Norwegian University of Science
and Technology

WEATHER

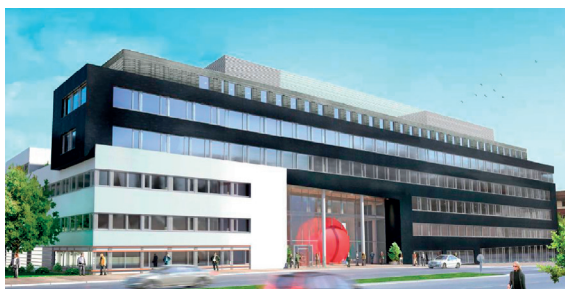
In Norway, CDD is not an actual parameter. HDD is 4856 of year 2010. HDD was calculated for the base indoor temperature of 17°C.

BUILDING

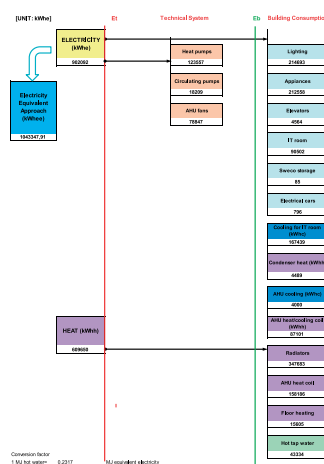
The case is an office building in Professor Brochs gate 2. Height of the building is 21 m (the front block) and 14 m (the back block). The Gross Floor Area and conditioned building both are 16,200 m²

ACKNOWLEDGMENT

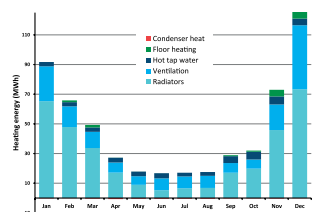
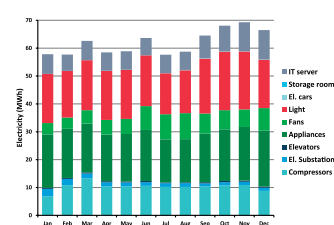
All the information and data is provided by Energy and Process Engineering of Norwegian University of Science and Technology.



Energy Consumption

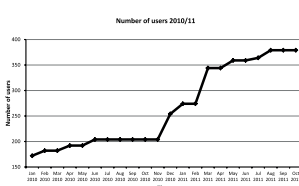
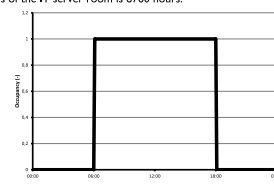


Subtask B- Case Study Large-scaled office building in NORWAY



Occupant Behavior

The presence schedule for the office building in Trondheim is given in the following figure. This office building is rented to different companies, usually companies have working time between 8 a.m. until 4 p.m. But some companies could extend working time until 5 or 6 p.m. In general, it can be assumed that working hours is about 2000 hours for light and ventilation in the building. Light in the corridors and common area is working longer. Working hours of the IT server room is 8760 hours.



5. Kontinuerlig funksjonskontroll internasjonalt

Nivået på aktiviteten og implementering av funksjonskontroll er forskjellig rundt om i verden. En kortfattet statusoversikt over funksjonskontrollen på bygninger er presentert her. Den omfatter status i Europa, Nord Amerika og Japan.

Europa: For de fleste landene i Europa, med unntak av Storbritannia, er funksjonskontroll ganske nytt. EU innførte Det europeiske direktivet for energiytelse for bygninger, også kalt Bygningsenergidirektivet (*European Performance of Buildings Directive, EPBD (EC 2002)*), for å fremme energieffektivitet og bedre energiytelse for bygninger. EPBD innfører felles metode for beregning av energibehov og krav om energisertifisering av bygninger. I tillegg innføres det krav for inspeksjon og kontroll for å sikre at direktivet er fulgt. I følge rapporter fra medlemslandene, medfører implementering av EPBD betydelige praktiske utfordringer, spesielt gjelder dette hvordan kravene overføres til land med ulikt klima. Fordi funksjonskontrollprosessen står på linje med målene for EPBD, er det startet flere nasjonale forskningsprogram som introduserer funksjonskontroll som et middel for å oppnå kravene i direktivet. I mange land er oppgavene med funksjonskontroll fokusert på overlevering av bygningen, eller gjennomført som en del av bedriftens system for driftsledelse. For at funksjonskontroll skal ha en reell besparelse, må prosessen starte i idefasen, hvor det er lettere å gjennomføre endringer som er mer kostnadseffektive. Den økende oppmerksomheten på energieffektivitet for bygninger vil føre til større anvendelse og ensartet praksis for funksjonskontroll gjennom hele bygningens livsløp [11].

Nord Amerika: Funksjonskontrollkonseptet av bygninger i Nord-Amerika ble introdusert ved Regelverk for funksjonskontroll av mekaniske systemer i bygninger, som ble utviklet i 1986 av *Standing Committee of Consulting Engineers and Mechanical Contractors of British Columbia*. I dag er det flere retningslinjer på funksjonskontroll

anerkjent av bransjen: ASHRAE *Guideline 1-1989 The HVAC Commissioning Process* (revidert i 1996), og ASHRAE *Guideline 0-2005, The Commissioning Process*. Selv om kontinuerlig funksjonskontroll for bygningssystemer er en etablert praksis i både Canada og USA, er ikke metoden utbredt. Mange av de eksisterende prosessene er fokusert på konvensjonelle klimasystemer, og det er behov for informasjon om andre typer systemer, særlig på grunn av økt interesse for ikke-konvensjonelle lavenergisystemer.

I Canada og USA, har bevisstheten om funksjonskontroll økt gjennom faglige organisasjoner, sertifiseringsprogrammer (for eksempel LEED), store byggeieres interesseorganisasjoner og tiltak for energieffektivisering. LEED setter et rammeverk for vurdering av en bygning ytelse for å nå mål om bærekraftighet. Funksjonskontroll er et krav for å oppnå LEED sertifisering både for nye og eksisterende yrkesbygninger. Uansett, er det behov for større oppmerksomhet på fordeler og kostnader ved funksjonskontroll og det er behov for både opplæring og sertifisering av de som utfører funksjonskontroll for å øke tilbudet.

Forskningsinstituttet i Canada, Natural Resources Canada, har utviklet programvare for funksjonskontroll, **DABO**. DABO er en programvare som er en del av anlegget for sentraldriftskontroll (SD-anlegg). Det analyserer data tilgjengelig gjennom SD-anlegget for å identifisere feil i drift av energikrevende utstyr og systemer. DABO benytter ekspertkunnskaper til å identifisere disse feilene gjennom å bruke et hybrid kunnskapsbasert system bestående av et ekspertsystem og en saksbasert vurderingsmodul. DABO detekterer ødelagt elektromekanisk utstyr og identifiserer driftsproblemer basert på sine 800 logiske regler. I tillegg foretar DABO en mer dyptgående analyse av driftsfeil i elektromekaniske systemer og identifiserer under- eller overdimensjonerte

For de fleste landene i Europa, med unntak av Storbritannia, er funksjonskontroll ganske nytt.

komponenter med 275 indikatorer for ytelse. Til slutt kan nevnes at denne programvaren produserer feilrapporter og analyser for ytelser og anbefaler korrektive tiltak som driftspersonalet kan iverksette før feilene får konsekvenser [12].

The Energy Systems Laboratory ved Texas A&M University var banebrytende i å utvikle funksjonskontroll som en kontinuerlig prosess. The Energy Systems Laboratory har utviklet prosessen **Continuous Commissioning®** (CC) for å forbedre komfort og ytelse ved å benytte kostnadseffektive tiltak. CC® setter sammen de beste teknikkene for retro funksjonskontroll i en prosess som har oppnådd meget gode resultater i over 300 bygninger rundt om i verden. Målsettingen med CC® er å oppnå en rask tilbakebetaling under forutsetning av en vedvarende forbedring i bygningens ytelse, i henhold til anleggets reelle bruk. The Energy Systems Laboratory og dets lisensierte partnere har tilgang til verktøy, forskning og ekspertise, som gjør prosessen Continuous Commissioning® effektiv [13].

Japan: I 2006 ble rapportering av bygningers energiytelse lovpålagt under Energy Conservation Law. Rapportene er basert på enkle ytelsestester av komponenter og systemer som har den største innvirkning på energibruk for oppvarming, ventilasjon og klimatisering. I praksis er det betydelig variasjon i gjennomføringen, fordi ingen standard testprosedyrer er spesifisert, og det er uklart om relevante problemer kunne blitt tilstrekkelig undersøkt fra data som finnes i rapportene. Som følge av dette har

funksjonskontroll fått mer oppmerksomhet i bygningssektoren i Japan. I eksisterende bygninger er forskjellige metoder for retro funksjonskontroll svært ofte benyttet, mens initial funksjonskontroll for nye konstruksjoner er ikke vanlig.

I 2005 ga Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan (SHASE), teknisk komite for funksjonskontroll ut retningslinjer for funksjonskontrollprosess for tekniske installasjoner. The Building Services Commissioning Association (BSCA), en faglig organisasjon startet i 2004, tilbyr seminarer om funksjonskontroll i større byer, og har startet samarbeid med andre asiatiske land som Kina (inkludert Hong Kong), Taiwan og Korea. De sammenstiller dokumentasjon og verktøy for funksjonskontroll gjennom pågående prosjekter og forskning. BSCAs strategi er å etablere et sertifiseringsprogram for spesialister for funksjonskontroll, også inkludert den ansvarlige for funksjonskontroll, og å utdanne byggebransjen og relaterte statlige organer.

Energipolitikk spiller en viktig rolle. Departementet for økonomi, handel og industri er interessert i en ny forretningsmodell basert på bygningers funksjonskontroll, for å fremme energieffektivitet i nye og eksisterende bygninger. Departementet for naturressurser, infrastruktur og transport fremmer energiledelse gjennom hele livsløpet gjennom et nylig utviklet simuleringsverktøy. Etterspørselen etter funksjonskontroll i markedet er forventet å bli stor, men pålegg, basert på energi og miljø målsetninger, er nødvendig for å få byggeiere til å bruke funksjonskontroll på nye bygninger [11].

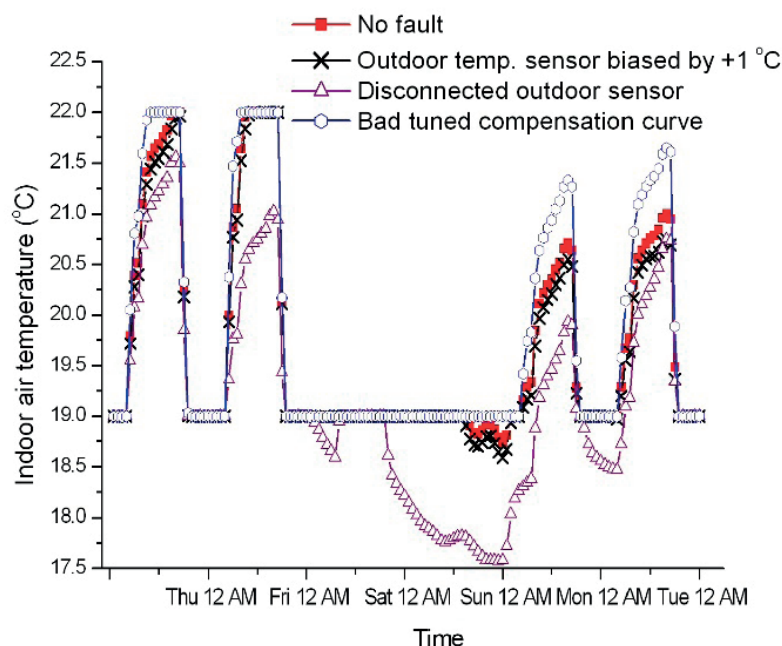
The Energy Systems Laboratory ved Texas A&M University var banebrytende i å utvikle funksjonskontroll som en kontinuerlig prosess.

6. Verktøy for kontinuerlig funksjonskontroll utviklet i dette prosjektet

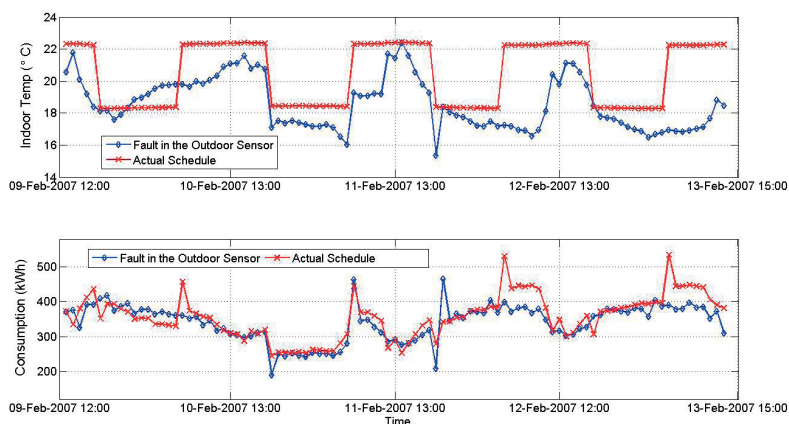
6.1. Simuleringsverktøy for FDD og bygningsoptimalisering

Forskjellige problemer kan bli oppdaget under drift av bygninger. Det kan være utfordrende å håndtere disse problemene. På den andre side er det behov for å optimere drift av bygninger, men dette problemet er også utfordrende. Simuleringsverktøy

Figur 5. Virkning av feil i det vannbårne oppvarmingssystemet på oppnådd romtemperatur



Figur 6. Virkning av frakoplet sensor for utetemperatur på oppnådd romtemperatur og energibruk



gir mulighet til å teste forskjellige typer feil og optimalisere drift av bygninger. Natasa Nord (Djuric) tok sin doktorgrad med avhandlingen "Sanntidskontroll av klimasystemers ytelser" ("Real-time supervision of building HVAC system performance"). I denne avhandlingen er det vist en del eksempler på optimalisering av design og drift. Det er benyttet data fra drift i virkelige bygninger for å oppspore driftsfeil og for å optimalisere driften. Simuleringsverktøy er benyttet både for bygningsoptimalisering og for å oppdage feil. Bruk av simultanverktøy gir mulighet til å prøve ut og teste mulige driftsfeil og til å optimalisere driften. Avhandlingen presenterer metoder for forbedring av ytelse av klimasystem i eksisterende bygninger som er utviklet ved å benytte verktøy basert på simulering og reelle data. Det er også vist avansert utnyttning av data fra SD-anlegg for å påvise feil og bygningsoptimalisering. Simulerings- og optimaliseringsprogrammene (*EnergyPlus* og *GenOpt*) er koblet sammen og benyttet for å forbedre bygningens energiytelse. Disse verktøyene er brukt for å forbedre design og strategiene for regulering i klimasystemer [14].

Simuleringsverktøy gjør det mulig å prøve forskjellige driftssituasjoner som komponentfeil, aldring av utstyr, dårlig regulering osv. på en enkel måte. Ved å benytte simuleringsverktøy som *EnergyPlus* og *TRNSYS*, har flere **FDD-regler** blitt utviklet. Reglene har blitt utviklet for systemer for luftkjøling og vannbåren oppvarming. Disse reglene kan diagnostisere feil i reguleringen og i komponentene. Et eksempel på resultatene fra simulering og hvordan forskjellige **feil i vannbårent varmesystem** kan påvirke romtemperaturen er vist i figur 5. Ved å analysere årsakene og effektene av feilene som er testet, har nyttig informasjon for vedlikehold av bygninger blitt beskrevet og forklart [14].

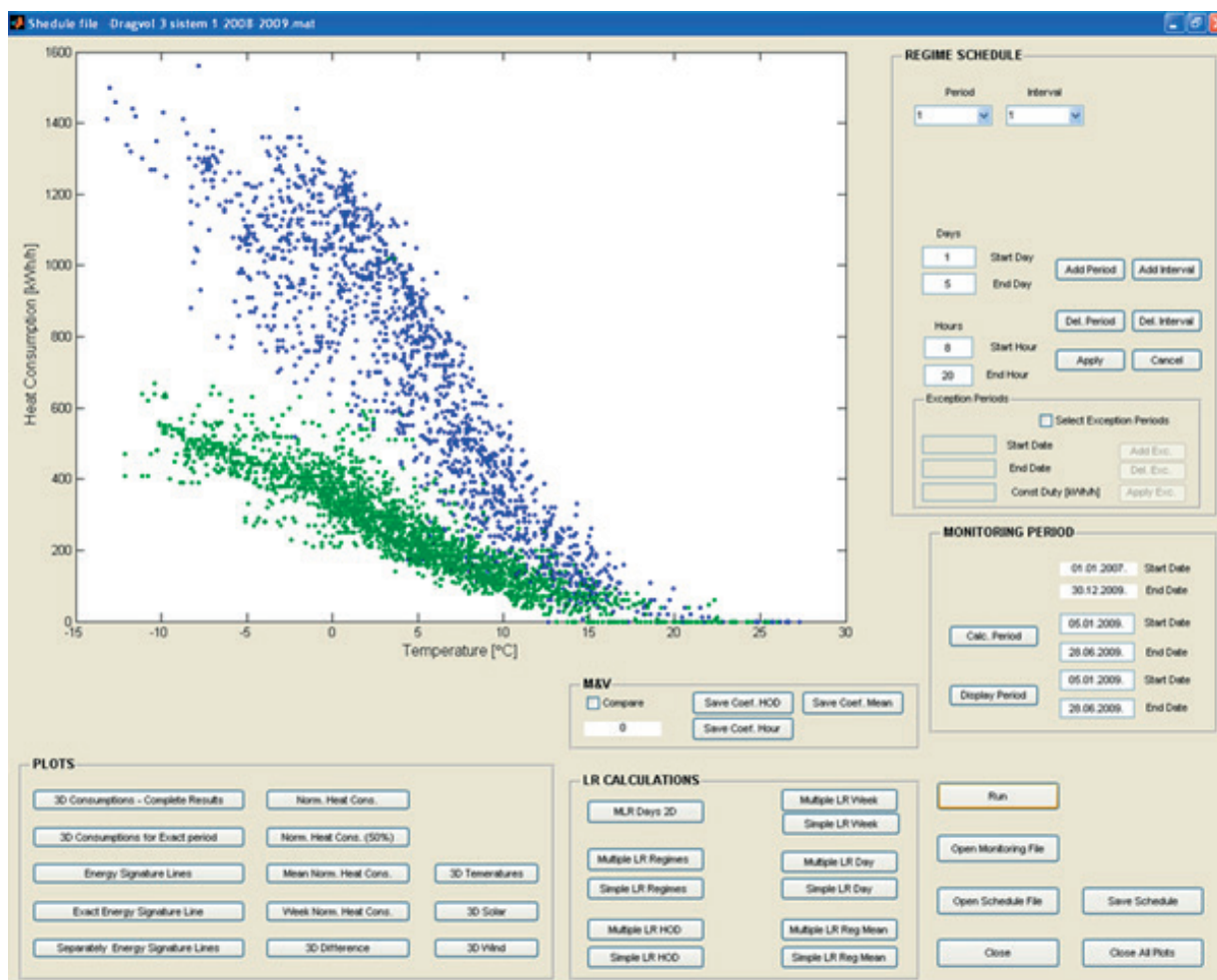
Videre har avhandlingen vist en avansert utnyttning av data fra SD-anlegg ved hjelp

av MATLAB. **MATLAB** (matrix laboratory) er et numerisk databehandlingsprogram opprinnelig utviklet for numeriske beregninger [15]. Reelle data hentet fra SD-anlegg og fra supplerende målinger har vært brukt til å forklare feil i det vannbårne oppvarmingssystemet. Ved å koble reelle data og den enkle modellen for varmebalansen, har prosedyren for kalibrering av modellen ved bruk av en optimaliseringslogaritme blitt utviklet. Ved bruk av modellen er det funnet forklaring på tre driftsfeil i det vannbårne oppvarmingssystemet. I figur 6 viser konsekvensene av en frakoblet sensor for utetemperatur på det vannbårne oppvarmingssystemet. Sammenhengen mellom utetemperatur og turtemperaturen for levert vann, er definert gjennom en kompensasjonskurve. Hvis kompensasjonskurven for utetemperatur ikke er tilstrekkelig justert til bygningens funksjon, kan den ønskede romtemperaturen ikke oppnås [14].

De viktigste konklusjonene i avhandlingen gjelder den praktiske koblingen mellom reelle data og simuleringsverktøy. For en fullgod forståelse av feil i systemet er det nødvendig å skaffe mye informasjon og **virkelige data**. Selv om SD-anlegg kan gi mange bygningsdata, ble det påvist at SD-anlegg ikke er fullstendig utnyttet i dag. Derfor kan reguleringsstrategiene hele tiden forbedres og justeres til å passe den aktuelle bygningens behov, ved å bruke simulerings- og optimaliseringsverktøy. Som vist ovenfor, kan mange forskjellige FDD-regler for klimasystem bli generert ved å benytte simuleringsverktøyet. Disse FDD-reglene kan bli brukt som instruksjonsmanual for driftsoperatører eller som et rammeverk for automatiserte FDD-algoritmer [14].

.. fullgod forståelse av feil i systemet er det nødvendig å skaffe mye informasjon og virkelige data ..

Figur 7. Hovedsiden i brukergrensesnittet for verktøy til identifisering av drifts- og vedlikeholdsproblemer



6.2. Bruk av energioppfølging for å verifisere bygningens energiytelse

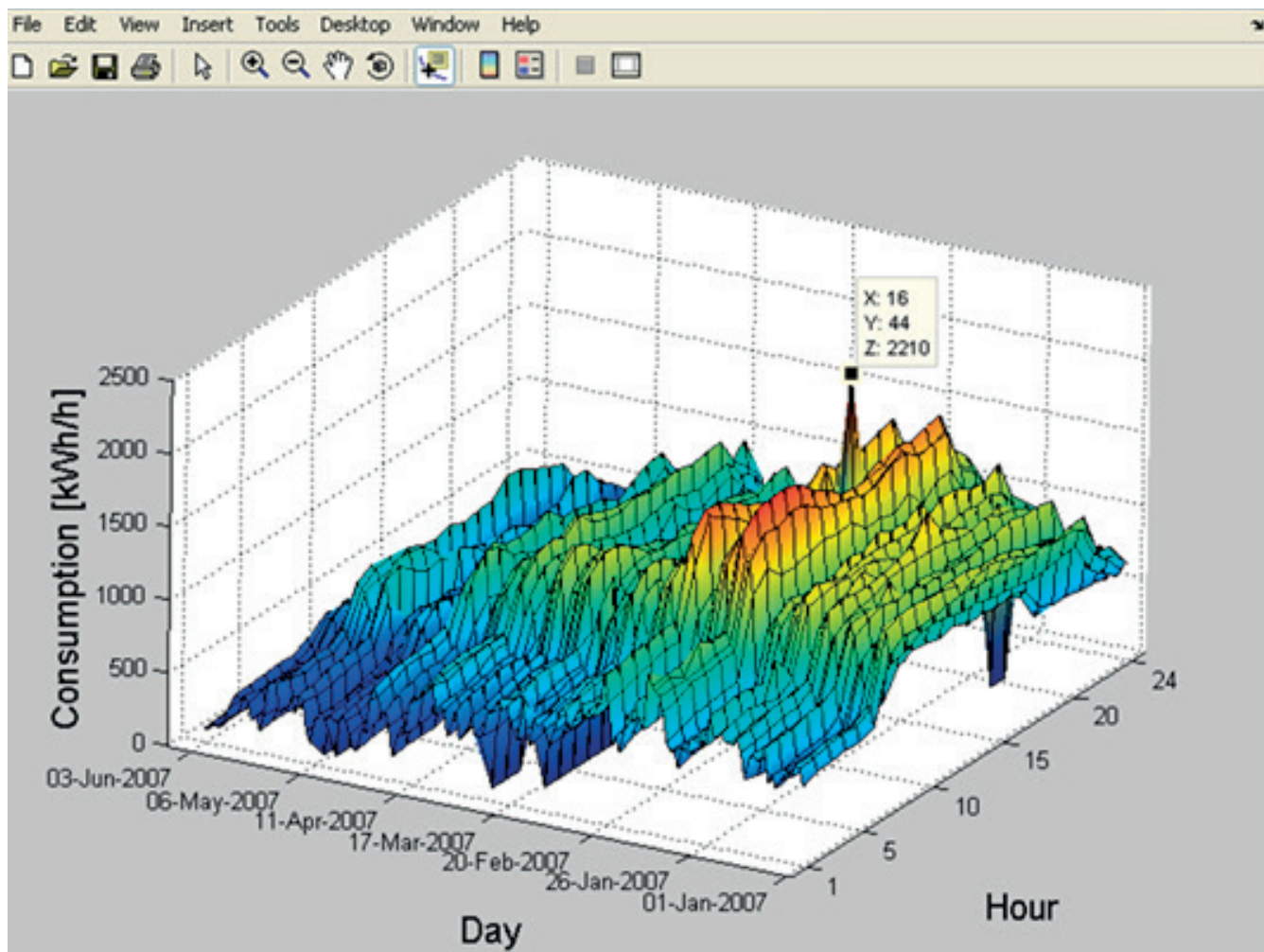
Et verktøy for identifisering av problemer ved drift og vedlikehold, er utviklet og presentert i doktorgradsavhandlingen av Marko Masic: «Bruk av energioppfølging for å verifisere bygningens energiytelse» ("Using building energy monitoring to verify building energy performance"). Dette verktøyet utnytter timesdata for å modellere hvordan bygningens energibruk påvirkes av indre og ytre faktorer. Ytre faktorer er utetemperatur, tilskudd fra sol og varmetap på grunn av vind. Drift av bygningen blir betraktet som en indre faktor. Verktøyet som ble utviklet gjennom doktorgradsarbeidet kan gjøre følgende analyser: utvikle en **lineær regresjons-modell** for energibruk for romoppvarming og oppvarming av ventilasjonsluft og vurdere problemer med drift og vedlikehold. Verktøyet er utviklet

i MATLAB [15]. Det er brukt for å finne problemer ved drift av 19 bygninger ved NTNU [16]. Hovedsiden i brukergrensesnittet for verktøyet er vist i figur 7 [16].

Verktøyet mulighetene er vist i figur 7. Det viser for eksempel at verktøyet analyserer bygningens oppførsel ved å sammenligne **aktuell og modellert energibruk** for en betraktet analyseperiode. Som et eksempel i figur 7 er to forskjellige driftsregimer gjenkjent, noe som kan gi indikasjon for to forskjellige linjer for ET-kurve.

I avhandlingen avdekkes problemer ved drift og vedlikehold ved å sammenligne aktuelt og modellert varmekonsum. Estimerte verdier er nøyaktig nok til å avdekke feil ved drift og vedlikehold. **ET-kurvene** er bestemt ved bruk av lineær regresjonsmetode. Avhandlingen drøfter hvilke faktorer som

Figur 8. 3D plot av faktisk varmekonsum



bestemmer energibruk til romoppvarming og til oppvarming av ventilasjonsluften. Resultatet viser at bruk av data med varierende oppløsning vil gi forskjellige muligheter for å avdekke variasjoner i energibruken. Desto høyere oppløsning, desto bedre detaljeringsgrad er det mulig å oppnå. Figur 8 viser et 3D timesplot av energibruk. Horizontalplanet viser dager og timer, mens den vertikale akse er energi til oppvarming. Ved å bruke 3D plot som i figur 8, er det enkelt å identifisere avvik og feil i drift av bygninger. To topper i figur 8 (en oppover og en nedover) er gode eksempler på hvordan avvikende energibruk kan bli identifisert. Fire ulike modeller for estimering av energibruken er sammenlignet: gruppering av alle timene i det samme døgnet, gruppering av den samme timen i påfølgende døgnet, gjennomsnittsverdier for det samme driftsregime samt for det samme døgnet.

6.3. Behovsstyring av energi- og innneklimaet – oppfølging i praksis

Aina Eide tok både prosjektoppgave og masteroppgave innenfor PFK-prosjektet. Målet med arbeidet hennes var **datainn-samling** og overvåking av **behovsstyrte systemer** i praksis. Videre var et av målene med arbeidet dokumentasjon av reell energiytelse.

Tekniske data fra bygning, drift, og tilleggsmålinger brukes til å utvikle en prosedyre for PKF i denne masteroppgaven. Prosedyrene er utviklet spesielt for de analyserte eksempelbygningene. Med dette får en fram **bygningens informasjon** i ulike faser av byggeprosessen. Behovsspesifikasjonene er hentet fra idefasen, designparametere fra prosjektfasen, installerte verdier fra byggefasen, og driftsverdier fra drift og vedlikehold. Informasjonen fra de forskjellige fasene sammenlignes så og sjekkes mot byggherrens krav i forhold til miljø, energi og ressursbruk. Disse prosedyrene er utviklet i Excel som **regelbaserte spørsmål**, slik at det er enkelt å sammenligne og kontrollere. I tillegg er simuleringsprogrammer brukt til å estimere energiytelse og til å sammenligne med målt energiforbruk [17].

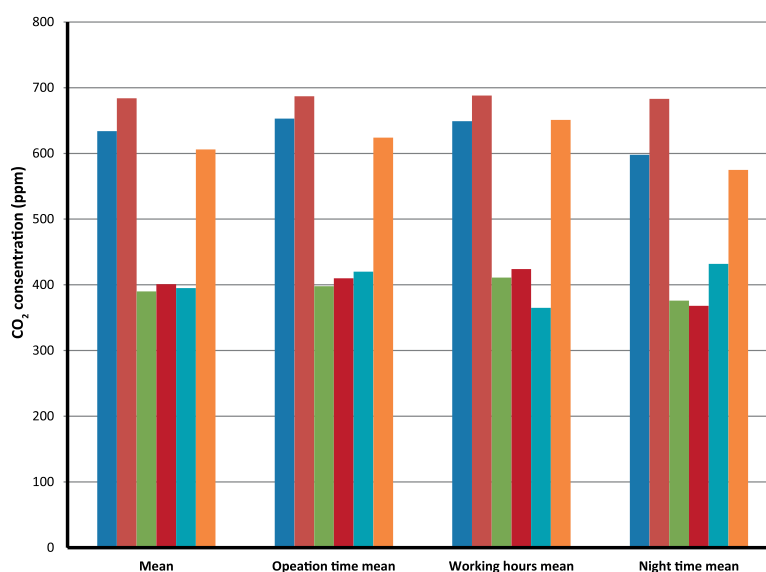
Prosedyrene som er brukt ser ut til å fungere bra, fordi flere feil er identifisert ved ulike systemer i bygningen. Noen feil ble funnet i **VAV-systemet**, for eksempel: de installerte VAV-spjeldene har ikke riktige driftsforhold, en stor forskjell mellom målt og prosjektert trykk på tilluft er identifisert, og settpunktet for CO₂-sensorer er for høyt (1250 ppm). Når det gjelder **belysning**, er den installerte lyseffekten mye høyere enn anbefalt. Dette kan bidra til at lufttemperaturen også blir høyere enn anbefalt.

Vurdering av innneklimaet er utført ved hjelp av spørreundersøkelse blant bygningens brukere samt direkte målinger. Resultatene viser at de målte innneklimaforholdene er innenfor kravene til Arbeidstilsynet. Ut fra spørreundersøkelsen ser det ut at brukerne er fornøyde med sine omgivelser. Det er registrert støy fra spjeldmotorene som ikke er akseptabelt i følge leverandøren, og det anbefales utskifting av disse. Analyse av **CO₂-nivået** i kontorene er vist i figur 9.

Analyse av energibruk i bygningen viser at den spesifikke energibruken er målt til 189 kWh/m², noe som er høyere enn forventet energibruk på 130 kWh/m². En mulig årsak kan være at den installerte lyseffekten er høyere enn tiltenkt. Bygget har spesifikk energibruk for lys på 28 kWh/m² som er mye høyere enn 8 kWh/m² som kreves i teknisk veiledning [17].

.. de installerte VAV-spjeldene har ikke riktige driftsforhold, en stor forskjell mellom målt og prosjektert trykk på tilluft er identifisert, og settpunktet for CO₂-sensorer er for høyt ..

Figur 9. Analyse av CO₂-nivå i seks kontorer i et kontorbygg



FK-ansvarlig har ansvar for at de kravene som eieren stiller blir realisert i prosjektet og at kravene systematisk følges gjennom hele bygningens levetid.

6.4. Dokumentasjon av et kontorbygg med fokus på kommende energikrav

Linn Dalaker tok både prosjektoppgave og masteroppgave innenfor PFK-prosjektet. Tittelen på denne masteroppgaven er *“An office building with a focus on upcoming energy requirements”*. Emnet er basert på innføring av EPBD i Norge og effekten det har på de norske kravene til energieffektivitet i bygninger. Dette har skjerpet kravene til dokumentasjon i prosjekteringsfasen samt dokumentering av resultater i driftsfasen. Oppgaven ser på et nytt kontorbygg som brukes av et rådgivningsfirma. Kontorbygget ligger i Oslo, og rådgiverfirmaet har selv prosjektert bygget. Hovedkravet var at bygningen skulle oppfylle energiklasse B i henhold til Energimerkeforskriften. Hovedmålet med oppgaven har vært å følge opp driften av bygningen og å dokumentere inneklima og oppnådd energieffektivitet.

Det er utviklet spesifikke prosedyrer for oppfølging, testing og verifisering av bygningssystemer. Flere avvik fra kravene ble funnet ved å sammenligne bygningssystemer i ulike faser, prosjektering, bygging og drift. Det ser ut som at tidligere kontroll i byggeprosessen kan bidra til å unngå flere av de oppståtte problemene. Bygningens energibruk i det første driftsåret viser at bygget bruker 8 % mer energi enn beregnet. Når det gjelder inneklima er det temperaturforholdene som ofte ikke tilfredsstiller kravene [18].

Tabell 2. Plassering av FK-prosedyrene i byggets hovedfaser

Del 1 Ramme for et FK-prosjekt	Prosjektering	Bygging/ installasjon	Drift
Krav	Del 2 Ytelseskrav for FK i prosjekteringsfase	Del 3 Ytelseskrav for FK i byggefase	Del 4 Ytelseskrav for FK i driftsfase
Plan	Del 5 Plan for FK i prosjekteringsfase	Del 6 Plan for FK i byggefase	Del 7 Plan for FK i driftsfasen
Felles	Del 8 og 9 Ytelseskrav og funksjonsbeskrivelser		

6.5. Norske funksjonskontrollprosedyrer

De norske funksjonskontrollprosedyrene (FK-prosedyrene) for å forbedre bygningssystemer er utviklet basert på internasjonale funksjonskontrollerfaringer og nasjonale praktiske erfaringer. Prosedyrene er manuelle og består av ni deler. Disse er tilgjengelige på norsk. Målet med prosedyrene er å skape et godt informasjonssystem mellom alle aktørene i løpet av bygningens levetid. Prosedyrene introduserer en ny rolle funksjonskontrollansvarlig eller **FK-ansvarlig**. FK-ansvarlig har ansvar for at de kravene som eieren stiller blir realisert i prosjektet og at kravene systematisk følges gjennom hele bygningens levetid. En FK-ansvarlig bør tilby de samme tjenestene som en *“Cx authority”* i ASHRAE Guideline 0-2005 [1]. Tilsvarende viser den norske standarden *“NS 3935, Integrerte tekniske bygningssystemer (ITB) - Prosjektering, utførelse og idriftsettelse”* et behov for en ITB-ansvarlig person [19]. Disse prosedyrene er skrevet for et generelt prosjekt og må tilpasses behovene i de konkrete prosjektene. Tabell 2 viser alle ni delene plassert i bygningens livsløp som består av prosjektering, bygging og drift.

Basert på kravene fra byggherre utarbeides en plan for FK-arbeidet som beskrevet i del 1. I tabell 2 er del 1 plassert øverst i venstre hjørne, og er et rammeverk for aktiviteter i de andre delene. Del 2 og 5 matcher hverandre, der kravet (del 2) møtes med en plan (del 5) som skal vise hvordan kravet skal oppfylles. Tilsvarende par for de andre fasene er også del 3 og 6, og del 4 og 7. For eksempel, ut fra gjeldende forskrifter og byggherrens krav, utarbeides en liste over krav for prosjekteringsfasen etter del 2. Den som da får prosjekteringsjobben må utarbeide en plan etter del 5 som detaljert viser hvordan dette skal gjøres slik at en oppfyller kravene. Sammen med kontrollen i prosjekteringsfasen (del 2 og 5), vil det utarbeides en liste over nødvendige ytelseskrav i henhold til del 8. Ifølge del 9, bør **ytelsesbeskrivelsen** utarbeides tidlig i prosjekteringsfasen og det innebærer egentlig **oppfølging av ytelsen** som er definert i del 8. Del 8 og 9 kan lages som ett dokument, men oppdelingen klargjør

forskjellen mellom krav til ytelse og oppnådd ytelse i drift. Som vist i tabell 2, er den nødvendige informasjon for del 8 og 9 felles for hele bygningens livsløp.

Hvordan samle data for FK-prosedyrer?

De nødvendige data som trengs for FK-prosedyrer kan samles på flere forskjellige måter. I dette tilfellet beskriver rammeverket bygningstyelsen som en datamodell. Ideen om å samle bygningssinformasjon som en datamodell kom fra: “NS 3451, Bygningsdelstabellen” [20] og “NS 3455, Bygningsfunksjonstabellen” [21]. Figur 10 viser et eksempel på et generisk rammeverk på bygningers ytelse. Et bygningselement kan bestå av flere underelementer, som kan defineres av funksjoner. En funksjon av et bygningselement kan være en ytelsesparameter. For eksempel kan et bygningselement være et ventilasjonsaggregat som består av komponenter som vifte, filter, varme- og kjølebatteri. Videre kan viftefunksjonene være luftmengde, trykkdifferanse, motoreffekt og SFP (specific fan power). Antall funksjoner for en komponent avhenger av hvilken data som er nødvendig for å vurdere ytelsen.

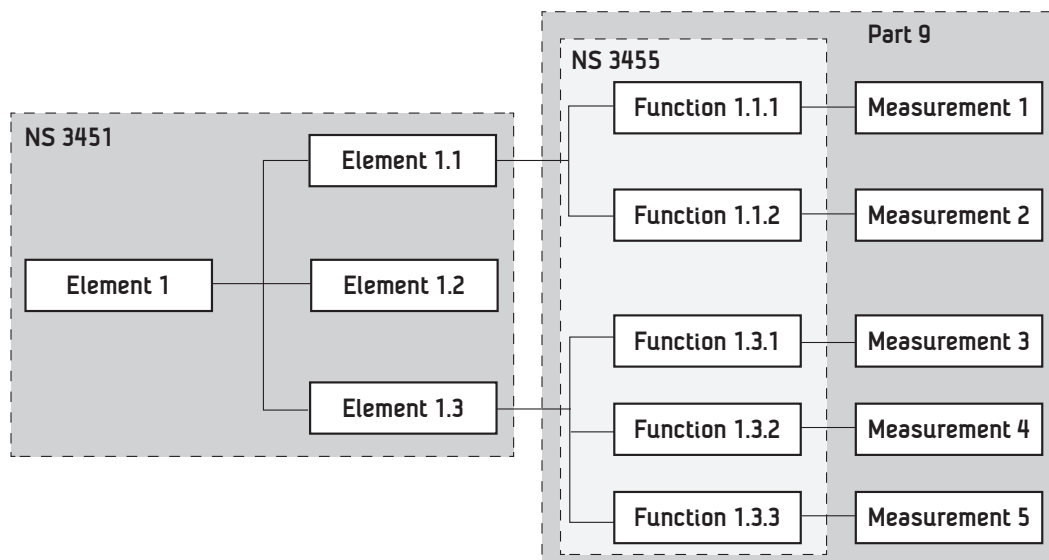
Som vist i figur 10, bør bygningsdelene defineres i henhold til NS 3451, mens ytelsene relateres til NS 3455. På den måten får en beskrevet ytelsene i FK-prosedyrer, del 9 - funksjonsbeskrivelser i tabell 2. For å følge

opp utvalgte funksjoner, er det nødvendig å definere måling av funksjonen som vist i figur 10. Derfor bør ytelsesmålinger defineres så snart som en enkel ytelse er en del av et bygningsprosjekt.

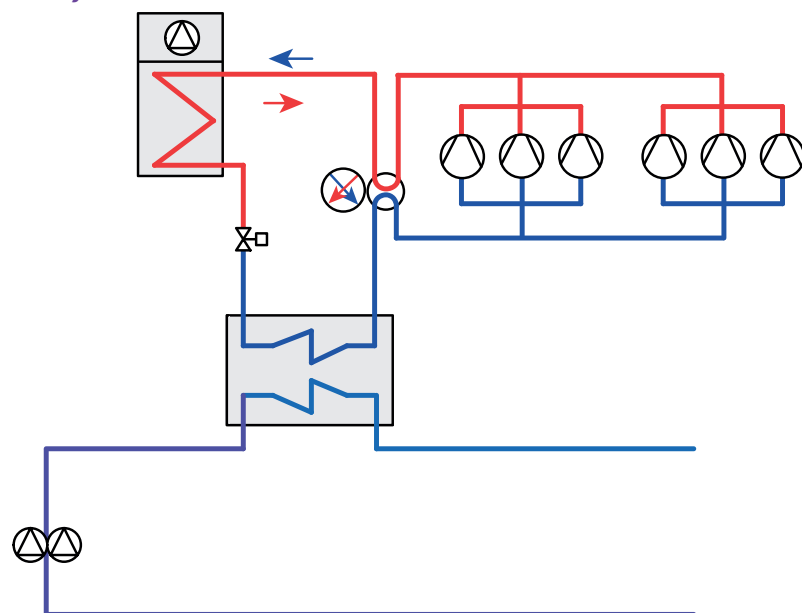
6.6. Datafusjon for estimering av varmepumpeytelse

Energianalysene av eksempelbygninger initierte en ide om å utvikle et verktøy for avansert estimering av varmepumpeytelse. Eksempelbygningene er mer beskrevet i kapittel *Bygningsdokumentasjon for riktig vedlikehold*. **Datafusjon** betyr at data fra ulike informasjonskilder er kombinert for å oppnå bedre resulterende informasjon. Ved å måle varmepumpeytelsen, kompressoreffekten og kondensatorvarmen, ble det funnet ut at kompressoreffekten var flere ganger høyere enn kondensatorvarmen. Teoretisk skal dette forholdet være motsatt. Da kom ideen om å gå litt i dybden for å sjekke hva årsaken kan være og en avansert metodikk for estimering av varmepumpeytelser er utviklet. Verktøyet er utviklet i samarbeid med Polytechnic University of Hong Kong. Metoden og behovet for en slik metode forklares nærmere. For å utvikle metoden er det nødvendig å ha tilgjengelig dokumentasjon over anlegget og mulighetene for god og detaljert datalogging. Metoden er brukt på de to eksempelbygningene, hvor begge hadde SD-anlegg med gode data tilgjengelig.

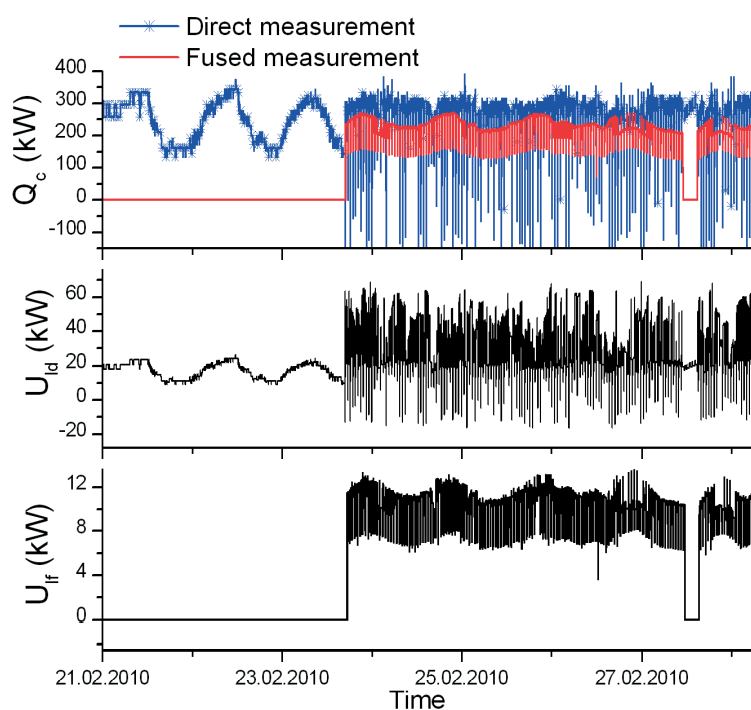
Figur 10. Rammeverk for innhenting av byggets ytelser



Figur 11. Det første varmepumpesystemet som er analysert ved bruk av datafusjon metoden



Figur 12. Direkte- og data fusjonsmålinger av kondensatorvarme



Hvordan fungerer denne metoden?

En modellbasert tilnærming kombineres med datafusjons teknikken for tilsammen å beregne varmepumpeytelsen. Denne teknikken smelter sammen direkte og indirekte målinger av kompressoreffekt og kondensatorbelastning. Modellene for kompressoreffekt og kondensatorbelastning henter inndata fra SD-anlegget for å beregne varmepumpeytelsen. De **direkte målingene** blir innhentet ved hjelp av temperatur- og trykk-målinger, mens de **indirekte målingene** blir beregnet ved hjelp av det elektriske signalet på varmepumpens delbelastning. Resultatene viser et stort behov for bruk av ulike datakilder for å finne reelle energiytelser. Videre viser analysen at indirekte og fusjonsmålinger var mer pålitelig enn bare direkte måling, særlig var det tydelig for kondensatorbelastningen. Opererer kondensatoren med lav temperaturforskjell kan det være utfordrende å måle kondensatorbelastning. Så brukes bare direkte målinger kan man få et høyere energiforbruk enn det virkelige forbruket er. Analysen av fusjonsmålinger på varmepumpeytelsen viser at en slik avansert måling kunne forbedre verifikasjon av varmepumpeytelse [22].

Figur 11 viser det første varmepumpesystemet som er analysert ved bruk av datafusjon metoden. Varmepumpen er koblet til ventilasjonssystemet og har to parallelle kompressorkretser. Den har to driftsmoduser varmepumpe om vinteren og kjøling om sommer.

Figur 12 viser eksempel på beregning av varmepumpens ytelse ut fra målinger. Estimaten av **kondensatorvarme** ved hjelp av direkte og datafusjon metoden sammen med tilsvarende usikkerhet er presentert i figur 12. På grunn av feil på temperatursensorer, kan verdiene fra den direkte målingen (blå linje) være feil. Siden **usikkerheten** av fusjonsmålingen, den første fra bunnen i figur 12, er lavere enn usikkerheten av den direkte målingen, er det fusjonsmålingen mer pålitelig for videre estimering og beslutningstaking.

Er denne metoden **kostnadseffektiv**?

Er det rimelig å utføre en slik analyse?

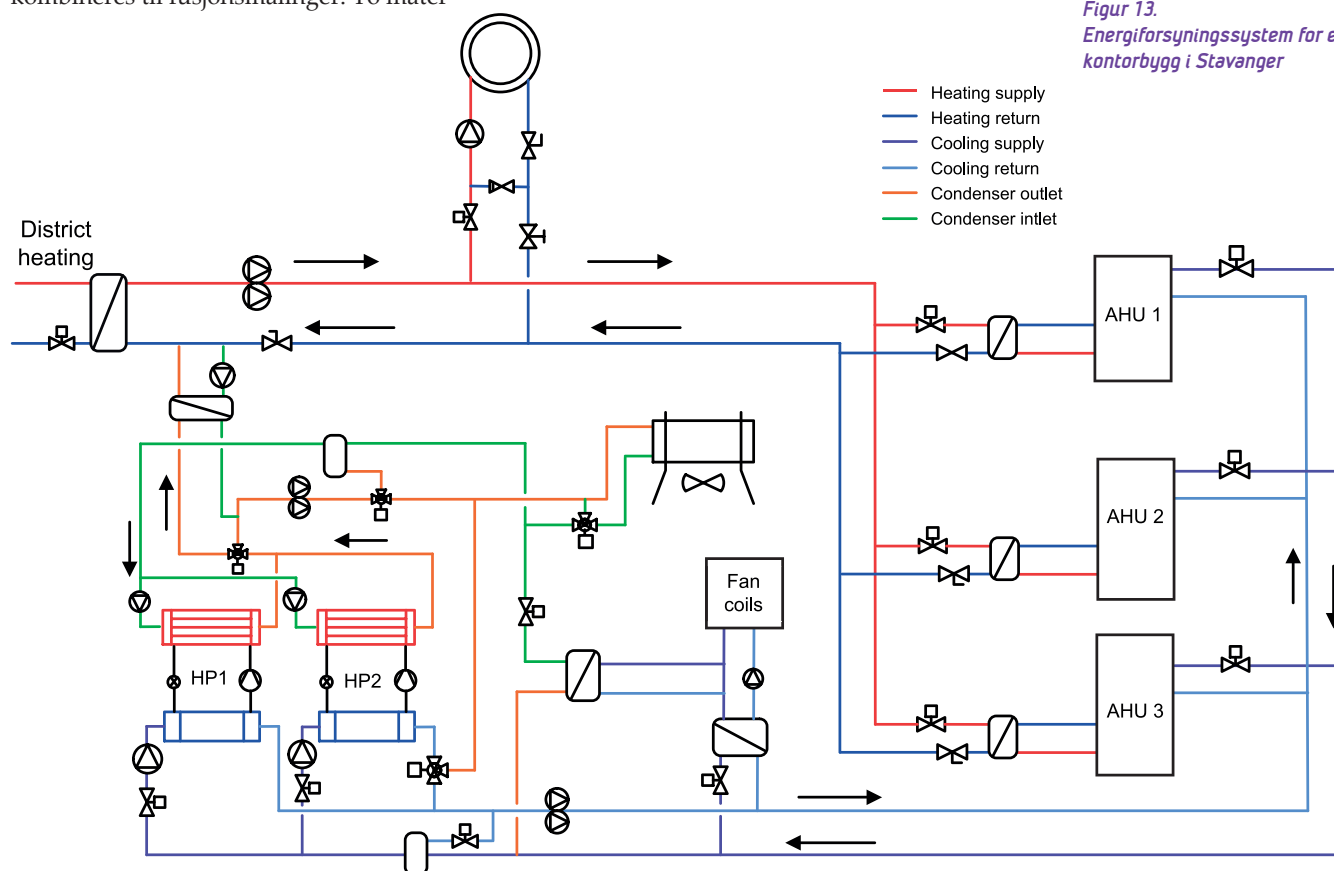
Ved å bruke et eksempel fra den andre eksempelbygningen, vil kostnadseffektivitet og behovet for bedre målinger bli understreket. Figur 13 viser systemskjemaet for en undersentral i eksempelbygningen i Stavanger. I denne undersentralen er kondensatorvarmen fra varmepumper brukt til å supplere romoppvarming og ventilasjons varmebehov. Varmepumpene i figur 13 er samtidig kjøleanlegg som anvendes for kjøling av IT-rommene. Anlegget i figur 13 kan skape **avtrekksluft varmegjenvinning** på to måter: direkte i ventilasjonsaggregatet og ved hjelp av varmepumper.

Målet med analysen av energiforsynings-systemet i figur 13 var å vise behovet for **ytelsesdokumentasjon**, overvåking og **data integrasjon** under levetiden til et energisystem for å oppnå riktige beslutninger. I den avanserte målingen kombinerer en data fra prosjektering, leverandør, og driftsdata fra SD-anlegget. Direkte og indirekte målinger kombineres til fusjonsmålinger. To måter

for varmegjenvinning av avtrekksluften er vurdert, direkte i ventilasjonsaggregatet og ved hjelp av varmepumper. Resultatene viste at avanserte målinger er kostnadseffektive og svært pålitelige i beslutningsprosesser. Figur 14 viser et eksempel på at direkte målinger kan være upålitelige. Her ser en at kondensatorbelastningen er negativ, noe som er umulig. Derfor kan bruk av denne fusjonsmålingen være mer pålitelig for beslutningstaking som vist i figur 15 [23].

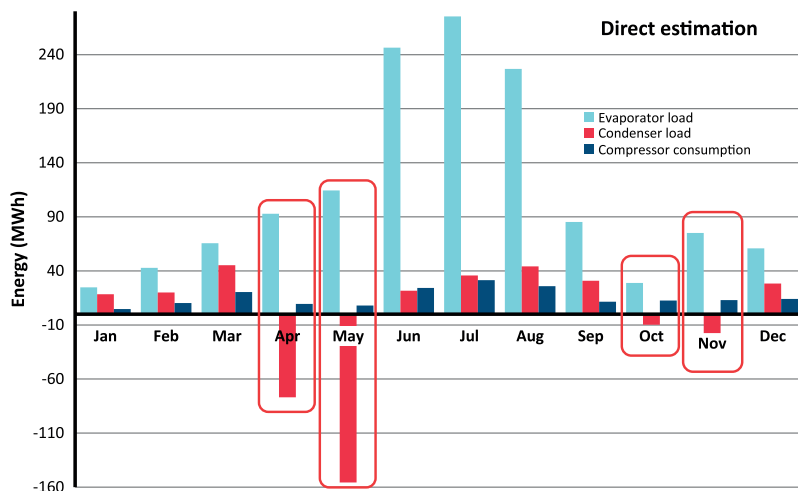
Figur 15 viser energisparing for ulike estimeringsmetoder. X-aksen viser kostnadsforholdet mellom fjernvarme og elektrisitet. Figur 15 viser hvordan lønnsomheten endres med kostnadsforholdet. Ved å sammenligne forskjellige estimeringsmetoder, er det mulig å identifisere fordelene av riktig estimering. Egentlig er den økonomiske gevinsten av fusjonsestimeringen en korrekt kjennskap til de reelle besparelsene. Eller en kan si at fusjonsestimeringen gir en god pekepinn på den reelle energisparingen. Å basere vurderingene på feilaktige målinger, kan føre til valg basert på feil grunnlag [23].

.. en slik avansert måling kunne forbedre verifikasjon av varmepumpeytelse ..

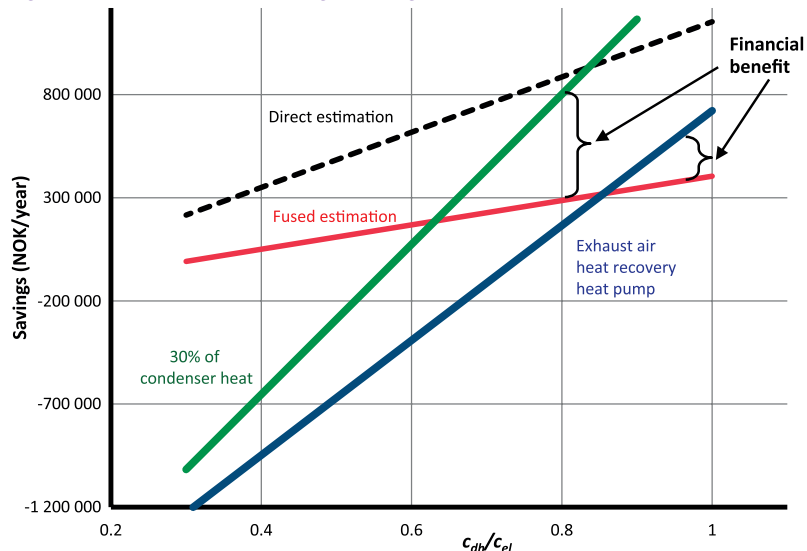


Figur 13. Energiforsyningssystem for et kontorbygg i Stavanger

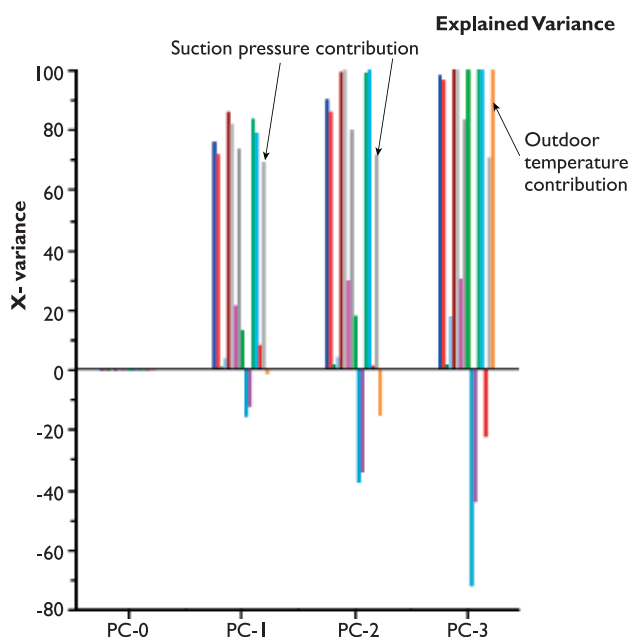
Figur 14. Eksempel på at direkte målinger kan gi feil resultater for varmepumpe



Figur 15. Kostnadseffektivitet av fusjonsmålinger



Figur 16. Variabler som påvirker varmepumpe-ytelsen



6.7. Avansert analyse av måledata for effektiv drift av moderne bygninger

François Leboeuf, utvekslingsstudent fra Universitetet i Grenoble, Frankrike, tok både prosjektoppgave og masteroppgave innen dette forskningsprosjektet. Målet med arbeidet hans var **avansert analyse av måledata**. En av målsetningene med hans prosjekt var å bygge strategier for å oppdage sensorfeil i et varmepumpesystem. De mest interessante resultatene fra Francois sin prosjektoppgave er kort introdusert her. I prosjektoppgaven ble varmepumpen fra figur 11 analysert.

Hvorfor trengs avanserte analysemetoder for drift av et bygg?

Når en driftsoperatør ser i SD-anlegget er det mye data som kan analyseres, for eksempel: trykk, temperatur, kontrollsignaler, osv. For et komplisert anlegg som en varmepumpe, kan det være vanskelig å vurdere hva som skal gjøres. I denne studien brukes en statistisk metode som heter **principal component analysis (PCA)** for å oppdage sensorfeil i et varmepumpesystem. En kan bruke PCA-metoden når en har et stort antall prediktorvariabler, som er avhengig av hverandre, det vil si høy korrelasjon eller er kollinearitet. For eksempel, ytelsen av varmepumpen er definert av kompressorens sugetrykk, utløpstrykk, fordamp- og kondensatortemperaturer, osv. I tillegg kan disse størrelsene være avhengig av hverandre. I dette komplekse problemet kan PCA-metoden hjelpe ved å etablere en felles variabel som kan vise uoverensstemmelser i systemet. Denne metoden er ganske robust og brukes mye i oljeindustrien. PCA-metoden har også blitt brukt for feilidentifikasjon av sensorfeil i klimasystemer [3]. Før en bruker metoden må en se på egenskapene og tilhørende fysiske parametere for varmepumpen. For å få en riktig analyse av komponentfeil er det svært viktig å identifisere sensorfeil [24].

Ved å bruke PCA-metoden for å analysere varmepumpen, er det mulig å identifisere de viktige innflytelsesrike variablene. Figur 16 viser betydningen av de ulike variablene. Variablenes viktighet måles ved størrelsen av deres bidrag til principal components (PC).

Figur 16 viser at sugetrykket og utetemperaturen er viktige variabler for varmepumpens ytelse. Dette innebærer at et stort avvik for disse variablene er nødvendig for å avdekke sensorfeil her. På den annen side, en liten sensorfeil i kondensatortemperaturen kan lett oppdages, fordi den gir mindre bidraget til PC. Resultatene fra Figur 16 viser at tillatte feil nivåer ikke er den samme for forskjellige sensorer [24].

PCA-metoden er effektiv for å identifisere sensorfeil. For å bevise dette er det påført sensorfeil i temperaturmålingene. Figur 17 viser X-residualet når et avvik på 20 % er påført til temperatursensoren. X-residualet har en høy verdi når temperatursensoren har avvik på 20 %, se midt på figur 17. Resultatene her viser at det er mulig å oppdage sensorfeil og avdekke hvilken sensor det gjelder [24].

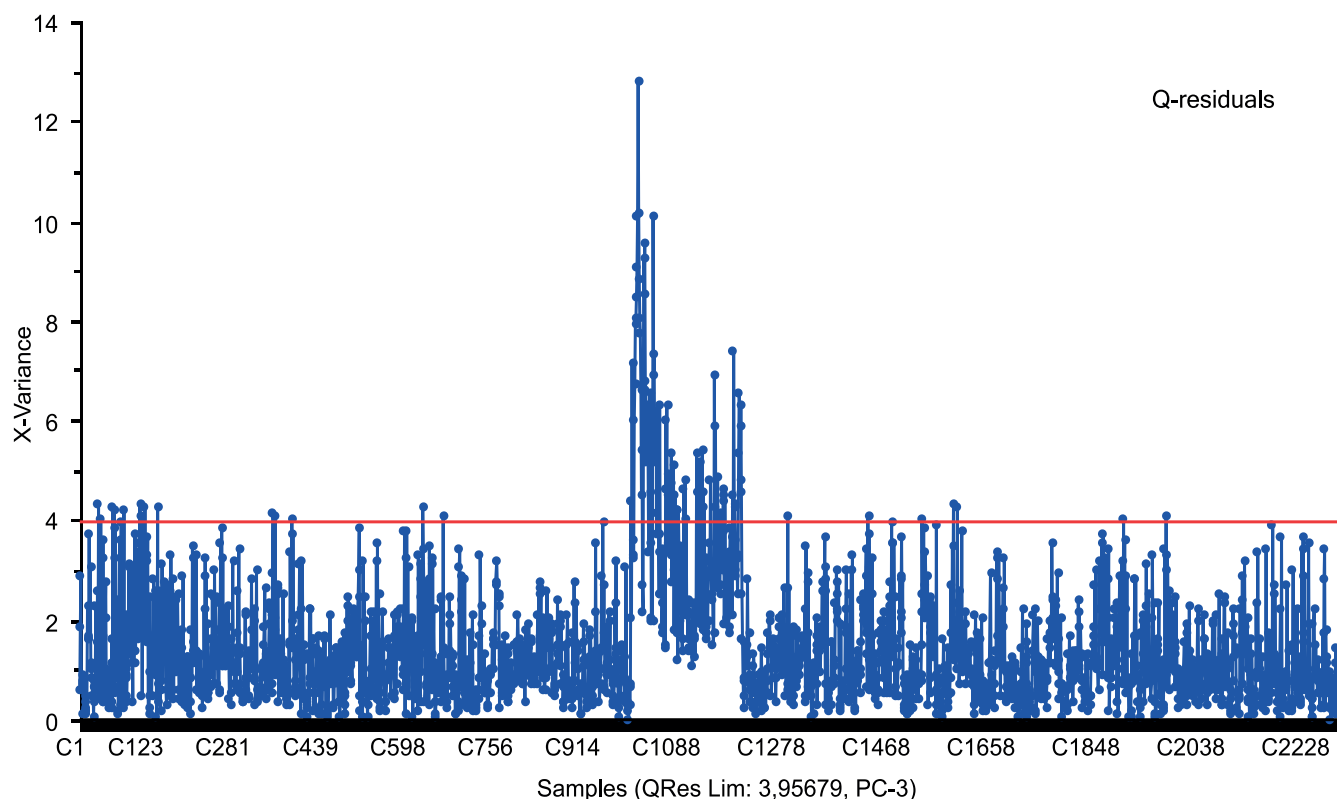
6.8. Bygningsdokumentasjon for riktig vedlikehold

De norske FK-prosedyrene, som forklart i kapittel 6.5, ble testet på to kontorbygg i Stavanger og Trondheim. Målet med dette arbeidet var å finne ut hvordan prosedyrene fungerer i dagens praksis. I tillegg var tanken å bevise nytten av tilegnet kunnskap ved å samle bygningsinformasjon for FK-prosedyrene. Medlemmene i prosjektet, Statoil og GK Norge AS, foreslo sine prosjekter som eksempelbygninger. De to eksempelbygningene leies ut som kontorbygg. Bygningene og de viktigste funnene er kort forklart i den videre teksten.

Den første eksempelbygningen med 19 623 m² oppvarmet areal, vist i figur 18, ligger i Stavanger, hvor dimensjonerende utetemperaturen er -9 °C, mens den gjennomsnittlige årlige utetemperaturen er 7,5 °C. Bygningen er prosjektert for 1 200 brukere og har vært i bruk siden juni 2008. Vår forskning på bygningen i Stavanger startet etter at bygningen var tatt i bruk.

I denne studien brukes en statistisk metode som heter principal component analysis (PCA) for å oppdage sensorfeil i et varmepumpesystem.

Figur 17. 20% feilmåling for temperatursensorer



Totalt overvåkes rundt 20 % av alle de definerte bygningsytelser gjennom SD-anlegg.

Den andre eksempelbygningen bygningen med 16 200 m² oppvarmet område, vist i figur 19, ligger i Trondheim, hvor dimensjonerende utetemperaturen er -19 °C, mens den gjennomsnittlige årlige utetemperaturen er 6 °C. Denne bygningen har vært i bruk siden september 2009, og antall brukere har vært økende siden da [25]. Vår forskning og datainnsamling knyttet til kontorbygget i Trondheim startet før byggefasen. Ventilasjonssystemets konsept er annerledes i disse bygningene, mens energiforsyningssystemer er liknende. I den første eksempelbygningen består ventilasjonssystem av tre VAV-systemer, hvor maksimal luftmengde er 90 000 m³/h for to ventilasjonsanlegg

Figur 18. Kontorbygg i Stavanger



Figur 19. Kontorbygg i Trondheim



og 75 000 m³/h for det tredje systemet.

I den andre eksempelbygningen består ventilasjonssystem av åtte VAV-systemer, med maksimal luftvolum fra 12 500 m³/h til 22 000 m³/h. Begge eksempelbygningene er varmet opp med radiatorer, mens kjøling er levert med fan-coils. Varmeenergi for ventilasjon, oppvarming og varmtvann kommer fra fjernvarme og varmepumper. Kjøleenergi leveres av to kjøleanlegg. Varmen avgitt fra kjøleanleggets kondensatorer brukes for å supplere oppvarmingen. På den måten er kjøleenhetene samtidig varmepumper. Den eneste forskjellen mellom varmforsynings-løsningene i disse bygningene er at i den andre eksempelbygningen anvendes ett kjøleanlegg bare for ventilasjonssystemer, mens det andre kjøleanlegget brukes for fan-coils. I den første eksempelbygningen anvendes to kjøleanlegg som jobber integrert [25]. Energiforsyningssystemet i den første eksempelbygningen er forklart i den andre delen av kapittel 6.6. En av varmepumpene i den andre eksempelbygningen er vist og analysert i kapitlene 6.6 og 6.7.

Ved å bruke FK-prosedyrene ble flere felles **funn** oppdaget i de to eksempelbygningene. Disse funnene kan forklares som mangel på dokumentasjon, system-overdimensjonering grunnet mangel på informasjon, dårlig funksjonsbeskrivelse, og dårlig funksjonsintegrering. Den **dårlige funksjonsintegreringen** betyr at temperatursensorene i ventilasjonssystemet var knyttet til feil temperaturmålepunkter. Videre er det funnet ut at ventilasjonssystemene er godt dokumentert og tilfredsstilte kravene i begge bygningene. På den annen side er det mangel på dokumentasjon knyttet til vannbårne systemer som for eksempel varmtvannssystem, vannbårenvarmesystem, fan-coils og kjølesystemer. Derfor kunne energianalyse, inspeksjon og testing av disse systemene være vanskelig. Totalt overvåkes rundt 20 % av alle de definerte bygningsytelser gjennom SD-anlegg [25].

De viktigste funnene i den første eksempelbygningen i Stavanger, figur 18, er følgende:

- De installerte viftene i ventilasjonsanlegget tilfredsstiller kravene
- Strømforbruk tar den største andelen i det totale bygningsenergi bruk, rundt 70 – 80%. Samtidig, varierer ikke strømforbruk så mye over året
- I prosjekteringsfase var ideen at energiforsyning skulle baseres på avtrekksluft varmegjenvinning med varmepumpe. På denne måten kunne varmepumpeanlegget dekke hele varmeenergiebehovet i bygningen. Likevel ble ventilasjonsanlegget installert med varmegjenvinner fra avtrekksluften. Denne endringen fra prosjekteringsideen forårsaket noen problemer i driften av anlegget. Varmepumpeanlegget er overdimensjonert og derfor er en av de installerte varmepumpene slått av mesteparten av tiden. Tilleggsvarmevekslere og tilhørende kontrollventiler for ventilasjonsanlegget er overdimensjonert. Derfor er både deres ventilposisjoner og driftstid lav, som er dårlig for deres drift. Hele analysen er forklart i [23, 26].

De viktigste funnene i den andre eksempelbygningen i Trondheim, figur 19, er følgende:

- De installerte ventilasjonsanleggene oppfylte kravene i prosjekterings-, overtakelses og driftsfasene
- Den optimale strategien for viftestyring i VAV-systemet forårsaket at strømforbruk for vifter er lav i forhold til det totale strømforbruket
- Ved å anvende datafusjon metoden som er forklart i kapittel 6.6 og PCA-metoden forklart i kapittel 6.7, ble flere feil knyttet til varmepumpen i figur 11 identifisert. Disse feilene er: dårlig energiovervåking av varmepumpen og unormale trykkmålinger

- Et kjøleanlegg ble prosjektert med kjølebehovet på 60 - 200 kW og kjøleanlegget med R-410A som arbeidsmedium ble installert. Utnyttelse av kondensatorvarmen fra dette kjøleanlegget kunne dekke 23 - 70% av det totale bygningensvarmebehovet. Likevel, i det første driftsåret, grunnet lav fordamperbelastning og at R-410A ikke var ment å operere under høye kondensatorstemperaturer, var det ikke mulig å oppnå nyttig kondensatorvarme
- Bygningen er utstyrt med 74 energimålere, der 66 målere er for strøm og åtte målere er for oppvarming og kjøling. Den største feilen i energimålingen var på grunn av tapte data, rundt 20 % i det første driftsåret. Selv om måledata ble reparert ved hjelp av nervesystemets (neural network) metode, var det fortsatt en feil på 8 – 24 % i forhold til energimåling av energileverandørselskap. Undermålere for vannbårensystemet hadde mest feil.
- Det totale strømforbruket økte ikke så mye, selv om antallet brukere økt 172 - 299 i løpet av 2010 [27].

En generell konklusjon fra begge eksempelbygningene er at godt dokumenterte systemer fungerer bra, mens systemer med **manglende dokumentasjon** fungerer dårligere. Dette kan styrke vår prosjektide om at detaljert dokumentasjon og god oppfølging er avgjørende for en riktig god anleggsdrift. Selv om mangel på dokumentasjon har blitt rapportert i disse to eksempelbygningene, er mengde av informasjon samlet i PFK-prosjektet fortsatt høy i forhold til dagens praksis. Grunnen til dette var bevisste og ivrige prosjektsmedlemmer.

Den største feilen i energimålingen var på grunn av tapte data ..

.. godt dokumenterte systemer fungerer bra, mens systemer med manglende dokumentasjon fungerer dårligere.

Erfaring fra liknende prosjekter kan være av stor betydning for om et nytt prosjekt blir suksess eller ikke.

6.9. PFK-web

Byggeprosjekter er svært ofte karakterisert av ekstrem kompleksitet og variasjon, samt ikke-standardisert produksjon. Hvert prosjekt er designet og utført for å tilfredsstille det ene prosjektets behov. Av nettopp denne grunn er utnyttelse av tidligere **erfaring** svært viktig i byggeprosjekter. Erfaring fra liknende prosjekter kan være av stor betydning for om et nytt prosjekt blir suksess eller ikke. Erfaringsoverføring bidrar betydelig til å oppnå delmål som kostnader, tidsplan, kvalitet og sikkerhet. Erfaringsoverføring bidrar også til at man ikke finner opp hjulet på nytt. For å sørge for bedre erfarings- og informasjonsoverføring og automatisering i kvalitetssikring av bygningsprosessen, utviklet vi et verktøy som kan hjelpe til det. Verktøyet er basert på de norske FK-prosedyrene som er forklart i kapittel 6.5. Verktøyet har fått navn PFK-web [28] som er hentet fra prosjektittelen.

PFK-web er en database for dokumentering og kvalitetssikring av bygninger, utviklet av Norconsult, tidligere ProTechnology i samarbeid med NTNU/SINTEF Energi. Databasen har til hensikt å bidra til å gjøre funksjonskontroll lettere i praksis. PFK-web er et databasebasert verktøy programmert i Structured Query Language (SQL), et programmeringsspråk designet for å organisere data i en relasjonsdatabase. PFK-web har et web-basert brukergrensesnitt, som gjør det mulig å arbeide med verktøyet fra flere maskiner og ulike lokasjoner samtidig.

Verktøyet skal kunne brukes både ved planlegging, utføring og vedlikehold av bygg. PFK-web har veiledning for gjennomføring av ulike sjekkpunkter i et løpende prosjekt. Dette er en fordel i forhold til tradisjonelle manuelle sjekklister, der samme liste brukes i flere ulike prosjekter uten at alle punkter er relevante. PFK-web kan ha flere ulike brukere, og hver bruker er tildelt en rolle med tilhørende muligheter og begrensninger i programmet. Dette kan for eksempel være en utførende aktør, funksjonskontrollør, prosjekteier, eller kun lesetilgang.

Hvordan PFK-web fungerer?

En registrert bruker oppretter selve prosjektet med tilhørende prosjektinformasjon som han

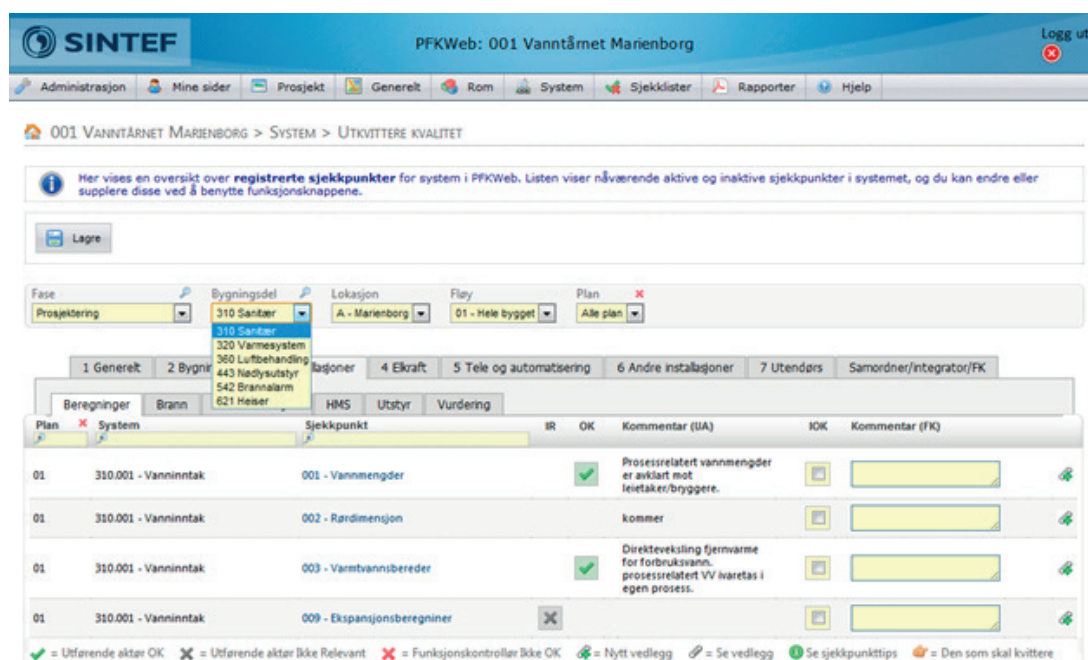
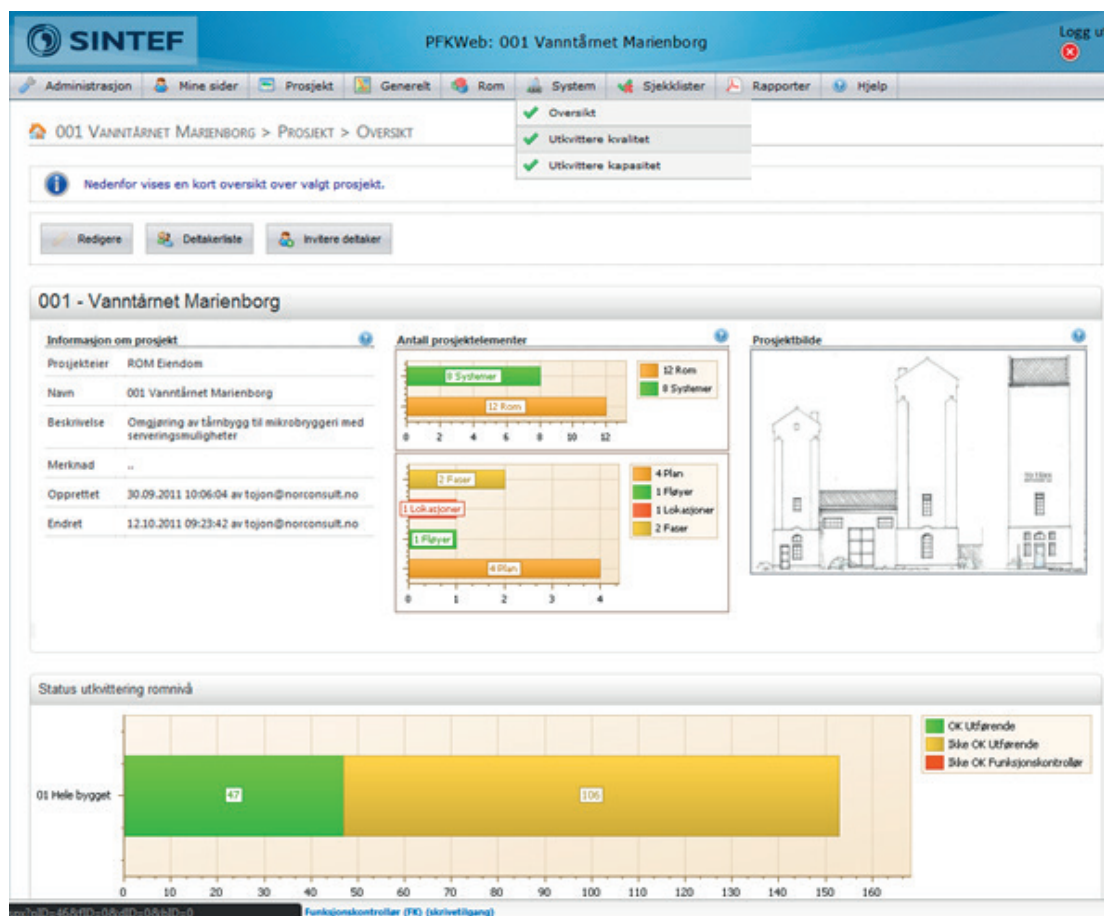
ønsker å arbeide med. Startsidene til PFK-web er vist i figur 20. Under opprettelsen av et prosjekt vil et sett med faser kunne velges. Dette kan eksempelvis være tidligfase, skissefase, detaljfase, byggefase, driftsfase osv. Disse fasene har alle et sett med standardinformasjon som for eksempel romtyper, systemtyper, sjekklister, osv. Når prosjektet er ferdig opprettet vil brukeren få tilgang til ytterligere informasjon. PFK-web tilbyr muligheter for å registrere nye **sjekkpunkter**. Sjekkpunktene knyttes til **sjekklister** knyttet opp mot tre ulike nivå: 1. Fasesjekkpunkter, 2. Romtypesjekkpunkter og 3. Systemtypesjekkpunkter

Eksempler på sjekkpunkter under generelt kan være U-verdier i vegger, eller om dørene i bygget er tilrettelagt for bevegelseshemmede. Sjekkpunkt til rom kan være om våtrom har helning til sluk, eller om vannlås er korrekt montert. Systemsjekkpunkter er derimot knyttet til de systemer som er i bygget, som for eksempel om luftinntaket til ventilasjonsanlegget er korrekt dimensjonert. Et system kan betjene flere rom, og er knyttet sammen tilsvarende i databasen. Rom og system har dessuten tilhørende attributter, som igjen er knyttet til de ulike fasene i prosjektet. Romattributter er antall kvadratmeter størrelse, dimensjonerende personbelastning og lignende. Systemattributter kan være hvor stor luftmengde ventilasjonssystemet skal kunne levere, eller installert effekt i oppvarmingssystemet.

Utkvitterte prosjektsjekkpunktene er godt synlig på PFK-web sin oppstartside, som vist i figur 20. Her er det ikke like lett å finne de utførte prosjektsjekkpunktene. Derfor må en flytte videre i databasen som vist i figur 21. Punktene er sortert på både fase, bygningsdel, lokasjon, fløy, plan, de ulike kontrollgruppene og undergrupper. Alle sjekkpunktene skal i utgangspunktet kunne kvitteres ut av alle aktører. Historikk og "sporing" av endringer blir registrert slik man til enhver tid har oversikt over hvem som kvitterer ut og når. Alle sjekkpunkter vil også få en kolonne som kun rollen Funksjonskontrollør (FK) har tilgang til. Alle "uenigheter" dvs. de punkter FK har kvittert "Ikke OK" kan man enkelt ta ut i rapport.

PFK-web er en database for dokumentering og kvalitetssikring av bygninger ..

Figur 20. Startside PFK-web



Figur 21. Sjekkliste

7. Nødvendigheten og viktigheten av kontinuerlig funksjonskontroll for norsk bygningsindustri

Det var mangel på kunnskap om oppfølging og koordinering i byggeprosessen ..

Deltakelsen i PFK-prosjektet har vært lærerikt.

Refleksjoner over deltakelsen i PFK-prosjektet fra en av deltakerne, Terje Åsberg - Statsbygg (tidligere avdelingsdirektør i Eiendomsavdelingen i Statsbygg).

Hvorfor kom jeg med i prosjektet?

Som ung forsker på Byggforsk, tidligere Norges byggforskningsinstitutt, erfarte jeg tidlig at det var store og vesentlige mangler ved overtakelse av nybygg. I samarbeid med alle nordiske byggforskningsinstitutter utarbeidet og utprøvde vi metoder og rutiner (planlegging, prosjektering, bygging, montering, innregulering, mv.) for å bidra til at sluttresultatet ble best mulig. Det var også viktig at det ferdige bygget skulle kunne måles, kontrolleres og dokumenteres. Vi produserte mange fellesnordiske metoder og veiledninger. Blant annet var jeg også med å starte Norsk ventilasjonskontroll, som jeg ledet, men var også fagpersonen som var ute og kontrollerte ferdige installasjoner. Dette var en meget interessant og lærerik periode for en ung ingeniør.

Dette holdt jeg på med aktivt i 15 år fra 1970.

Jeg oppdaget i hovedsak følgende:

- Det var mangel på kunnskap om oppfølging og koordinering i byggeprosessen, spesielt var det uvitenhet om måling, kontroller og dokumentasjon i sluttfasen av byggeprosjektene. Aktørene/deltakerne fra bransjen klarte ikke å se helheten
- Det var stor uvilje i bransjen til å gjennomføre enhver form for kontroll; montasjekontroll, ytelseskontroll, funksjonskontroll, dokumentasjonskontroll, mv.
- Det fantes ingen systematisk gjennomgående metode eller verktøy

for kvalitetssikring, dvs. kvalitetsstyring og kvalitetskontroll i byggeprosjektet. Ingen metode kunne sikre at byggherrens ønsker og behov (i rom- og byggeprogram) ble fulgt opp, sikret og kontrollert i alle fasene og til slutt dokumentert at det som var bestilt ble levert.

Hvilken nytte jeg så i prosjektet?

Når NTNU og SINTEF forespurte om jeg ville delta i PFK boblet jeg over av iver etter å få bidra med mine erfaringer. Jeg hadde da også laget en kvalitetssikringshåndbok for byggeprosjekter i regi av Byggforsk, men finansiert av Norges forskningsråd. I tillegg hadde jeg 15 års erfaring fra byggherrevirksomhet og eiendomsforvaltning, bl.a. med etterkontroll av ferdige byggverk og erfaring fra drift av nye bygg. Jeg må vedgå at jeg fremdeles er skuffet over at vi ikke er kommet lenger enn vi var for mange, mange år siden! Det er fortsatt ingen eller lite gjennomgående funksjonskontroll og svært mangelfull dokumentasjon både fra innreguleringer, kontroller og leveransen, dvs. FDV-dokumentasjon.

Deltakelsen i PFK-prosjektet har vært lærerikt. Mange kunnskapsrike personer har deltatt. Prosjektet har i flere sammenhenger, eksempelvis gjennom foredrag og bransjetreff, vært med på å fokusere på behovet og nødvendigheten av å ha et gjennomgående kvalitetssikringssystem for byggeprosjekter. Kvalitetskontroll eller funksjonskontroll må gjennomføres i alle faser. Metoden med veiledninger, skjemaer, mv. som PFK-prosjektet har laget for alle fasene i byggeprosessen, er en meget god veileder eller lærebok» for studenter, prosjektledere og hele bransjen. I enhver byggeprosjektprosess må det brukes et digitalt registerings- og oppfølgingssystem slik at man lett kan lagre og hente nødvendige informasjonen.

Nytteverdien av PFK-prosjektet er at

- Det finnes en gjennomgående systematisk metode som viser hvordan kvalitetssikring skal beskrives og gjennomføres i byggeprosjektene. Dette er viktig for alle aktørene, spesielt for prosjektlederne
- Det finnes råd om hvilke ulike faglige

vurderinger som må gjøres i alle fasene. Dette er spesielt viktig for de teknisk faglige aktørene i prosjektene

- Det finnes en oppskrift for hvordan sluttkontroller skal utføres for å dokumentere at sluttproduktet (byggverket og installasjonene) er i henhold til opprinnelige behov og krav til ytelser og funksjoner. Dette er spesielt viktig for byggherren
- Det finnes en informasjonsbase som inneholder all nødvendig FDVU-dokumentasjon. Dette er nyttig for eiendomsforvalteren og spesielt for driftspersonalet.

Jeg mener at NTNU og SINTEF ved å sette fokus på kvalitetssikring/funksjonskontroll, har forstått hva som er hovedproblemet for byggevirksomheten i Norge. Det er altfor mange feil og mangler ved ferdigstillelsen som er svært kostbare å rette opp i ettertid. Dyktig medarbeidere fra nevnte institusjoner skal ha stor takk for det produktet som er levert. Jeg håper at temaet: Systematisk, gjennomgående kvalitetssikring og funksjonskontroll i byggeprosjekter, blir eget fag i opplæringen av både studenter og bransjen.

Kvalitetskontroll eller funksjonskontroll må gjennomføres i alle faser.

8. Vitenskapelige publikasjoner og tekniske rapporter

Publikasjonene er utgitt i løpet av dette prosjektet er listet nede.

Doktorgrads avhandlinger

1. N. Djuric, Real-time supervision of building HVAC system performance, 2008.
2. M. Masic, Using building energy monitoring to verify building energy performance, 2009.

Master- og prosjektoppgaver

1. A. Eide, Behovsstyring av energi- og klimaytelser - oppfølging i praksis, Prosjekt- og masteroppgave, 2009.
2. L. Dølaker, Næringsbygg i møte med morgendagens energikrav, Prosjekt- og masteroppgave, 2009.
3. F. Leboeuf, Avansert analyse av måledata for effektiv drift av moderne bygninger, Prosjekt- og masteroppgave, 2010.
4. J. Wall, "FK database" for bedre kvalitetssikring av moderne bygninger, Prosjekt- og masteroppgave, 2012

Journal artikler:

1. N. Djuric, V. Novakovic, F. Frydenlund, Electricity use in two low energy office buildings in Norway, REHVA European HVAC Journal. 2012; Volume 49 (1). S. 30-34.
2. N. Djuric, V. Novakovic, F. Frydenlund, Frode, Improved measurements for better decision on heat recovery solutions with heat pumps, International journal of refrigeration. 2012; Volume 35 (6). S. 1558-1569.
3. N. Djuric, V. Novakovic, G. Huang, Lifetime commissioning as a tool to achieve energy-efficient solutions, International journal of energy research, 2012; Volume 36 (9). S. 987-999.
4. N. Djuric, G. Huang, V. Novakovic, Data fusion heat pump performance estimation, Energy and Buildings, 2011; Volume 43 (2-3). S. 621-630.
5. N. Djuric, V. Novakovic, Correlation between standards and the lifetime commissioning, Energy and Buildings, 2010; Volume 42 (4). S. 510-521.
6. N. Djuric, V. Novakovic, Review of possibilities and necessities for building lifetime commissioning, Renewable & sustainable energy reviews, 2009, Volume 13 (2). S. 486-492.
7. N. Djuric, V. Novakovic, F. Frydenlund, Heating system performance estimation using optimization tool and BEMS data, Energy and Buildings. 2008; Volume 40 (8). S. 1367-1376.
8. N. Djuric, V. Novakovic, J. N. Holst, Z. Mitrovic, Optimization of energy consumption in buildings with hydronic heating systems considering thermal comfort by use of computer-based tools, Energy and Buildings. 2007; Volume 39 (4). S. 471-477.

Konferanse artikler:

1. N. Djuric, V. Novakovic, F. Frydenlund, B. Håndel, Lifetime Commissioning as a Tool for Improving Heat Recovery Using Heat Pumps, Proceedings of the 23rd International Congress of Refrigeration. International Institute of Refrigeration, Prague, Czech Republic, 2011.
2. N. Djuric, V. Novakovic, Lifetime Commissioning as a Tool to Achieve Efficient Building Operation, 41st International congress on Heating, refrigerating and air-conditioning, Belgrade, Serbia, 2010.
3. M. Lelovic, N. Djuric, V. Novakovic, B. Zivkovic, Assessment of Risk of Increased Energy Consumption due to climate change and change of building purpose, 41st International congress on Heating, refrigerating and air-conditioning, Belgrade, Serbia, 2010.
4. M. Masic, V. Novakovic, Tool for Modeling and Analysis of Building Heat Consumption, 41st International Congress on Heating, Refrigerating and Air-Conditioning, Belgrade, Serbia, 2010.
5. N. Djuric, V. Novakovic, F. Frydenlund, Test Results of Norwegian Lifetime Commissioning Procedures. 10th REHVA World Congress "Sustainable Energy Use in Buildings", Antalya, Turkey, 2010.
6. N. Djuric, V. Novakovic, Efficient Building Operation as a Tool to Achieve Zero Emission Building, Renewable Energy Research Conference 2010 - Zero Emission Buildings, Trondheim, Norway, 2010.
7. N. Djuric, V. Novakovic, FDD algorithm for an AHU reverse-return system. 8th International Conference for Enhanced Building Operation - ICEBO 2008, Berlin, Germany, 2008.
8. N. Djuric, V. Novakovic, F. Frydenlund, Existing building commissioning using computer based tools. The 9th REHVA World Congress - Clima 2007, Helsinki, Finland, 2007.
9. N. Djuric, F. Frydenlund, V. Novakovic, J. Holst, Preliminary Step in Collecting Data for Commissioning of Existing Buildings (Characterization of buildings, systems and problems), The 9th REHVA World Congress - Clima 2007, Helsinki, Finland, 2007.
10. V. Novakovic, A standard methodology for building energy consumption data investigation and description. The Sixth International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings - IAQVEC, Sendai, Japan, 2007.
11. N. Djuric, V. Novakovic, J. N. Holst, Optimizing the building envelope and HVAC system for an inpatient room by using simulation and optimization tools. The 5th International Conference on Cold Climate Heating, Ventilation and Air-Conditioning, Moscow, Russia, 2006.
12. V. Novakovic, N. Djuric, J. N. Holst, F. Frydenlund, Norwegian national program for lifetime commissioning and energy efficient operation of buildings. The 6th International Conference for Enhanced Building Operation - ICEBO 2006, Shenzhen, China 2006.
13. N. Djuric, V. Novakovic, J. N. Holst, Optimization of Energy Consumption in Building with Hydronic Heating System by use of Computer based tools. The 8th REHVA World Congress - Clima 2005, Lausanne, Switzerland, 2005.
14. V. Novakovic, J. N. Holst, T. Hoel, Lifetime commissioning for energy efficient operation of buildings - Norwegian approach. The 8th REHVA World Congress - Clima 2005, Lausanne, Switzerland, 2005.
15. V. Novakovic, J. N. Holst, The building envelope and HVAC system for an inpatient room using simulation and optimization tools. The 2005 World Sustainable Building Conference, Tokyo, Japan, 2005.
16. N. Djuric, V. Novakovic V., J. Holst, Optimization of the design for an inpatient room using simulation and optimization tools, Proceedings of 36th congress of Air - conditioning, Heating and Refrigeration - KGH (in Serbian), Belgrade, Serbia, 2005.

Tekniske rapporter:

1. N. Djuric, V. Novakovic, F. Frydenlund, Funksjonskontroll som verktøy, Norsk VVS, 2010.
2. N. Djuric, Lifetime commissioning report at Professor Brochs gate 2. Vol. TR A7098. 2011, SINTEF Energy.
3. N. Djuric, Lifetime commissioning report at Vassbotnen 23. Vol. TR A7094. 2011, SINTEF Energy.
4. T. Wigenstad, Lifetime commissioning - procedures for requirement specification - draft, AN 09.16.08, SINTEF Energy.

- [1] ASHRAE Guideline 0-2005: The Commissioning Process, 2005: The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, US. ISBN/ISSN: 1049-894X
- [2] P. Haves, D. Claridge, M. Lui, Report assessing the limitations of EnergyPlus and SEAP with options for overcoming those limitations, 2001, California Energy Commission Public Interest energy Research Program.
- [3] S. Wang, F. Xiao, AHU sensor fault diagnosis using principal component analysis method. *Energy and Buildings*, 2004. 36(2): p. 147-160.
- [4] J. Hyvärinen, S. Karki (Eds.), *Building Optimization and Fault Diagnosis Source Book*, 1996, IEA Annex 25, VTT, Finland.
- [5] ASHRAE Handbook CD, 2000-2003, ASHRAE.
- [6] H. Friedman, M.A. Piette, *Comparative Guide to Emerging Diagnostic Tools for Large Commercial HVAC Systems*, 2001, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.
- [7] T.I. Salsbury, R.C. Diamond. Model – Based Diagnostics for Air Handling Units. in *Diagnostics for Commercial Buildings: Research to Practice*. 1999. San Francisco.
- [8] IEA Energy conservation in Building and Community Systems. Available from: <http://www.ecbcs.org/>.
- [9] IEA - ECBCS Annex 47 Cost-effective Commissioning for Existing and Low Energy Buildings Available from: http://ctec-varennnes.nrcan.gc.ca/en/b/bi_ib/annex47/index.html#.
- [10] IEA - ECBCS Annex 53 - Total Energy Use in Buildings: Analysis and Evaluation Methods. Available from: <http://www.ecbcs.org/annexes/annex53.htm>.
- [11] C. Legris, N. Milesi Ferretti, D.E. Choinière, Commissioning overview, Annex 47 Report 1, 2010.
- [12] Natural Resources Canada, Canmet Energy Technology Center. [cited October 2012; Available from: <http://canmetenergy.nrcan.gc.ca/buildings-communities/energy-efficient%20buildings/optimization/1772>.
- [13] Continuous Commissioning. [cited October 2012; Available from: <http://esl.tamu.edu/continuous-commissioning>.
- [14] N. Djuric, Real-time supervision of building HVAC system performance. Doktorgrads avhandling, 2008, Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. p. 159 : ill., 978-82-471-9287-0
- [15] MATLAB, 2010, The MathWorks.
- [16] M. Masic, Using building energy monitoring to verify building energy performance, Doktorgrads avhandling, 2009, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet: Trondheim. p. X, 139, LXXXVIII s.
- [17] A. Eide, Demand control of energy and indoor environment performances - a case study, Institutt for energi- og prosesssteknikk 2009, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi: Trondheim.
- [18] L. Dalaker, An office building with a focus on upcoming energy requirements, Institutt for energi- og prosesssteknikk 2009, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi: Trondheim.
- [19] NS 3935, ITB, Integrated technical building installations, Designing, implementation and commissioning, S. Norway, Editor 2005.
- [20] NS 3451, Table of building elements, S. Norway, Editor 2009.
- [21] NS 3455, Table for building functions, S. Norway, Editor 1993.
- [22] N. Djuric, G. Huang, V. Novakovic, Data fusion heat pump performance estimation. *Energy and Buildings*. 43(2-3): p. 621-630.
- [23] N. Djuric, V. Novakovic, F. Frydenlund, Improved measurements for better decision on heat recovery solutions with heat pumps. *International Journal of Refrigeration*, 2012. 35(6): p. 1558-1569.
- [24] F. Leboeuf, Avansert analyse av måledata for effektiv drift av moderne bygninger, Institutt for energi- og prosesssteknikk 2010, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi: Trondheim.
- [25] N. Djuric, V. Novakovic, G. Huang, Lifetime commissioning as a tool to achieve energy-efficient solutions. *International Journal of Energy Research*, 2012. 36(9): p. 987-999.
- [26] N. Djuric, Lifetime commissioning report at Vassbotnen 23. Vol. TR A7094. 2011, Trondheim: SINTEF energi. 48, [43] bl. : ill., 978-82-594-3474-6
- [27] N. Djuric, Lifetime commissioning report at Professor Brochs gate 2. Vol. TR A7098. 2011, Trondheim: SINTEF energi. 49, [43] bl. : ill., 978-82-594-3476-0
- [28] J. Wall, 'FK database for bedre kvalitetssikring av moderne bygninger, Institutt for energi- og prosesssteknikk 2012, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi: Trondheim.

Denne boken er tiltenkt byggeiere, prosjektledere, prosjekterende, entreprenører, drifts- og service ansvarlige, automatikk leverandører og myndighetene. Boken tar for seg emner som har interesse for alle aktører som er fokusert på å utføre dokumentert og betydelig energisparing heller enn å bruke den intuitive metoden. Den er skrevet på en enkel og beskrivende måte for å kunne være til nytte for mange.

Bakgrunnen for boken er resultatene som ble oppnådd i det nasjonale prosjektet Program for kontinuerlig funksjonskontroll for effektiv drift av bygninger (PFK). Prosjektet har gått over åtte år, der de siste seks årene var støttet av Norges forskningsråd. Syv industripartnere har vært involvert i prosjektet gjennom åtte år.

Partnerne i prosjektet representerte byggeiere, entreprenører, statens organ for miljøvennlig omlegging av energibruk og energiproduksjon og rådgivende firma. Det setter vi stor pris og ønsker herved å takke for deres verdifulle bidrag.

I løpet av prosjektperioden, har vi bidratt i to internasjonale prosjekter under Det Internasjonale Energi Byrået (IEA), Gjennomføringsavtale om energiøkonomisering i bygninger og samfunnssystemer (ECBCS) Programme, Annex 47 og Annex 53. På den måten har den internasjonale ekspertisen og ideer blitt overført og tatt inn i det nasjonale prosjektet. I løpet av prosjektperioden har det blitt publisert to doktorgradsavhandlinger, tre masteroppgaver og mer enn 20 journaler og konferanseartikler.

