

Vegard Solberg

## Statisk UPS i strømtilførsel til CT

Vurdering av pålitelighet og reduksjon av kostnader

Masteroppgave i Energi og miljø

Veileder: Eilif Hugo Hansen

September 2022



Vegard Solberg

# **Statisk UPS i strømtilførsel til CT**

Vurdering av pålitelighet og reduksjon av kostnader

Masteroppgave i Energi og miljø  
Veileder: Eilif Hugo Hansen  
September 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for informasjonsteknologi og elektroteknikk  
Institutt for elkraftteknikk



Kunnskap for en bedre verden



# Sammendrag

I denne masteroppgaven blir størrelsen til en *uninterruptable power supply* (UPS) som har flere *computed tomography* (CT) skannere tilkoblet, vurdert ved hjelp av klassisk pålitelighetsanalyse. Formålet med dette er å redusere størrelsen, og dermed kostnadene, forbundet med anskaffelsen av UPSen, uten å forringe påliteligheten til strømforsyningen for disse CT-maskinene.

CT-maskinen modelleres her som en binær komponent som kan befinne seg i to tilstander. Disse er: *Skann* eller *stand-by*. Tilstanden *Skann* svarer til det maksimale effektbehovet som CT-maskinen kan ha.

Det er gjennomført en grundig studie av bruken av CT-maskinene ved St. Olavs hospital. Gjennomsnittlig tid mellom skann og gjennomsnittlig varighet av skann ble beregnet basert på innsamlede data fra dataloggere og strømtenger. Disse dataene danner grunnlaget for modelleringen av CT-maskinen som en binær komponent.

Hvis for mange CT-maskiner befinner seg i tilstanden *skann* på samme tidspunkt, kan dette overbelaste UPSens vekselretter, noe som i sin tur vil gjøre at effekten til disse må flyte utenom UPSens like- og vekselretter, og isteden gå gjennom den statiske bypass switchen. Hovedsakelig må tre kriterier være oppfylt for at strømforsyningen til CT-maskinene svikte: (1) Det er et strømbrydd i nettleverandør sin tilførsel til sykehuset. (2) Nødstrømsaggregatene er ikke operative. Og (3) UPSens vekselretter blir overbelastet og forsøker å koble over til drift i bypass.

Gjennom modellering av en Markov-prosess og ved bruk av pålitelighetsnettverk, er tilgjengeligheten og *mean time between failure* (MTBF) funnet for strømtilførselen frem til CT-maskinene for ulike størrelser av UPS. For de kombinasjonene av antall CT-maskiner og installert effekt på UPSen som gir en tilfredsstillende grad av pålitelighet (i.e. MTBF på over 60 år) har potensielle innsparinger blitt beregnet basert på historiske data fra tidligere sykehusprosjekter i Norge.

Ved å neddimensjonere UPSen ut fra antall tilkoblede CT-maskiner, slik at den fortsatt fungerer som forutsatt og sikrer nødvendig systempålitelighet, kan kostnadene direkte forbundet med anskaffelsen av denne reduseres. Gjeldende praksis er at UPSen dimensjoneres lik at den dekker det maksimale effektbehovet til samtlige CT-maskiner som er tilkoblet. I denne masteroppgaven blir det vist at for UPSer som skal forsyne mellom 3 og 5 CT-maskiner, så kan UPSen dimensjoneres for å dekke det maksimale effektbehovet til 2 av disse. Potensialet for besparelsene som kan oppnås for en UPS vil variere fra omtrent 100 000kr til 600 000kr, avhengig av antall CT-maskiner som skal forsynes og hva deres maksimale effektbehov er.

# Abstract

In this thesis, the size of an *uninterruptable power supply* (UPS) connected to multiple *computed tomography* (CT) scanners is assessed using classic system reliability theory. The goal is to reduce the size and thereby reduce the cost associated with the UPS, without compromising the reliability of the power supply to these CT scanners.

The CT scanner is modelled as a binary component. This theoretical construct of a CT scanner can be in one of two states: *Scan* or *Standby*, where the state *Scan* equates to the maximum power demand from the CT scanner.

An in-depth study of the utilization of CT scanners at St. Olavs hospital was conducted. The mean time between scans and the mean duration of the scan were calculated based on collected data from data loggers and current probes. The CT scanner is modelled as a binary component based on these results.

If too many CT scanners are in a state of *Scan* at the same time, the UPS inverter may overload and the power flow to those CT scanners may have to bypass the UPS rectifier and inverter and flow through the static bypass switch. Generally, three events may occur: (1) there is a power outage of the mains, (2) the emergency backup generators are not running, and (3) the UPS inverter is overloaded. If all three events occur at ones, then the CT scanners will lose their power supply.

By modeling both a Markov process and a reliability block diagram, the availability and mean time between failure are found for the power supply to these CT scanners for different sizes of the UPS. For those configurations of UPS size and numbers of CT scanners that yield an acceptable level of reliability (i.e. MTBF above 60 years), the potential savings are calculated based on historical data from prior construction projects of hospitals in Norway.

By rightsizing the UPS for its intended use and necessary level of system reliability, the cost directly associated with the acquisition of a UPS may be reduced. Current practice dictates that a UPS supplying  $n$  number of CT scanners should have an output power of at least  $n$  times the maximum power demand of the CTs. In this thesis, it is shown that for  $n$  between 3 and 5, the UPS may be sized for the maximum power demand of only two of the connected CT scanners. The potential savings may range from about 100 000kr to 600 000kr, depending on the number of CT scanners installed and their maximum power demand.

# Forord

Denne rapporten er det endelige resultatet av et 7 års langt opphold ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Forfatteren starter på forkurs for ingeniørutdanningen i 2015 etter en treårig karriere som elektriker. Denne masteroppgaven som leveres sommeren 2022 markerer slutten på en toårig mastergrad i *energi og miljø*, tatt over tre år i kombinasjon med en fulltidsjobb som prosjektingeniør. I løpet av oppholdet ved NTNU har forfatteren fått økt sitt kompetansenivå betydelig innen en rekke fagfelt, men spesielt innenfor fagfeltet elektriske lavspenningstallasjoner.

Forfatteren har siden 2019 arbeidet som prosjektingeniør elektro hos COWI AS avd. Trondheim. Frem til d.d. har arbeidsoppgavene hos COWI utelukkende vært prosjektering av elektroinstallasjoner i sykehusbygg, en erfaring som har kommet godt med i utarbeidelsen av denne rapporten. Problemstillingen i denne masteroppgaven springer ut fra reelle utfordringer som forfatteren og hans kollegaer har møtt i ulike sykehusprosjekter. Siden forfatteren har en slik bakgrunn, har han også hatt enkel tilgang til ressurser og kilder som andre studenter kanskje ikke ville fått tak i.

Selve rapporten er skrevet fra perspektivet til en rådgiver, derfor drøftes ikke de elektrotekniske aspektene ved CT og UPS i detalj. Isteden er fokuset de praktiske konsekvensene slikt utstyr har for strømforsyningen i et sykehus.

Oppgaven er utført i samarbeid med COWI AS avd. Trondheim.

En spesiell takk rettes til:

**Eilif Hugo Hansen** (Førsteamanuensis, Institutt for elkraftteknikk, NTNU) som har vært veileder for denne masteroppgaven.

**Bård Almås** (Overingeniør, Institutt for elkraftteknikk, NTNU), for sitt bidrag til selektering av måleinstrumenter og bistand i kalibreringen av disse.

**Øyvind Opdan** (Fagansvarlig Elektro og Automasjon, Sykehusbygg HF), som har hatt en betydelig rolle i koordineringen inn mot personell ved St. Olavs hospital

**Kjell Olav Lyngsmo** (Fagansvarlig utstyr, Sykehusbygg HF), som villig har delt av sin kunnskap om CTer og gitt innspill til denne oppgaven

**Trond Floan** (Faglig ansvarlig elektro, St. Olavs hospital), for å ha gitt tilgang til hovedfordelinger nødkraft ved St. Olavs, og bidratt til at praktiske målinger kunne gjennomføres.

**Asle Kolstad** (Medisin Teknisk Ingeniør, St. Olavs hospital), som har satt av tid og ressurser slik at det ble mulig å få demonstrert CT-maskinenes praktiske bruk ved St. Olavs, og slik at loggfiler for disse kunne bli hentet ut.

**Andreas Otterstad Garnes** og **Raymond Andre Borgersen** (hhv. Faglig leder elektro og Sivilingeniør elektro, COWI AS avd. Trondheim) som villig har delt av sin kunnskap og ekspertise innen fagfelt som UPS og lavspenningstallasjoner i sykehus, og som det har vært et privilegium å dele kontorlokaler med i flere år.

**Egil Reppe** (Seksjonsleder Elektro, COWI AS avd. Trondheim) for å ha støttet gjennomføringen av både masteroppgaven og hele mastergraden denne er en del av.





# Innhold

Figurer .....	xii
Tabeller .....	xiii
1 Innledning .....	1
1.1 Bakgrunn .....	1
1.2 Problemstilling .....	2
1.3 Avgrensninger.....	2
1.4 Rapportens oppbygging.....	4
2 Teori og tidligere forskning på CT.....	5
2.1 Teori; CT.....	5
2.2 Praktisk bruk; CT .....	8
2.3 Tidligere forskning; CT .....	10
3 UPS.....	15
3.1 Oppbygning; dobbeltkonverterende UPS .....	15
3.2 Virkemåte; dobbeltkonverterende UPS.....	17
3.3 UPS med og uten transformator .....	17
3.4 Sentralisert statisk switch.....	19
3.5 Pålitelighet ved UPS, tidligere forskning og arbeider. ....	19
4 Metode .....	23
4.1 Pålitelighetsanalyse .....	23
4.1.1 Strukturfunksjoner og pålitelighetsnettverk .....	23
4.1.2 Markov-modell i pålitelighetsanalyse.....	26
4.2 Modell av strømtilførsel frem til CT .....	28
4.3 Modell for pålitelighet .....	31
4.3.1 Kilder for pålitelighetsdata.....	31
4.3.2 Forenklet elektrisk modell for pålitelighetsanalyse .....	32
4.3.3 Markov-modell for normalkraft- og nødstrømforsyning.....	34
4.3.4 Modellering av bruken av CT-maskinene.....	39
4.3.5 Pålitelighetsnettverk, strømtilførsel for CT .....	40
4.4 Oppsett for målinger; utnyttelse CT.....	43
4.5 Bygg, kostnad og entreprise .....	44
4.6 Metode for kostnadsestimering av UPS.....	46
5 Resultater og analyse .....	47
5.1 Påliteligheten til strømforsyningen.....	47
5.1.1 Pålitelighet; normalkraftforsyning.....	47

5.1.2	Pålitelighet; strømtilførsel inn til hovedfordeling nødkraft .....	47
5.1.3	Pålitelighet; strømforsyningen frem til CT.....	49
5.2	Kostnad ved avbruddsfri strømforsyning for CT .....	53
5.2.1	Kostnad; innkjøp av UPS.....	53
5.2.2	Kostnad; økt pålitelighet .....	54
5.3	Bruken av CT-maskiner ved St. Olavs hospital.....	57
5.3.1	Bruken av de individuelle CT-maskinene .....	57
5.3.2	Estimering av sviktintensitet og reparasjonsrate CT ( <i>skann</i> ) .....	64
5.3.3	Forventet utnyttelse av CT maskiner.....	67
5.4	Kvalitetssikring, modell og metode .....	69
5.4.1	Kontroll av måleoppsett. ....	69
5.4.2	Kontroll av beregninger.....	71
5.4.3	Utnyttelse av DSCT .....	72
5.4.4	Detekterte kollisjoner ved St. Olavs hospital .....	73
5.4.5	Strømtrekk ved detekterte kollisjoner .....	76
6	Drøfting .....	79
6.1	Påliteligheten .....	80
6.1.1	Risikovurdering .....	80
6.1.2	Pålitelighet; egnet for forutsatte bruk .....	83
6.1.3	Pålitelighet fra pasientens perspektiv .....	85
6.2	Kostnad .....	86
6.2.1	Direkte kostnader.....	86
6.2.2	Indirekte kostnader .....	88
6.2.3	Rasjonell bruk av tilgjengelige midler.....	88
6.3	Bruken av CT-maskiner.....	89
6.4	Kvalitetssikring og kritikk .....	91
6.4.1	Utforming av pålitelighetsanalysen .....	91
6.4.2	Selektering av feildata .....	92
6.4.3	Overbelastning av UPSens vekselretter, reell og teoretisk.....	93
6.4.4	Avsluttende bemerkninger kvalitetssikring .....	96
7	Konklusjon .....	97
8	Avslutning.....	99
8.1	Praktiske erfaringer .....	99
8.2	Veien videre .....	99
	Referanser.....	101
	Vedlegg.....	105
	Vedlegg 1 Beregninger for forventet pålitelighet strømforsyning fra nettleverandør ..	106

Vedlegg 2 Feidata, IEEE Std. 493 [44, s. 226–275].....	107
Vedlegg 3 Feidata, OREDA 1992 [51] .....	108
Vedlegg 4 Feidata, SINTEF [34] .....	110
Vedlegg 5, Måleresultater St. Olavs hospital.....	111
Nevro- senteret, målinger hovedfordeling nødkraft.....	111
Akutt- senteret, målinger hovedfordeling nødkraft .....	114
Gastro- senteret, målinger hovedfordeling nødkraft, CT 1 .....	117
Gastro- senteret, målinger hovedfordeling nødkraft, CT 2 .....	120
Gastro- senteret, målinger hovedfordeling nødkraft, CT 3 .....	123

# Figurer

Figur 1 Illustrasjon av ulike forhold mellom installert effekt UPS og installert effekt CT-maskiner. Viser ulike alternativer for en installasjon med fem CT-maskiner. ....	3
Figur 2 Enkel prinsippskisse for røntgenapparat [7] .....	5
Figur 3 Skisse røntgenrør [9] .....	6
Figur 4 Gantry for CT 3 ved St. Olavs.....	7
Figur 5 CT-undersøkelsens bevegelse sett fra siden av pasienten. Nederst: CT-undersøkelsens bevegelse sett vinkelrett på rotasjonen til røntgenrør og detektor [17]. .	7
Figur 6 Prinsipp DSCT [19] .....	8
Figur 7 Bearbeidet 3D rekonstruksjon som viser manifestasjon av urinsyregikt [18, s. 382]. .....	8
Figur 8 Bildetakingen til en CT -maskin kan synkroniseres mot hjertets sinusrytme [18, s. 343]. .....	9
Figur 9 Manøverrom for CT3 St. Olavs hospital .....	9
Figur 10 Antall minutter pr. år CT-maskinene bruker i hver tilstand [20]. .....	10
Figur 11 viser en samstilling av data fra (RIS), systemloggen til CT-maskinen og energimålingen [20]. .....	13
Figur 12 Forventet utnyttelse av en CT-maskin, COCIR [22] .....	14
Figur 13 Eksempel på effektforbruket til en CT under et <i>skann</i> [22] .....	14
Figur 14 Prinsippskisse dobbeltkonverterende online UPS [24] .....	16
Figur 15 Prinsipiell utforming statisk switch [23, s. 66].....	17
Figur 16 Dobbeltkonverterende UPS med transformator[31]. .....	18
Figur 17 Dobbeltkonverterende UPS uten transformator [31]. .....	18
Figur 18 Typisk utforming av sentralisert statisk switch [23, s. 89] .....	19
Figur 19 Pålitelighetsnettverk dobbeltkonverterende UPS med bypass [32], [33]. .....	20
Figur 20 Feiltre dobbeltkonverterende UPS [34] .....	20
Figur 21 Typisk graf for feilrate for teknisk utstyr, også kjent som "badekarkurve" [35, s. 21] .....	25
Figur 22 Modell for strømforsyning av CT-maskiner.....	30
Figur 23 Forenklinger og grensesnitt Markov-modell .....	33
Figur 24 Forenklinger pålitelighetsnettverk .....	33
Figur 25 Blokkdiagram for komponenter tilhørende strømforsyning frem til HF nødskraft. Viser grensesnitt mellom Markov-modell og pålitelighetsnettverket.....	34
Figur 26 – Grensedefinisjon for nødstrømsgenerator slik de er definert i OREDA 92 [51, s. 482] .....	35
Figur 27 Markov-modell, nødstrømforsyning med forsinket oppstart .....	37
Figur 28 Pålitelighetsnettverk for strømforsyningen frem til CT om UPS benyttes .....	40
Figur 29 .....	41
Figur 30 .....	41
Figur 31 <i>NS 3451</i> bygningsdelstabellen, avbruddsfri kraft.....	45
Figur 32 Data for ytelse og kostnad ulike UPSer .....	54
Figur 33 Forventet investeringskostnad for UPS til CT, iht. kap. 462 i bygningsdelstabellen.....	55
Figur 34 UPS dimensjonert for CT på 100 kVA .....	56
Figur 35 UPS dimensjonert for CT på 150 kVA .....	56
Figur 36 UPS dimensjonert for CT på 200 kVA .....	56
Figur 37 Prinsipp for definisjon av varigheten til et <i>skann</i> . .....	57

Figur 38 Varighet <i>skann</i> ulike CT-maskiner St. Olavs. Øverst: Hverdager 07:00 til 15:00. Nederst: Kveld, natt og helg. ....	59
Figur 39 Varighet <i>skann</i> for alle CT-maskiner ved St. Olavs. ....	60
Figur 40 Tid mellom <i>skann</i> , ulike CT-maskiner St. Olavs. Øverst: Hverdager 07:00 til 15:00. Nederst: Kveld, natt og helg. ....	61
Figur 41 Tid mellom <i>skann</i> , start til start, for alle CT-maskiner v. St. Olavs. ....	62
Figur 42 Dødtid mellom <i>skann</i> , slutt til start, for alle CT-maskiner v. St. Olavs. ....	63
Figur 43 Sviktintensiteten som funksjon av klokkeslett. Øverst: Hverdager. Nederst: Helg Venstre: Sviktintensitet pr. maskin. Høyre: Total sviktintensitet for <i>universell</i> CT. ....	65
Figur 44 Reparasjonsraten som funksjon av klokkeslett, intervaller på en time. Øverst: Hverdager. Nederst: Helg Venstre: Reparasjonsrate pr. maskin. Høyre: Total reparasjonsrate for <i>universell</i> CT. ....	65
Figur 45 Sammenligning målinger CT 1 med loggfil for maskinen, fra mandag 13.06 (øverst) til fredag 17.06 (nederst) ....	70
Figur 46 Utnyttelse rør B i DSCT ved St. Olavs hospital, sett opp mot totalt strømtrekk. ....	72
Figur 47 - Definisjon av <i>kollisjon</i> mellom to CT-maskiner i tilstanden <i>skann</i> ....	73
Figur 48 Venndiagram for avbrudd strømforsyning CT ....	79
Figur 49 Separat UPS for datamaskiner tilhørende CT, St. Olavs hospital ....	81

## Tabeller

Tabell 1 Definisjoner av forskjellige tilstander for en CT-maskin [20] ....	11
Tabell 2 Energiforbruk og varighet ulike CT- undersøkelser [20]. ....	12
Tabell 3 Typiske verdier for CT-maskinene hos deltakerne i SRI- prosjektet [22] ....	13
Tabell 4 Gjennomsnittlig tid mellom feil og utilgjengelighet for tre systemløsninger for strømforsyningen til medisinsk område gruppe 2 [34] ....	20
Tabell 5 Beskrivelse av tilstandene i Markov-modellen i figur 27 ....	37
Tabell 6 Data for Markov-modellen ....	38
Tabell 7 Definisjon av tilstander for CT-maskin. ....	39
Tabell 8 Komponentbeskrivelse pålitelighetsnettverk. ....	40
Tabell 9 Undersøkte CT-maskiner St. Olavs. ....	43
Tabell 10 Beregnet forventet verdi for avbrudd i strømtilførselen fra nettleverandør. ....	47
Tabell 11 Resultater Markov-modell ....	48
Tabell 12 Tilgjengelighet hverdager kl. 7 til 15 ....	50
Tabell 13 Tilgjengelighet kveld, natt og helg ....	50
Tabell 14 MTBF hverdager kl. 7 til 15 [år] ....	50
Tabell 15 MTBF kveld, natt og helger [år] ....	50
Tabell 16 Gjennomsnittlige tilgjengeligheten for strømforsyningen ....	51
Tabell 17 gjennomsnittlige utilgjengeligheten for strømforsyningen (sekunder pr. år) ...	51
Tabell 18 Forventet gjennomsnittlig antall år mellom svikt i strømforsyningen til CT. Avrundet til tre desimaler. ....	52
Tabell 19 Forventet gjennomsnittlig varighet på avbrudd i sekunder ....	52
Tabell 20 Inkluderte poster i datasett for UPS ....	53
Tabell 21 Bruken av CT ved St. Olavs hospital. Målt 10 til 17 juni 2022. ....	58
Tabell 22 Akkumulerte timer for datalogger og CT-maskiner. ....	58
Tabell 23 Sviktintensitet og reparasjonsrate for en <i>universell</i> CT-maskin ....	64
Tabell 24 Tilgjengelighet vekselretter UPS, overbelastning (OB), Hverdager, Man – Fre 07:00 – 15:00. ....	67

Tabell 25 Tilgjengelighet vekselretter UPS, overbelastning (OB), Kveld, natt og helg, Man – Fre 07:00 – 15:00 og Lør – Søn 00:00 – 24:00. ....	67
Tabell 26 MTBF vekselretter UPS, overbelastning (OB), hverdager .....	67
Tabell 27 MTBF vekselretter UPS, overbelastning (OB), kveld, natt og helg .....	67
Tabell 28 Overbelastning (OB) av vekselretter UPS. ....	68
Tabell 29 Kontroll CARA, MTBF hverdager kl. 7 til 15 [år] .....	71
Tabell 30 Kontroll CARA, MTBF kveld, natt og helger [år].....	71
Tabell 31 Bruken av doble rør ved St. Olavs, CT 2. Måleperiode 10 juni til 17 juni 2022. ....	72
Tabell 32 Resultater deteksjon av kollisjoner, St. Olavs hospital .....	73
Tabell 33 Histogram varigheten av kollisjoner mellom <i>skann</i> .....	74
Tabell 34 Tid mellom kollisjoner .....	75
Tabell 35 Totalt strømtrekk ved kollisjoner .....	76
Tabell 36 Mulige konsekvenser av et avbrudd i strømforsyningen til CT .....	81
Tabell 37 Forventet gjennomsnittlig antall år mellom svikt i strømforsyningen til CT opp mot gruppe 2.....	84
Tabell 38 Potensielle besparelser ved neddimensjonering av UPS.....	87
Tabell 39 Sammenligning bruken av CT med tidligere forskning.....	90
Tabell 40 Gjennomsnittlig tid mellom <i>skann</i> , reel og teoretisk overbelastning vekselretter. ....	94
Tabell 41 Feildata for utvalgte komponenter i det elektriske anlegget [44, s. 226–275]. ....	107

# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Innen faget lavspentinstallasjoner finnes det få, om noen, landinstallasjoner med samme kompleksitet og kostnadsnivå som den elektriske installasjonen i sykehus. I nyere tid har det blitt startet 13 store sykehusutbygginger med en planlagt kostnadsramme på mer enn 80 milliarder kroner. Disse prosjektene vil øke den norske helsetjenestens tilgjengelige sykehusareal med nesten 1 million kvadratmeter [1]. Slike store prosjekter legger beslag på en stor del av fellesskapets ressurser. Det er derfor i alle nordmenns interesse at disse prosjektene gjennomføres så rasjonelt og kostnadseffektivt som tilrådelig.

En viktig del av de funksjonene som utføres ved et sykehus er bildediagnostikken. Til dette arbeidet benyttes forskjellige modaliteter. Dette er kostbart utstyr, og innebærer maskiner slik som computertomografi (CT), magnetresonans (MR), Positron emisjons tomografi (PET) m.m. Dette er maskiner som generelt sett har et høyt effektbehov over et lite tidsintervall. Det aller meste av tiden vil disse modalitetene befinne seg i stand-by.

Vanlig praksis fra de sykehusprosjektene hvor COWI har prosjektert lavspentinstallasjonen, er at utstyr for bildediagnostikk defineres som *annet viktig utstyr* i medisinske områder av typen gruppe 1 og 2. Dette er medisinske områder hvor det stilles ekstra krav til den elektriske installasjonen, med den hensikten å trygge sikkerheten til pasienter og medisinsk personale.

Standarden NEK 400 representerer en preakseptert løsning for å oppfylle sikkerhetskravene stilt av myndighetene i *Forskrift om elektriske lavspenningsanlegg* (FEL). I delkapittel 710.560.6.103 i NEK 400:2018 stilles det krav om at *annet viktig utstyr* i medisinsk område 1 og 2 skal kobles over på en nødstrømsforsyning innen 25 sekunder bl.a. etter at et avbrudd har inntruffet i strømforsyningen fra nettleverandør. Veiledningen til dette punktet sier: «*Ved prosjektering av strømforsyningen skal omkoblingstiden vurderes i samarbeid med medisinsk sakkyndig*» [2]. I en del prosjekter har prosjekteringsgruppen, i møte med brukermiljøet, opplevd at de har forskjellig oppfatning av hva som er nødvendig omkoblingstid for elektromedisinsk utstyr for billedtaking, slik som f.eks. CT. Prosjekteringsgruppen fokus er gjerne på å levere en teknisk løsning som er tilstrekkelig for utstyrets funksjon, uten å gjøre et for stort innhugg i kostnadsrammen for prosjektet. Brukermiljøet på sin side vil gjerne etterstrebe at strømforsyningen skal kunne understøtte best mulig pasientbehandling, uavhengig av kostnadene. Resultatet av dette samarbeidet, som elektroingeniørene til COWI har deltatt i ved flere anledninger, er at brukermiljøet får aksept for at det ikke kan være noen omkoblingstid for elektromedisinsk utstyr slik som CT. I flere av de nye sykehusprosjektene vil derfor en del CTer være forsynt via en *Uninterruptable Power Supply* (UPS), slik at disse maskinene mottar en *avbruddsfri kraftforsyning*.

## 1.2 Problemstilling

Denne masteroppgaven har ikke som mål å overprøve brukermiljøets vurderinger av omkoblingstidene for elektromedisinsk utstyr. Isteden vil fokuset her være å se på om en UPS som forsyner slike CTer, kan dimensjoneres og spesifiseres på en mer rasjonell måte, slik at de totale investeringskostnadene holdes nede. I de prosjektene hvor COWI har prosjektert slike avbruddsfrie kraftforsyninger, har UPSen blitt dimensjonert for å takle minst den dimensjonerende effekten til samtlige tilkoblede CTer, dvs. en samtidighetsfaktor lik 1. Det er denne fremgangsmåten som vil bli utfordret i denne masteroppgaven.

For å kunne studere om det finnes en mer rasjonell og kostnadseffektiv måte å prosjektere avbruddsfri kraftforsyning til CT, er følgende problemstilling valgt for oppgaven:

*Kan investeringskostnadene for avbruddsfri kraftforsyning til CT-maskiner reduseres, uten at strømforsyningens pålitelighet blir merkbart svekket?*

Denne problemstillingen vil da ta utgangspunkt i etablerte praksis hos COWI, som er å dimensjonere UPSen ut fra summert dimensjonerende effekt for CT-maskinene den skal forsyne. For å få investeringskostnadene ned, vil hovedfokuset i denne oppgaven være å se på de elektrotekniske aspektene ved anskaffelsen av UPS. Forhold som går på konkurranse og kontrakt blir i mindre grad belyst.

Den valgte problemstillingen inneholder to grunnleggende elementer og et forhold mellom dem som må studeres. Disse er kostnaden og nytten som installasjonen av en UPS medfører. De direkte investeringskostnadene til UPSen er estimert basert på tidligere prosjekter COWI har vært involvert i. Skal derimot nytten til en UPS kunne beskrives, er det en rekke forhold som må studeres:

- Hvordan er normalt strømforsyningen i et sykehus bygget opp?
- Hvilken belastning utgjør en CT-maskin?
  - Hvordan er maskinen bygget opp?
  - Hvordan brukes denne maskinen i praksis?
  - Hvilken elektrisk belastning utgjør denne maskinen?
  - Hvordan kan denne belastningen modelleres for å undersøke om UPSen kan neddimensjoneres mtp. gjeldende praksis?
- Hvilken pålitelighet vil strømforsyningen til CT-maskinene ha om ytelsen til UPSen reduseres i forhold til CT-maskinene den forsyner?

Denne masteroppgaven bygger videre på arbeidet fra tilhørende fordypningsprosjekt *Statisk UPS i strømtilførselen til CT - Vurderinger av ulike UPS-topologier inn i en sykehusinstallasjon* som ble gjennomført høsten 2021 [3]. Disse to prosjektene vil derfor til en viss grad bygge på et felles teoretisk grunnlag og forståelse av CT og UPS.

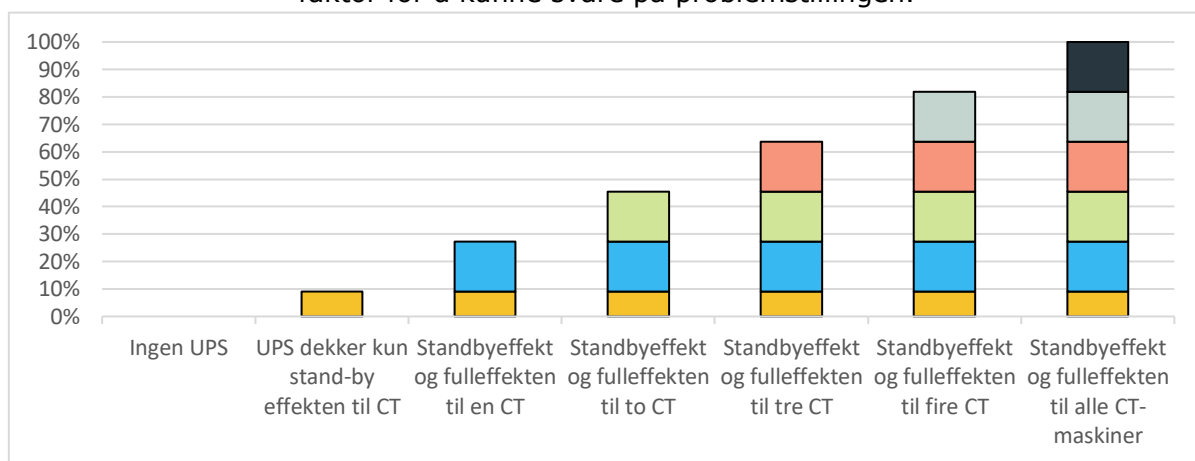
## 1.3 Avgrensninger

Det finnes en rekke ulike maskiner for billedtaking på et sykehus. Brukermiljøet har tidligere ønsket at både MR, PET, CT og tradisjonell røntgen får avbruddsfri kraftforsyning. I denne rapporten blir kun avbruddsfri kraftforsyning til CT vurdert. Det er forventet at CT-maskinen er det radiologiske apparatet hvor forholdet mellom effektbehov ved bruk og stand-by vil være størst, og sånn sett ha det største potensialet for å nedskalere UPSen. I denne rapporten vurderes det ikke om flere forskjellige



modaliteter bør kombineres innen en og samme UPS. Det sees kun på strømforsyningen fra en UPS til en eller flere CT-maskiner. Denne avbruddsfrie kraftforsyningen sammenblandes heller ikke med sykehusets generelle UPSer, men vil være en helt egen UPS kun tiltenkt CT.

Selve nedskaleringen av UPSen vurderes i inkremitter tilsvarende dimensjonerende effekt for en CT. Denne fremgangsmåten er illustrert i figur 1, hvor stolpen helt til høyre viser gjeldende praksisen til nå. Dette eksempelet illustrerer deknningen om det er 5 CT-maskiner ved sykehuset som skal forsynes med avbruddsfri kraftforsyning fra samme UPS. Om det er mulig å gå fra denne løsningen til en av de illustrert til venstre for denne, uten at påliteligheten til strømforsyningen blir vesentlig svekket, blir en avgjørende faktor for å kunne svare på problemstillingen.



**Figur 1 Illustrasjon av ulike forhold mellom installert effekt UPS og installert effekt CT-maskiner. Viser ulike alternativer for en installasjon med fem CT-maskiner.**

Nå er CT-maskinen et komplekst radiologisk instrument, med en rekke støttefunksjoner og sekundærsystemer. Når denne rapporten diskuterer avbruddsfri kraftforsyning til CT-maskiner, menes det utelukkende strømforsyningen til de primære og kraftkrevende delene. Datamaskinene for etterbehandling av bildene, og arbeidsstasjonene i manøverrommet er ikke en del av den strømforsyningen som vurderes her. De delene som inngår i en CT-maskin, og hvordan de virker sammen blir presentert i kapittel 2.

Det sees kun på statisk UPS i denne oppgaven. Det har vært vanlig praksis å benytte denne UPS-teknologien for avbruddsfri kraftforsyning i norske sykehus. Når det skrives UPS i denne rapporten siktes det til en statisk dobbeltkonverterende UPS, med mindre noe annet er spesifikt uttrykt. Nærmere beskrivelse av denne typen UPS følger i kapittel 3.

En viktig komponent i den avbruddsfrie kraftforsyningen er den statiske switchen som blinkfritt skal kunne koble om lasten fra strømforsyningen ut av UPSen, til strømforsyningen som mater inn på UPSen. En viktig presisering er at det i denne rapporten ikke vurderes eller hensyntas overbelastning av denne switchen, eller øvrige deler av det elektriske anlegget. Kun dimensjoneringen av selve UPSen drøftes. Dette gjelder selv om den statiske switchen i mange tilfeller er integrert inn i UPSen. Beskrivelse av funksjon og oppbygning for den statiske switchen finnes i kapittel 3 sammen med øvrig UPS teori.

## 1.4 Rapportens oppbygging

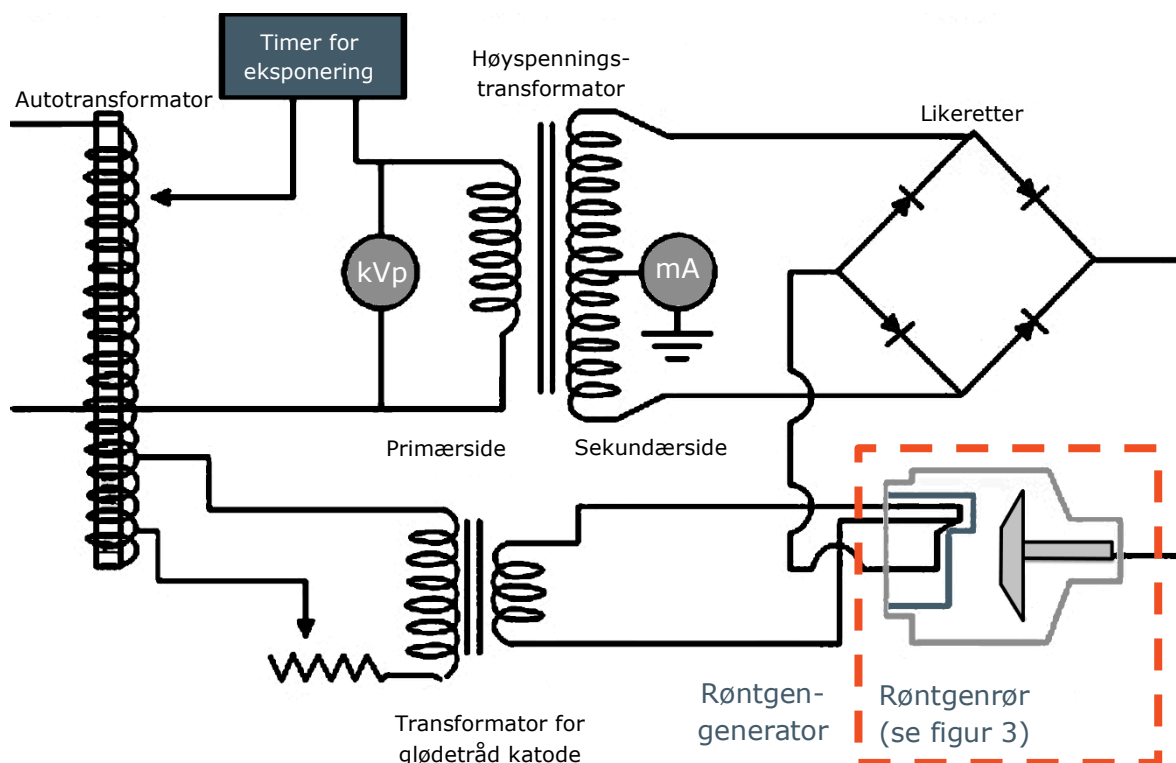
- **Kapittel 2** tar for seg røntgenstråling generelt og den radiologiske CT-maskinen spesielt. Oppbygning, virkemåte og praktisk bruk av denne maskinen presenteres her. I tillegg vil dette kapitlet redegjøre for aktuell forskning som tidligere er utført på området.
- **Kapittel 3** tar for seg statisk UPS som en teknologi for avbruddsfri kraftforsyning. Oppbygning og virkemåte forklares, og aktuell forskning innenfor temaene UPS og pålitelighet presenteres.
- **Kapittel 4** omhandler metodene som er valg for gjennomføringen av datainnsamling og etterbehandlingen av disse. Innsamlede data benyttes som grunnlag inn i en modell for pålitelighet, og oppbygningen av denne modellen presenteres her.
- **Kapittel 5** inneholder rapportens resultater og analyse av disse. Her finnes resultatene fra målinger ved St. Olavs hospital som viser med hvilken intensitet deres CT-maskiner blir utnyttet. Disse og andre resultater har videre dannet grunnlaget for inndataene i den konstruerte modellen. Resultatene fra denne modellen finnes også her, sammen med de direkte forventede kostnadene ved en UPS- anskaffelse.
- **Kapittel 6** diskuterer relevansen, gyldigheten og betydningen av resultatene arbeidet med denne rapporten har produsert.
- **Kapittel 7** er rapportens konklusjon.
- **Kapittel 8** trekker frem noen praktiske momenter i gjennomføringen av masteroppgaven. Her diskuteres også veien videre, hvor det pekes på nye elementer som burde undersøkes videre.

## 2 Teori og tidligere forskning på CT

### 2.1 Teori; CT

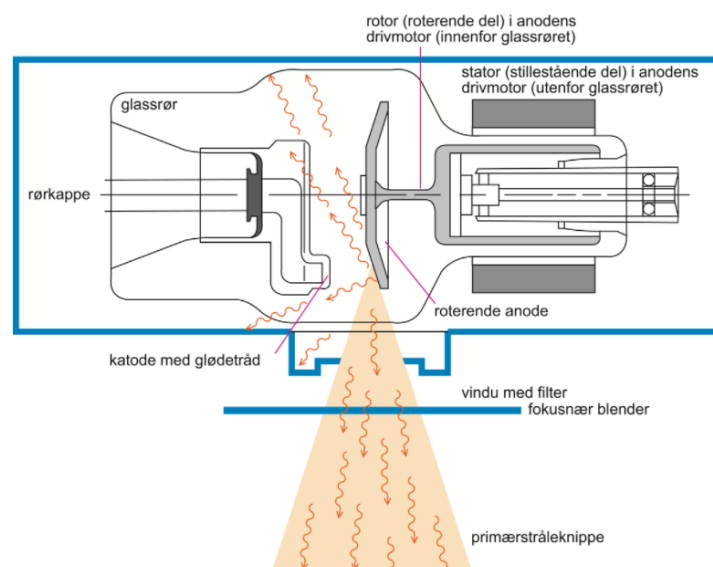
Computertomografi (CT) er en radiologisk undersøkelsesmetode for snittfotografering av pasienten [4]. En CT-maskin er et avansert røntgenapparat. Et generelt røntgenapparat består normalt av to hoveddeler; røntgengeneratoren og røntgenrør. I tillegg trengs en detektor som kan fange opp strålingen som passerer gjennom pasienten, slik at et bilde kan dannes. Prinsipiell oppbygging av røntgenapparatet er vist i figur 2 hvor alt utenfor det markerte området representerer røntgengeneratoren, mens det innenfor representerer røntgenrøret. En mer detaljert skisse av røntgenrøret sees i figur 3.

Røntgenrøret er den delen av apparatet som genererer selve røntgenstrålingen. Slik stråling er en form for elektromagnetisk stråling, og er definert som stråling med bølglengder mellom 0,01 og 10 nanometer [5]. Fotonene som utgjør røntgenstrålingen, inneholder så mye energi at de kan slå løs elektronene til de atomene som treffes. Dette gjør at røntgenstråling defineres som ioniserende stråling, noe som i praksis vil si at strålingen kan skade DNAet i kroppen. Ved en røntgenundersøkelse vil de fleste av fotonene stoppe i kroppen, mens noe av røntgenstrålingen vil nå detektoren på den andre siden. Røntgenbilder er derfor en form for skyggebilder, da det er den ulike gjennomtrålingen av forskjellige organer som danner selve bildet [6].



Figur 2 Enkel prinsippkisse for røntgenapparat [7]

Selve røntgenrøret består av et vakuumbør, hvor en anode og en katode er plassert på hver sin side, med en bestemt avstand mellom seg. I katoden er det en egen glødetråd. Denne er forsynt separat fra høyspenttilførselen inn på anode og katode, noe som sees ved å sammenholde figur 2 og 3 [8]. De to elektrodene kobles til røntgengeneratorens høyspente likestrømskrets, slik at potensialforskjellen mellom de blir stor. Når den negativt ladede katoden nå varmes opp av glødetråden, vil frie elektroner bli slynget fra denne mot anoden med høy hastighet som følge av potensialforskjellen. Når disse elektronene kolliderer med anoden, bremses de opp og røntgenstråling dannes. En slik elektronstrøm vil føre til betydelig oppvarming av anoden. Derfor lages denne ofte av et metall med høyt smeltepunkt, slik som f.eks. wolfram [9]. Et annet tiltak for å håndtere denne oppvarmingen er at det benyttes en roterende anode, slik at elektronstrømmen og dermed oppvarmingen fordeles på et større areal. En slik anode er vist i figur 3, som viser røntgenrøret i detalj.



**Figur 3 Skisse røntgenrør [9]**

Røntgengeneratoren, som er illustrert utenfor sirkelen i figur 2, er den delen av apparater som tilfører elektrisk energi til røntgenrøret. Denne kan regulere tre deler ved røntgenstrålingen som røret sender ut. Den kan kontrollere:

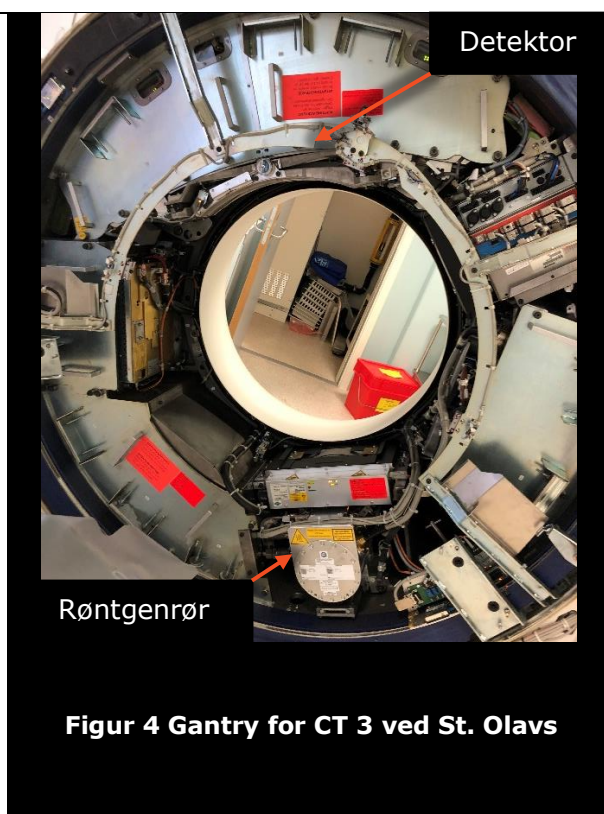
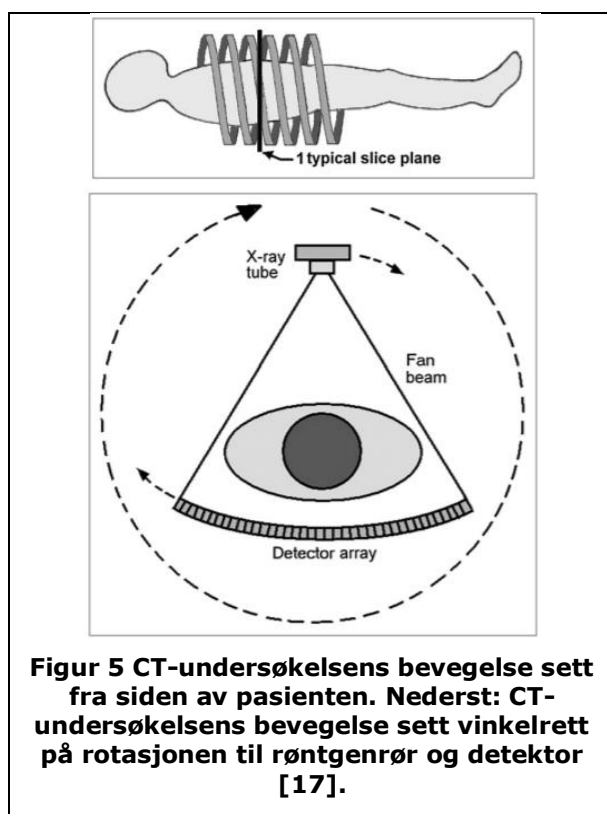
- (1) **Spenningspotensialet mellom elektrodene.** Økt spenning fører til at de frie elektronene har større fart når de kolliderer med anoden, noe som i sin tur øker intensiteten og energien til fotonene som dannes i kollisjonen. Det er bare den påtrykte spenningen som kan regulere energinivået til røntgenstrålingen [10]. For diagnostikk benyttes spenninger i området 30 kV til 150 kV, mens det for røntgenterapi kan brukes spenninger opp mot 300 kV [9]. Reduseres spenningen vil ofte kontrasten i røntgenbildet bli bedre, siden strålingen får dårligere evne til å trenge gjennom pasienten [11, s. 248].
- (2) **Oppvarmingen av selve katoden.** Reguleres strømmen som går gjennom katoden, reguleres også temperaturen til denne. Desto varmere katode, desto flere frie elektroner er tilgjengelige for å bli slynget mot anoden [12]. Det benyttes strømmer i størrelsesorden 1 til 1000 milliamper [13, s. 232]. Dosen stråling pasienten mottar er proporsjonal med strømmen gjennom katoden [14].

- (3) **Eksponeringstiden** vil bestemme hvor lenge det høye potensialet mellom katode og anode påtrykkes. Trioder eller tetroder kan plasseres i røntgengeneratorens høyspentkrets slik at denne kan slås av og på hurtig [12].

I CT-maskinen er både røntgenrøret som genererer strålingen og detektoren som fanger opp strålingen som passerer gjennom pasienten, plassert i en ring som roterer rundt pasienten i et helisk mønster. Dette er illustrert i figur 4. Trommelen hvor røntgenrør og detektor er plassert kalles CT-gantry og sees i figur 4 [15].

CT undersøkelser kan brukes til mange formål, men er spesielt nyttige i forbindelse med [16]:

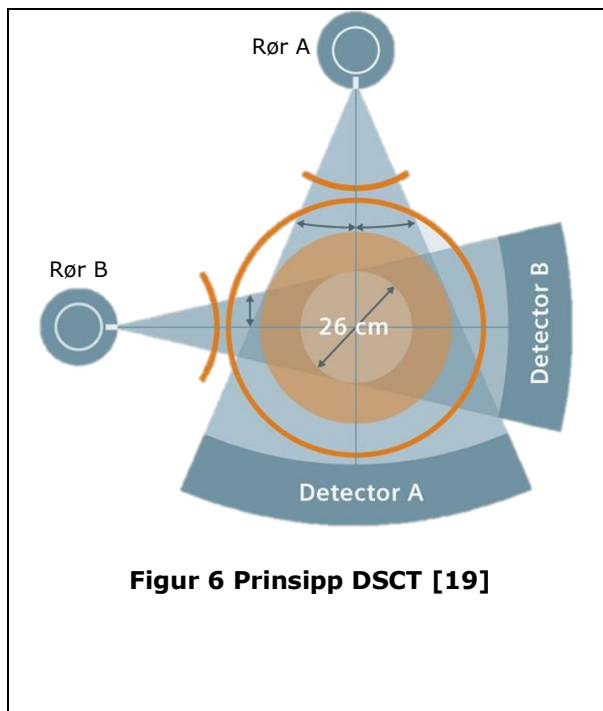
- undersøke blødninger, aneurismer (utposninger på blodkar), hjernesvulster og hjerneskader
- oppdage svulster og andre prosesser i hele kroppen
- utføre kontroller under og etter kreftbehandling, for å vurdere om behandlingen virker
- avklare infeksjoner og betennelsestilstander, samt vurdere lungevev
- vurdere organskader etter traume



En spesiell type CT-maskin, utviklet av en bestemt leverandør (Siemens), kan benytte to sett med røntgenapparater samtidig for å undersøke pasienten. Denne typen kalles for dual source CT (DSCT), og prinsippet til denne sees i figur 6. Det er flere fordeler med denne typen. Mens tradisjonell CT må rotere litt over 180 grader rundt pasienten for å få et fullstendig skann, kan en DSCT utføre et tilsvarende skann med en rotasjon på litt over 90 grader. Dette er spesielt fordelaktig ved skann av hjertet, siden billedtakingen kan fullføres så hurtig at det ser ut som hjertet står helt stille [18, s. 380].

En annen fordel er at en slik DSCT kan operere med ulik hardhet på røntgenstrålingen fra de to rørene. Dette gjør at man kan skille mellom materie med høy tetthet og materie

bestående av grunnstoffer med et høyt atomnummer, siden ulik hardhet på røntgenstrålingen vil interagere forskjellig med slik materie. Et praktisk eksempel som viser fordelene med denne typen undersøkelse er ved identifisering av gikt. Resultatet fra en slik undersøkelse er vist i figur 7, hvor det nå er mulig å skille urinsyrekrystallene (markert med lilla) som har samlet seg i leddene fra resten av beinstrukturen. Tilsvarende resultater kan oppnås på en vanlig CT-maskin ved å svært hurtig endre påtrykt spenning på røntgenrøret, eller ved å ha to ulike detektorer oppå hverandre, hvor den øverste detekterer absorberer fotoner med lavt energinivå og den nederste tar de med høyt energinivå. Andre løsninger finnes også på markedet [18, s. 381].



**Figur 6 Prinsipp DSCT [19]**



**Figur 7 Bearbeidet 3D rekonstruksjon som viser manifestasjon av urinsyregikt [18, s. 382].**

## 2.2 Praktisk bruk; CT

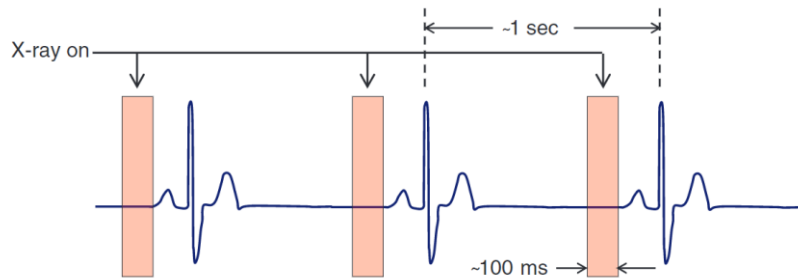
Når først pasienten har lagt seg på bordet og blitt kjørt inn i gantryen, må radiografen planlegge nøyaktig hvilken del av kroppen som skal undersøkes. Dette gjøres ved å først ta et mer tradisjonelt 2D røntgenbilde (topogram) av det generelle området som skal undersøkes. Gantryen er nå stillestående, mens bordet pasienten ligger på beveger seg gjennom røntgenstrålen. Ut fra et eller flere slike innledende skann kan radiografen så selektere nøyaktig hvilket område som skal undersøkes, ved å trekke opp grensene for det endelige scannet. Dette gjøres gjennom softwaren til CTen, og utføres i praksis fra arbeidsstasjonen i manøverrommet, som er skjermet mot røntgenstrålingen. Et slikt manøverrom er vist i figur 9. I planleggingen av skannet må radiografen også bestemme parameterne for undersøkelsen, slik som ønsket spenning (kV), strøm (mA), rotasjonshastigheten til gantryen m.m. [18, s. 369].

I tillegg til selve CT-maskinen kan andre sekundærsystemer benyttes under en slik undersøkelse. Her nevnes det:

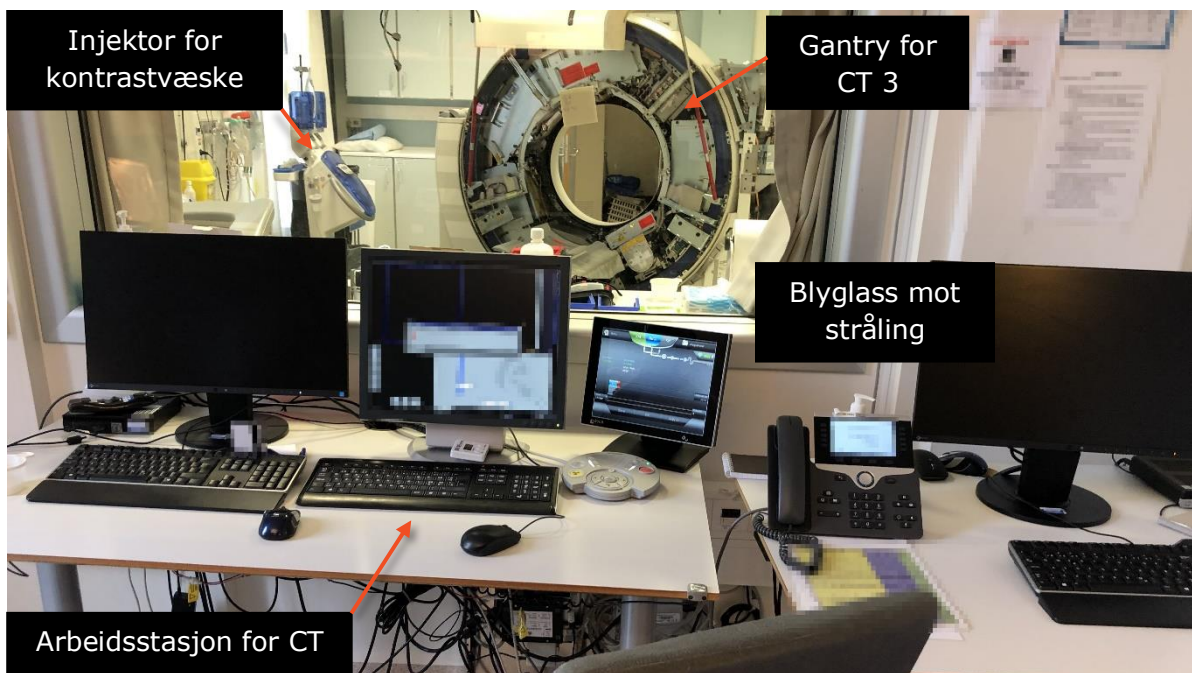
**Injektor for kontrastvæske.** Et røntgenbilde er som kjent et skyggebilde av kroppen, hvor røntgenstrålingen i varierende grad trenger gjennom kroppen. For å kunne øke kontrasten mellom forskjellig bløtvev, slik som blodårer og annet vev omkring, kan man injisere en kontrastvæske mens pasienten ligger i CT-maskinen. Man benytter da en

veneflon/ venekanyle i plast som føres inn i blodåren slik at kontrastvæsken kan injeseres på helt rette tidspunkt [16]. En slik mobil injektor sees i bakgrunnen av figur 9.

**Elektroder for bruk med elektrokardiogram (EKG).** Spesielt ved undersøkelser av hjertet er det fordelaktig å kunne synkronisere rotasjonen og bildetakingen til CT-maskinen mot pasientens hjerterytme. Ønsker man et bilde uforstyrret av hjertets bevegelse sørger man for kun å ta bilde når dette er gunstig ut fra sinusrytmen slik figur 8 viser [18, s. 343].



**Figur 8** Bildetakingen til en CT -maskin kan synkroniseres mot hjertets sinusrytme [18, s. 343].



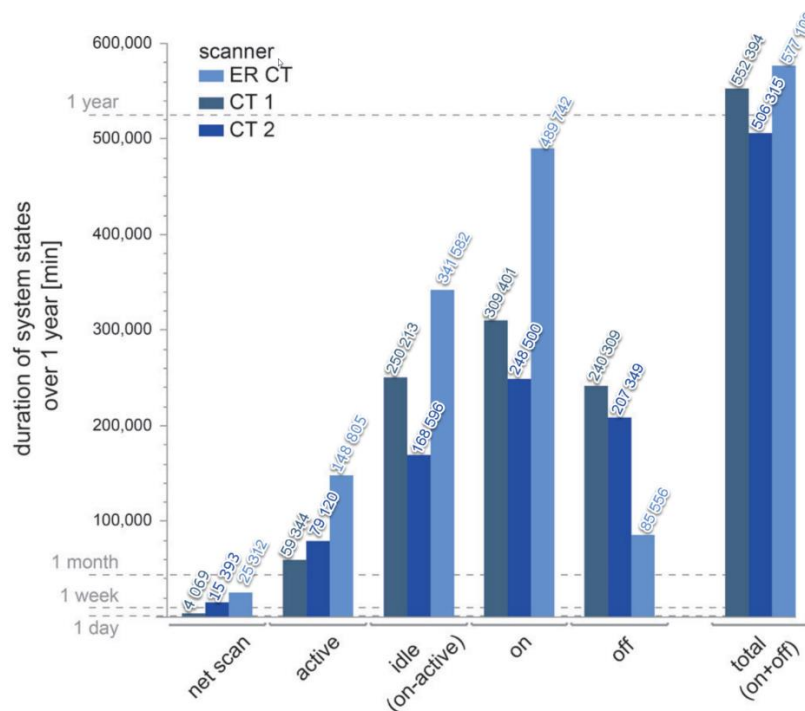
**Figur 9** Manøverrom for CT3 St. Olavs hospital

## 2.3 Tidligere forskning; CT

Det har blitt gjort en del forskning omkring den totale energibruken til CT-maskiner. Selv om ingen av disse prosjektene har sett spesifikt på bruksintensiteten til disse maskinene, indikeres dette til en viss grad i resultatene de presenterer.

Artikkelen *The Energy Consumption of Radiology: Energy- and Cost-saving Opportunities for CT and MRI Operation* [20] springer ut av et forsknings samarbeid mellom radiologiavdelingen ved Basel universitetssykehus (Sveits), Siemens Healthineers Forchheim (Tyskland) og University of Applied Sciences and Arts Northwestern Switzerland (FHNW). I dette prosjektet ble energibruket til tre CT-maskiner og fire MR-maskiner logget og analysert. Samtlige maskiner var produsert av Siemens. Alle maskinene ble utstyrt med energimålere med en samplingsfrekvens på 2 Hz. I tillegg ble loggfilene for gjennomførte undersøkelser hentet ut fra CT og MR-maskinene slik at disse kunne bli analysert. Totalt 40 276 pasienter ble undersøkt i løpet av dette prosjektet. De resultatene fra dette prosjektet som er interessante for denne masteroppgaven er listet opp i tabell 1 og i figur 10 og 11.

Figur 10 viser total varighet for ulike tilstander for de tre CT-maskinene som ble studert i prosjektet fra 2015. Figuren er blitt modifisert med avleste verdier. I rapporten [20] bemerkes det at et måleavvik i energimålingen fører til at total tid for CT-maskinene ikke summerer til de 525600 minuttene det er i et år. Figur 10 er ikke identisk med den som finnes i den originale rapporten. Figuren er nå blitt beriket med avleste verdier, slik at det skal være mulig å sammenligne disse resultatene med de som kommer frem i denne masteroppgaven.



**Figur 10 Antall minutter pr. år CT-maskinene bruker i hver tilstand [20].**

I [20] har forfatteren valgt å dele inn aktiviteten til CT-maskinene i flere forskjellige systemtilstander. En forklaring til disse tilstandene sees i tabell 1.



Systemtilstander:	Definisjon:	Innhentning av data:
Netto skanning ( <i>Net scan</i> )	Den faktiske skanningen av pasienten. Produktiv fase hvor bilder innhentes, og effektbehovet øker betydelig.	Primært innhentet fra energimålinger ved å identifisere effekttopper.
Aktiv ( <i>Active</i> )	Tidsperioden hvor CT-maskinen faktisk brukes på en pasient. I praksis den tiden det er en pasient inne i CTen.	Stammer fra energimålinger som er satt opp mot loggen til CTen.
Inaktiv ( <i>Idle</i> )	Tiden mellom aktive perioder mens systemet fortsatt er påslått.	Kalkulert ved å trekke <i>Aktiv</i> tid fra <i>system påslått</i> tid.
System på ( <i>System on</i> )	Systemet er påslått og kan starte en undersøkelse øyeblikkelig om ønskelig.	Energimålinger segmentert iht. logg.
System av ( <i>System off</i> )	Systemet er avslått men kan fortsatt trekke noe effekt til f.eks div. hjelpesystemer. CTen kan ikke ta bilder før en oppstartssekvens er gjennomført. Dette kan ta flere minutter.	Energimålinger segmentert iht. logg.

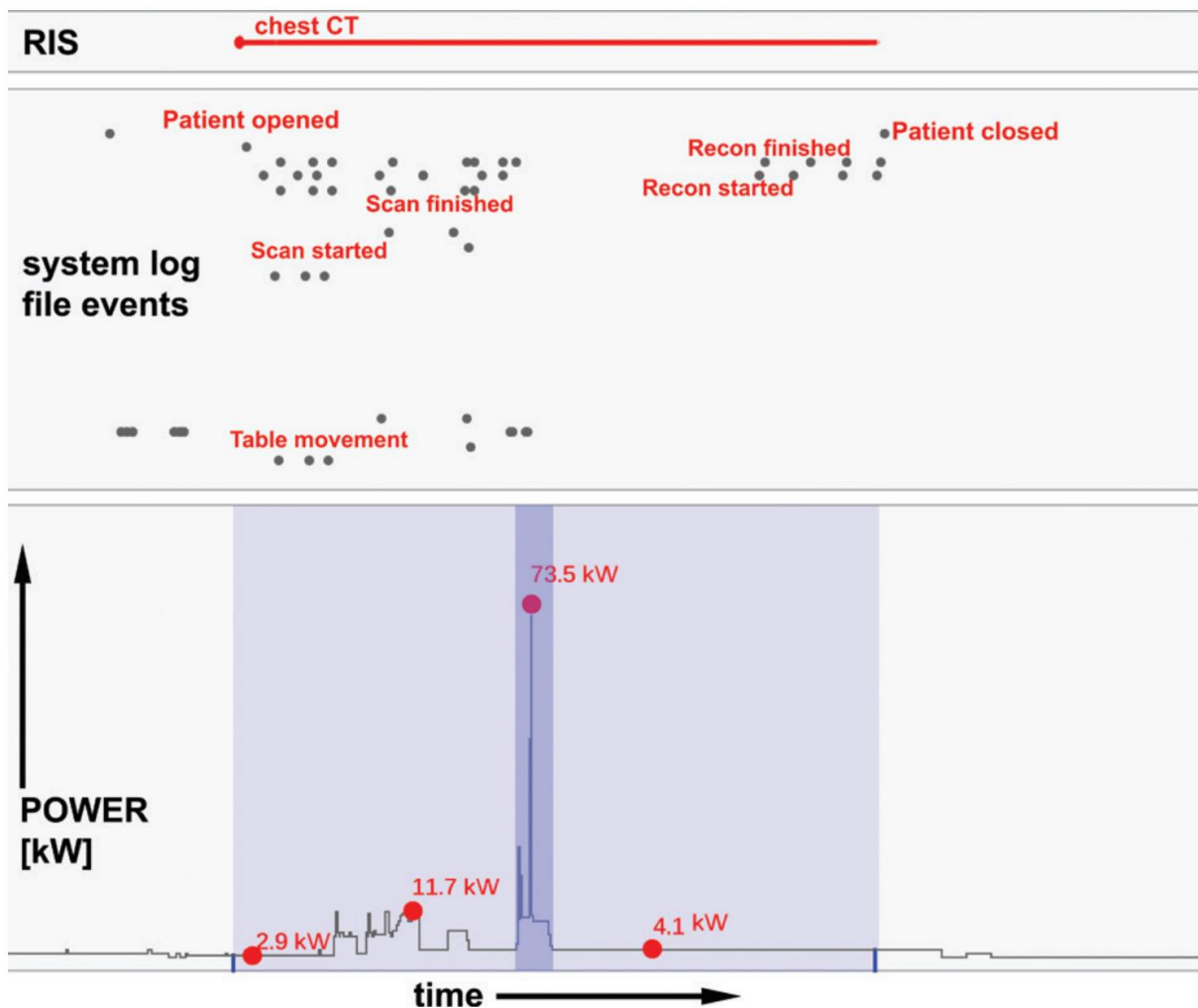
**Tabell 1 Definisjoner av forskjellige tilstander for en CT-maskin [20]**

Fra dette forskningsarbeidet har forfatterne av artikkelen [20] satt opp en oversikt over energi- og tidsbruk pr. type undersøkelse som er utført. Resultatene av disse undersøkelsene sees i tabell 2 på neste side. Med tre CT-maskiner i utvalget, hvorav en brukes som akutt CT, blir gjennomsnittlig varighet på hele CT-undersøkelsen fra start til slutt 16 minutter.

Undersøkt område:	Energiforbruk [kWh]			Varighet [minutter]		
	Median:	Gjennomsnitt:	Standardavvik:	Median:	Gjennomsnitt:	Standardavvik:
Hode og nakke	0,38	0,44	0,24	5	7	4
Hode og ryggrad	0,42	0,48	0,34	5	7	5
Hode og bryst	0,51	0,60	0,41	6	7	5
Hode	0,59	0,68	0,42	9	11	7
Bryst	0,69	0,77	0,44	8	9	6
Bekken	0,72	0,92	0,53	10	11	7
Ryggrad	0,73	0,97	0,50	12	12	7
Nakke	0,79	0,91	0,48	11	12	7
Mage og bekken	0,97	1,28	0,72	12	14	9
Hånd eller fot	1,01	1,23	0,29	13	16	4
Bryst, mage og bekken	1,03	1,14	0,58	116	12	7
Hjerte	1,26	1,39	0,49	13	17	5
<i>Run-off</i>	1,28	1,41	0,50	15	19	7
Nakke, bryst, mage og bekken	1,41	1,44	0,58	14	16	7
Traume	2,10	2,05	0,40	28	29	6
Intervensjon	2,19	3,45	0,71	41	51	14
<b>Gjennomsnitt alle undersøkte områder</b>	<b>0,99</b>	<b>1,22</b>	<b>0,39</b>	<b>13</b>	<b>16</b>	<b>5</b>

**Tabell 2 Energiforbruk og varighet ulike CT- undersøkelser [20].**

I artikkelen [20] er det satt opp en figur som illustrerer hvilke datakilder forskerne har hatt tilgang til, og hvilken sammenheng det er mellom disse. Denne er medtatt her, og sees i figur 11. Øverst på denne ser man informasjonen som lagres i *Radiology Information System* (RIS). Dette er en del av radiografenes logistikk-system som styrer bl.a. bookingen av undersøkelser og sporing av pasientene [21]. Under der igjen er hendelsene i loggen til den individuelle CT-maskinen visualisert. Nederst sees resultatene fra effektmålingen som ble gjort under denne undersøkelsen av pasientens brystregion. Lyseblått område viser total varighet på undersøkelsen, mens mørkeblått område viser perioden definert som *skann*, hvor pasienten blir gjennomstrålt av røntgenstråling. Med recon i loggfilen menes rekonstruksjonen av 3d- bildene fra undersøkelsen. Metoden som forfatterne har brukt er altså å sammenstille data fra forskjellige kilder, basert på tidsstemplene som dataene har, slik at de kunne studere energibruken til CTene i detalj.



**Figur 11 viser en samstilling av data fra (RIS), systemloggen til CT-maskinen og energimålingen [20].**

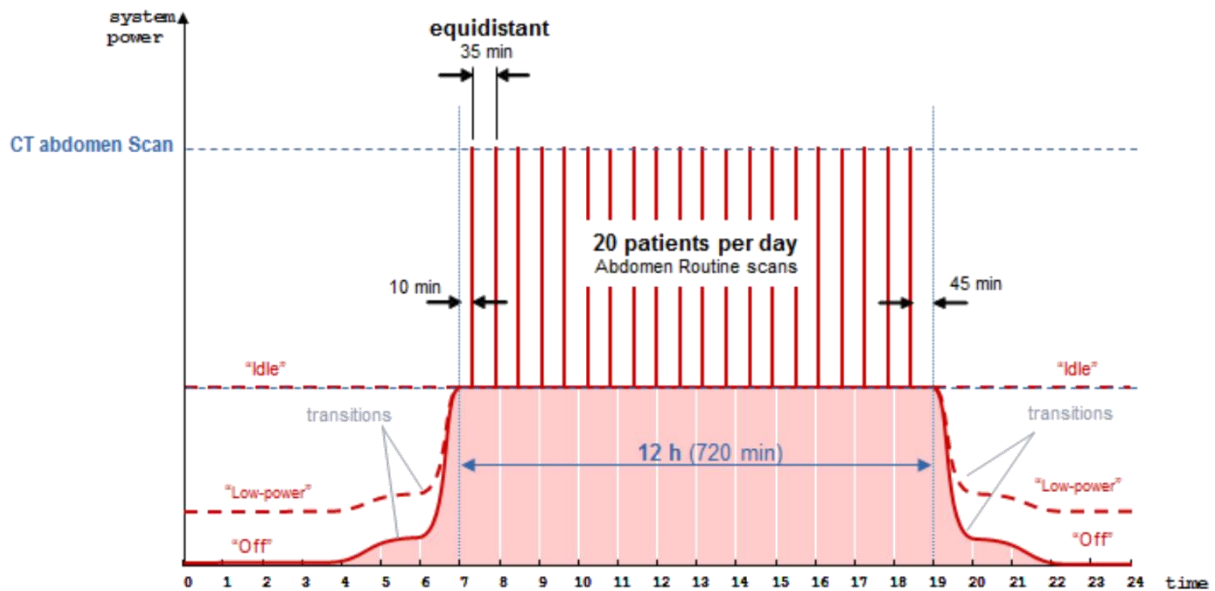
Rapporten *Self-Regulatory Initiative for Medical Imaging Equipment SRI Status Report 2017* [22] er utarbeidet av den europeiske næringsforeningen for medisinsk bildediagnostikk, strålebehandling, helse-IKT og elektromedisinsk industri (COCIR). Dette *Self-Regulatory Initiative (SRI)* fra næringsforeningen kom i stand som en følge av ecodesign- direktivet fra EU-kommisjonen. Årlig publiseres energibesparelsene som dette SRI- prosjektet har ført til iblant bildediagnostikkutstyret installert hos sine partnere.

Deltakerne i SRI målte i 2012 den gjennomsnittlige energibruken til de CT-maskinene som var på markedet da. Disse resultatene er medtatt i rapporten fra 2017. Resultatet av disse målingene vises i tabell 3. Som rapporten [22] trekker frem, vil det være store energibesparelser ved å faktisk slå CT-maskinen helt av når den ikke er i bruk.

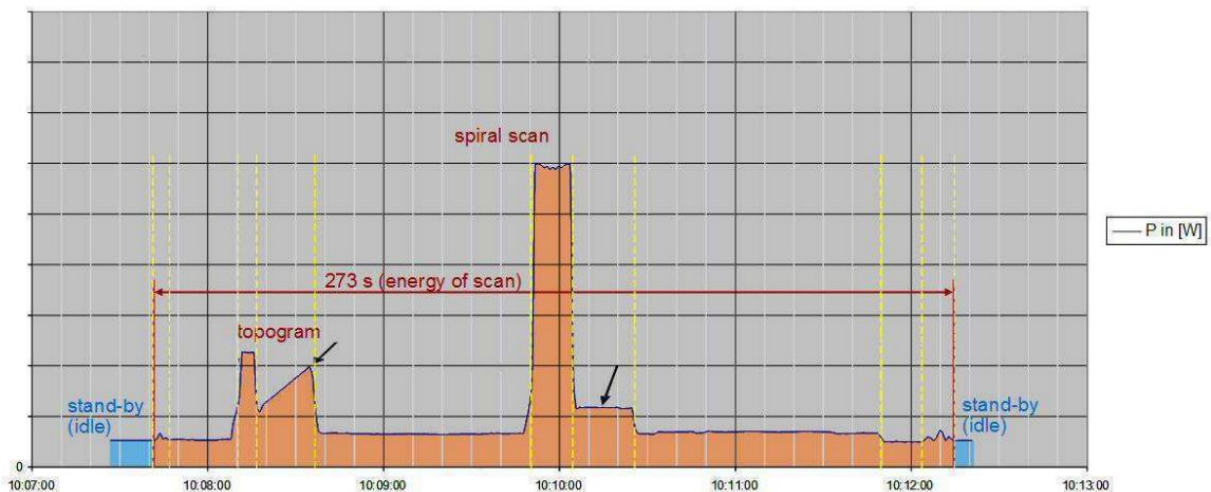
Systemtilstand:	Typisk antall timer i denne tilstanden pr. dag:	Gjennomsnittlig energiforbruk pr. dag: [kWh]
Av (Off)	0	0
Lavenergi (low power)	12	12,2
Tomgang (idle)	10,8	31,1
Skann	1,2	6,1

**Tabell 3 Typiske verdier for CT-maskinene hos deltakerne i SRI- prosjektet [22]**

I rapporten [22] vises det at det daglige energiforbruket til en CT-maskin kan forventes å følge mønsteret illustrert i figur 12. Som figuren viser kan det forventes at 20 pasienter undersøkes i en 12 timer periode. Det daglige energiforbruket til CT-maskinen i systemtilstanden *skann* kan da forventes å være 20 ganger det av energibehovet som trengs for å gjøre en CT-undersøkelse av buken til en gjennomsnittspasient. Et *skann*, slik rapporten [22] beskriver systemtilstanden, består av flere faser. Først føres pasienten inn i gantryen, før radiografen kan ta et topogram. Så planlegges og utføres skannet, før CT-maskinen kan rekonstruere skannet. Til slutt kjøres pasienten ut av gantryen. Effektløpet under et slikt *skann* er vist i eksempelet i figur 13.



Figur 12 Forventet utnyttelse av en CT-maskin, COCIR [22]



Figur 13 Eksempel på effektløpet til en CT under et skann [22]

## 3 UPS

For å sikre at en kritisk elektrisk last mottar en avbruddsfri kraftforsyning, benyttes en UPS. Dette er utstyr som normalt plasseres et sted mellom nettleverandørens tilførsel og den kritiske lasten. Hvis det skulle bli et avbrudd i spenningen inn på UPSen, eller spenningen skulle falle utenfor godtatte verdier, vil UPSen nesten øyeblikkelig kunne bytte om til å drifte lasten fra sitt eget energilager. Slike UPSer kommer i flere forskjellige størrelser, fra små enheter på noen hundre voltampere egnet for å drifte en PC, til store enheter dimensjonert for å kunne drifte store datasenter eller bygninger og da gjerne i kombinasjon med lokale generatorer tilkoblet forbrenningsmotorer. Det finnes primært to ulike teknologier som brukes for å sikre avbruddsfri kraftforsyning til lasten. Disse er [23, s. 11], [24]:

- Statisk UPS: Benytter kraftelektronikk sammen med et energilager for å sikre avbruddsfri kraft til lasten.
- Roterende UPS: Roterende elektrisk maskin, ofte i form av en synkrongenerator, sikrer avbruddsfri kraft til lasten. Maskinen er tilkoblet et energilager i form av et roterende svinghjul. Dette bremses ned når ytre nett forsvinner, og synkrongeneratoren må forsyne lasten [25]. Roterende UPS vurderes ikke i denne masteroppgaven.

I denne rapporten sees det utelukkende på statisk UPS, så når det skrives UPS er det denne teknologien det siktes til. En slik statisk UPS består av flere individuelle komponenter. Hvordan disse komponentene er satt sammen til en funksjonell UPS omtales som UPSens topologi, og ikke alle topologier vil inneholde de samme kraftelektronikk- komponentene [26].

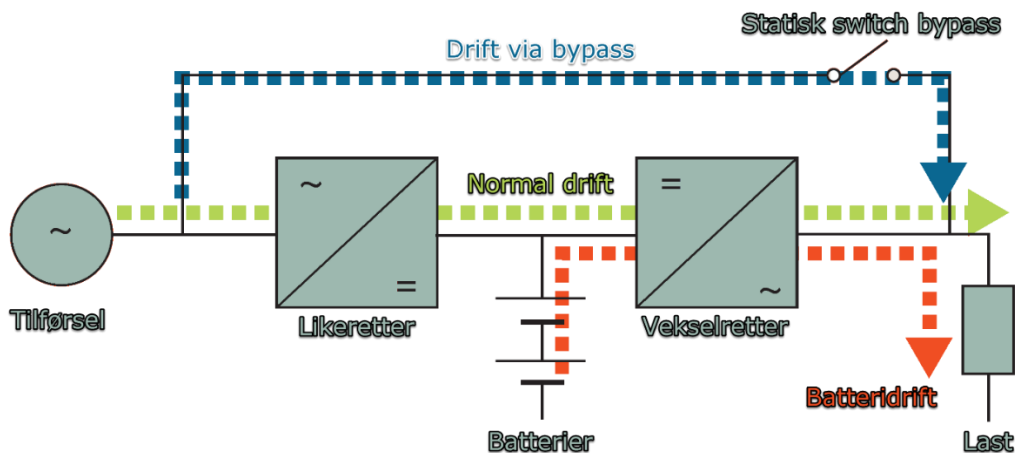
Ifølge den internasjonale standarden for klassifisering av ytelsen til en UPS (IEC 62040-3), kan disse klassifiseres innenfor tre hovedkategorier av topologier. Disse er [26]:

- Dobbeltkonverterende topologi. Også omtalt som online UPS.
- Linjeinteraktiv topologi.
- Standby topologi. Også omtalt som offline UPS.

Den mest utbredte topologien for store UPSer er dobbeltkonverterende (online) UPS [27]. I fordypningsprosjektet som ledet frem til denne masteroppgaven ble det konkludert med at dobbeltkonverterende UPS er den best egnede topologien om lasten er en CT-maskin [3]. Det forutsettes at dette er UPS-topologien som blir brukt om CT-maskiner skal forsynes med avbruddsfri kraft.

### 3.1 Oppbygning; dobbeltkonverterende UPS

Figur 14 viser en prinsippskisse for hovedkomponentene som normalt inngår i en dobbeltkonverterende UPS. Hovedkomponentene i denne vil være en likeretter, et energilager, en vekselretter og en statisk switch. **Likeretteren** konverterer vekselspenningen fra forankoblet nett til DC, som så lader energilageret og/eller forsyner vekselretteren lasten er tilkoblet [23, s. 35]. Den **statiske switchen** styrer om lasten skal forsynes fra vekselretteren, eller om lasten skal forsynes direkte fra tilkoblet nett. Den siste situasjonen omtales heretter som bypass og er markert med blått i figur 14.



Figur 14 Prinsippskisse dobbeltkonverterende online UPS [24]

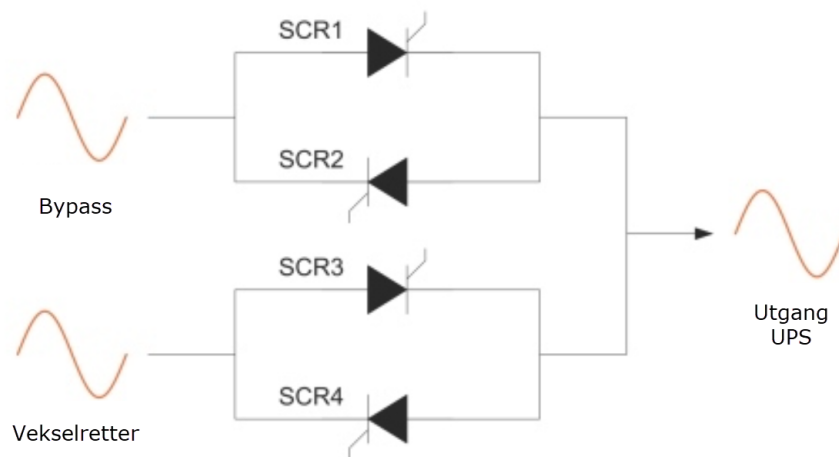
Når ytre nett svikter må UPSen drifte lasten fra sitt eget **energilag**. Tradisjonelt benyttes batterier til dette, men det finnes også mange andre former for energilag som kan være formålstjenlig.

**Vekselretteren** i en UPS består normalt av en spenningskildeomformer (*Voltage Source Inverter, VSI*). Dette er en type omformer som har en rekke applikasjoner, bl.a. i utgangen på en UPS. En VSI består av flere halvlederbrytere [28]. Moderne vekselrettere benytter hovedsakelig *Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBT)* for å «klippe» opp DC-spenningen, og omforme den til AC [23, s. 52]. Puls- bredde modulasjon (PWM) benyttes for å «klippe» opp DC spenningen, slik at resulterende spenning over tid blir tilsvarende sinusformet [23, s. 57].

Halvlederbrytere i en UPS vil ta skade om de overbelastes over tid. Derfor trengs det en strategi for å beskytte disse. En vekselretter av typen VSI kan regulere effektivverdien til AC-spenningen den genererer. Dette gjøres ved å endre puls- bredde modulasjonen slik at hver puls får en kortere varighet. En VSI kan derfor beskytte seg mot overbelastning ved å redusere effektivverdien til vekselspenningen ut. Normalt vil det være en viss tidsforsinkelse fra overstrøm som leder til overbelastning inntreffer, til spenningen rampes ned [23, s. 31].

Den **statiske switchen** er en bryter som har som hovedoppgave å hurtig koble om fra vekselretteren til bypasslinjen om det er behov for dette. Denne bryteren må kunne koble om svært hurtig, og derfor benyttes hovedsakelig tyristorer til dette. En statisk switch må bestå av minst to tyristorer i antiparallell, slik at strømmen kan gå begge veier. Tyristorer oppfører seg likt til dioder, men kan styre nøyaktig når de skal begynne å lede. En tyristor kan begynne å lede når den er positiv forspenning over den, og når et triggersignal i form av en liten strøm går inn i gaten. Tyristoren vil ikke slutte å lede før strømmen gjennom den blir null [29, s. 512].

Når vekselretteren forsyner lasten med spenning, trigges tyristor 3 og 4 i figur 15. Skal derimot ytre nett forsyne lasten, må tyristor 1 og 2 trigges. For å sikre at lasten ikke mister spenning under et bytte mellom disse to kildene vil det være en kort periode hvor både tyristor 1, 2, 3 og 4 er trigget samtidig. Disse to kildene opererer da i parallell og omkoblingen blir dermed blinkfri [23, s. 66].



**Figur 15 Prinsipiell utforming statisk switch [23, s. 66]**

### 3.2 Virkemåte; dobbeltkonverterende UPS

En dobbeltkonverterende UPS, slik som illustrert i figur 14, vil i normalt drift måtte la all effekten som skal til lasten flyte gjennom både like- og vekselretteren. Siden effekten flyter gjennom to ledd med omformere kalles denne UPS-topologien for dobbeltkonverterende.

Så lenge ytre nett er til stede og har en god nok spenningskvalitet, vil både lasten og UPSens energilager få effekten sin gjennom likeretteren. Skulle derimot spenningskvaliteten bli uakseptabel, eller ytre nett forsvinne helt, vil UPSen koble om til å drifte lasten fra sitt eget batteri [23, s. 28]. Dette er markert med rødt i figur 14.

Hvis det oppstår en situasjon hvor vekselretteren ikke kan tilføre nok energi til lasten som befinner seg nedstrøm av denne, vil den statiske switchen koble om *blinkfritt* slik at lasten forsynes fra oppstrøms nett (se bypass i figur 14). Dette vil kunne gjelde både for nedstrøms kortslutning og ved annen overbelastning av vekselretteren. Avhengig av oppsettet til UPSen kan denne automatisk koble lasten tilbake på vekselretteren etter at en feil- eller overbelastningssituasjon har opphørt [23, s. 31].

En dobbeltkonverterende UPS i normal drift kan ha full kontroll på utgangsspenningsens amplitude og frekvens. Denne UPSen kan derfor klassifiseres som en *Voltage and Frequency Independent (VFI)* UPS iht. IEC 62040-3 [26]. Denne UPS-topologien kan også leveres med en funksjon hvor den driftes i *eco-modus* eller *avansert ecomodus*. I disse modusene vil effekten ved normaltstand flyte gjennom den statiske switchen. Dette betyr at spenning og frekvens vil være lik den av det oppstrøms nettet, så lenge denne er innenfor akseptabelt område [30]. UPSer som driftes på denne måten klassifiseres som *Voltage and Frequency Dependent (VFD)* iht. IEC 62040-3 [26].

### 3.3 UPS med og uten transformator

I tillegg til de komponentene som inngår i prinsippskissen for dobbeltkonverterende UPS (figur 14), trengs ytterligere komponenter for å få samme spenningsnivå på inn- og utgangen til UPSen. I en 3 faset dobbeltkonverterende UPS må spenningen omformes to ganger. Først gjennom en likeretter, hvor DC spenningen ut vil være 1,35 ganger det AC-spenningen inn var. Hvis denne DC-spenningen nå skal omformes tilbake til en AC-spenning vha. PWM, må hele sinusspenningen modelleres innenfor spenningsnivået til DC-spenningen. Dette gjør at amplituden til AC-spenningen ut av vekselretteren ikke kan

få en verdi større enn halvparten av DC-spenningen. Om det benyttes andre tiltak vil derfor spenningen ut av vekselretteren i figur 14 aldri kunne bli mer enn 48% av spenningen inn på likeretteren [23, s. 73]. Følgende sammenhenger gjelder:

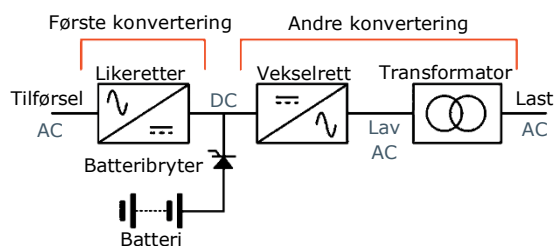
Likeretter:

$$U_{ac\ inn\ UPS} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} U_{dc\ likeretter}$$

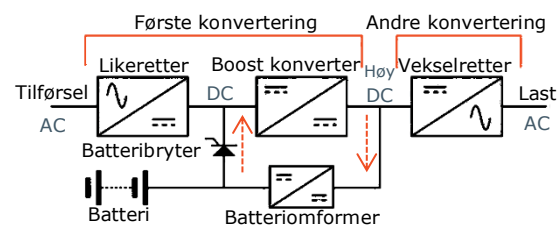
Vekselretter:

$$U_{ac\ ut\ UPS} = \frac{U_{dc\ vekselretter}}{2\sqrt{2}} = \frac{3}{2\pi} U_{ac\ inn\ UPS}$$

For å komme rundt denne problemstillingen benyttet eldre UPSer en transformator etter vekselretteren, slik vist i figur 16, for at inn og utgangsspenningen på UPSen skulle ha samme spenningsnivå. I dag er derimot bransjestandarden at UPSer installeres uten noen transformatorer. Isteden brukes en boost konverter, slik illustrert i figur 17, som øker DC- spenningen slik at AC- spenningen inn og ut kan være på samme nivå [23, s. 74].



**Figur 16 Dobbeltkonverterende UPS med transformator [31].**



**Figur 17 Dobbeltkonverterende UPS uten transformator [31].**

En moderne UPS vil derfor inneholde flere komponenter enn det prinsippsskissen i figur 14 skulle indikere. Dette har noen praktiske innvirkninger. Siden UPSen i figur 17 nå har fått en boost konverter er det ikke nødvendig å styre hvilken DC- spenning likeretteren leverer ut. Derfor kan denne nå bestå av enkle dioder, slik at DC spenningen ut av likeretteren varierer med AC- spenningen inn. Boost konverteren tar den uregulerte DC- spenningen, og løfter denne til et høyere spenningsnivå som i praksis blir uavhengig av variasjoner i spenningen inn på UPSen [23, s. 74]. Dette leddet er det første av to omforminger som gjøres i en dobbeltkonverterende UPS.

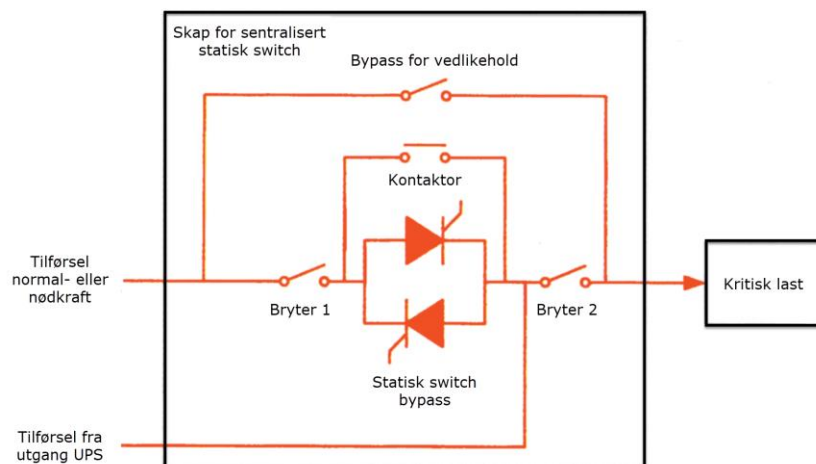
Det benyttes også en separat batterilader, tilkoblet den regulerte DC- spenningen. Denne laderen reduserer den høye DC- spenningen ned til en ladespenning som er tilpasset tilstanden til batteriene. Denne laderen fører med seg to fordeler: (1) Den gjør at batterianlegget i større grad kan tilpasses det faktiske behovet, ved å legge til eller trekke fra et par celler. Og (2) en slik batterilader sørger for at batteriene ikke utsettes for noen AC- rippel i spenningen de tilføres. En slik rippel er ofte en av hovedgrunnene til at batterier prematurt går i stykker. Når tilførselen inn på likeretteren svikter, eller faller utenfor godtarde spenningsparametere, vil batteriene øyeblikkelig bli koblet til den uregulerte DC- spenningen. Dette gjøres via batteribryteren. På denne måten vil boost konverteren få tilført spenning, og vekselretteren mottar kontinuerlig regulert DC- spenning slik at funksjonen til lasten opprettholdes [23, s. 75].



### 3.4 Sentralisert statisk switch

Når flere UPSer skal parallellkobles kan det enten benyttes en statisk switch pr. UPS, eller det kan benyttes en sentralisert statisk switch som sikrer en felles bypasslinje for begge UPSene. En slik sentralisert statisk switch gir tre mulige forsyningsveier frem til lasten: (1) Enten direkte fra UPS-utgangen, (2) normal- eller nødkraft via den statiske switchen/ kontaktoren, eller (3) normal- eller nødkraft via bypassen for vedlikehold. Ved normal drift vil bryter 1 og 2 i figur 18 være lukket, men bryteren for bypass vedlikehold er åpen.

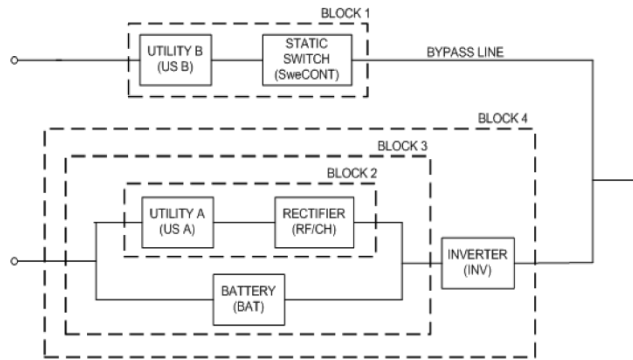
Avhengig av ytelsen til den sentraliserte statiske switchen, kan selve switchen være parallellkoblet med en kontaktor som aktiveres sammen med switchen. Dette er vist i figur 18. En slik konfigurasjon vil redusere tiden hvor strømmen flyter gjennom kraftelektronikken. Dette vil i sin tur gjøre at det kan benyttes en statisk switch ratet for relativt lite effekt, selv om lasten er effektkrevende. Et slikt grep benyttes for å redusere kostnadene for den sentraliserte statiske switchen [23, s. 90].



**Figur 18 Typisk utforming av sentralisert statisk switch [23, s. 89]**

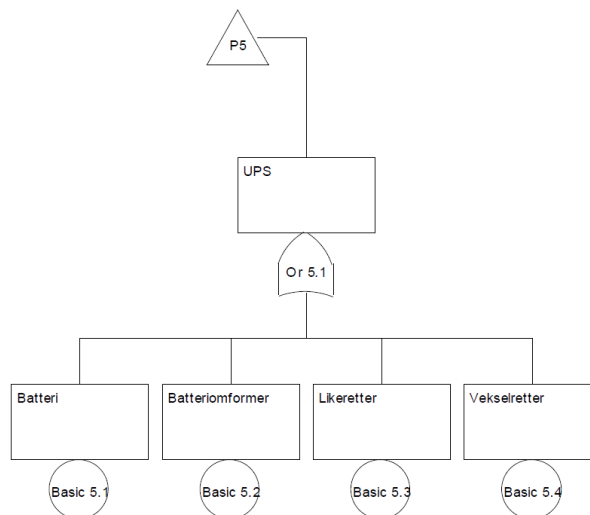
### 3.5 Pålitelighet ved UPS, tidligere forskning og arbeider.

I konferanse-artikkelen *Reliability and Availability Modelling of Uninterruptible Power Supply (UPS) Systems Using Monte-Carlo Simulation* [32] presenteres resultatene fra simuleringer basert på Monte-Carlo metoden. Artikkelen *Sensitivity Analysis of the AC Uninterruptible Power Supply (UPS) Reliability*[33] tar for seg hvordan påliteligheten til forskjellige UPS topologier kan beregnes ved hjelp av pålitelighetsnettverk. Den inneholder i tillegg en følsomhetsanalyse av hvordan MTBF for de enkelte komponentene påvirker hele UPSen som et system. Begge disse artiklene ([32], [33]) benytter pålitelighetsnettverket i figur 19 for sine beregningen av påliteligheten til en dobbeltkonverterende UPS med bypass. Her er det verd å merke seg at forfatterne av artiklene baserer seg på at det er to separate og uavhengige tilførsler frem til UPSen. Det er derfor en modifisert utgave av dette nettverket som vil bli benyttet i denne masteroppgaven.



**Figur 19 Pålitelighetsnettverk dobbeltkonverterende UPS med bypass [32], [33].**

I rapporten *Pålitelighet til nødstrømsforsyning* [34] har SINTEF Energi beregnet påliteligheten til tre ulike løsninger for nødstrømsforsyningen ved et bestemt norsk sykehus. En viktig del i nødstrømsforsyningen frem til medisinsk område gruppe 2, er UPSene som inngår. For kjernen i en dobbeltkonverterende UPS, dvs. ekskl. bypasslinjen, har denne rapporten satt opp følgende feiltre:



**Figur 20 Feiltre dobbeltkonverterende UPS [34]**

Ut fra beregningene på de komplette feiltreene for aktuelle sykehus i rapporten [34], har forfatteren fått følgende resultater for strømforsyningen inne på operasjonssalen (medisinsk område gruppe 2):

Systemløsning:	MTBF [år]	Årlig utlignelighet [min/år]	Utlignelighet pr. avbrudd [time]
Alternativ 1	245	3,78	15,4
Alternativ 2	185	4,02	12,4
Alternativ 3	249	3,77	15,6

**Tabell 4 Gjennomsnittlig tid mellom feil og utlignelighet for tre systemløsninger for strømforsyningen til medisinsk område gruppe 2 [34] .**

I fordypningsprosjektet som ledet opp til denne masteroppgaven ble egnetheten til ulike UPS- topologier studert med tanke på at de skulle forsyne en CT-maskin. Dette fordypningsprosjektet munnet ut i rapporten *Statisk UPS i strømtilførselen til CT- Vurderinger av ulike UPS- topologier inn i en sykehusinstallasjon* [3].

Denne rapporten [3] konkluderte med at den best egnede UPS- topologien var en dobbeltkonverterende UPS. Det var flere momenter som ledet opp til denne konklusjonen:

- UPSen må kunne reagere svært hurtig på et avbrudd i strømforsyningen fra nettleverandøren. For at CT-maskinen den forsyner ikke skal bli påvirket, må strømforsyningen gjenopprettes i ca. 5 millisekunder. Dobbeltkonverterende UPS er en av få topologier som klarer å respondere hurtig nok.
- Dobbeltkonverterende UPSer kan, om dette spesifiseres, driftes på to ulike måter når den forsyner CT-maskiner: Normal modus (Klasse VFI-SS-11 iht. IEC 62040-3) eller i avansert eco- modus (Klasse VFD-SS-11 iht. IEC 62040-3). I normalmodus vil effekten flyte gjennom like- og vekselretteren, mens i avansert eco- modus vil effekten flyte gjennom bypasslinjen, mens vekselretteren vil fungere som et aktivt filter som kompenserer for forstyrrelser i spenningens sinusform. Avansert eco- modus vil kunne øke UPSens reelle virkningsgrad.
- Dobbeltkonverterende UPS med bypass er en av de mest pålitelige UPS- topologiene.



# 4 Metode

## 4.1 Pålitelighetsanalyse

### 4.1.1 Strukturfunksjoner og pålitelighetsnettverk

Med pålitelighet menes den evnen en komponent eller et system har til å virke som tiltenkt. Denne evnen kan beskrives i pålitelighetsanalyse, ved sannsynlighetsmodeller og subjektive sannsynligheter sammen med vurderinger av bakgrunnskunnskapen som disse bygger på [35, s. 5], [36]. Hovedformålet med en pålitelighetsanalyse bør være å kunne frembringe informasjon som kan danne grunnlaget for en beslutningstaking [35, s. 8]. I dette rapporten presenteres bl.a. metodene og resultatene fra en pålitelighetsanalyse av strømforsyningen til CT-maskiner ved et tenkt norsk sykehus.

Enten det er en enkelt komponent, eller et helt system, så kan det sies å være i en av to tilstander. Enten er det *funksjonsdyktig*, eller så er det i *feiltilstand*. I det bestemte øyeblikket en komponent eller system går fra funksjonsdyktig til feiltilstand kan det sies at komponenten eller systemet *svikter*. Fra denne binære tankegangen kan en binær variabel  $x_i(t)$  benyttes for å representere tilstanden til en komponent  $i$  ved tidspunktet  $t$ . Denne uttrykke slik [37, s. 5]:

$$x_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{hvis komponenten er funksjonsdyktig ved tidspunktet } t \\ 0, & \text{hvis komponenten er i feiltilstand ved tidspunktet } t \end{cases}$$

Hvis tilstanden til alle komponentene som inngår i et system er kjent, vil det også være mulig å kjenne tilstanden til systemet. Dette gjør at tilstanden til et system kan beskrives ved en binær funksjon  $\phi(x)$ , hvor  $x$  er tilstandsvektoren for alle komponentene som inngår i systemet. Funksjonen  $\phi(x)$  kalles for *strukturfunksjonen for systemet*, og beskrives slik [37, s. 71]:

$$\phi(x) = \begin{cases} 1, & \text{hvis systemet er funksjonsdyktig ved tidspunktet } t \\ 0, & \text{hvis systemet er i feiltilstand ved tidspunktet } t \end{cases}$$

Hvis systemet består av en **seriestruktur**, dvs. et system hvor ingen av de  $n$  komponentene som inngår kan svikte uten at systemet havner i feiltilstand, så er dette strukturfunksjonen til systemet [37, s. 72]:

$$\phi(x) = x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n = \prod_{i=1}^n x_i$$

Hvis systemet derimot består av en **parallelstruktur**, dvs. et system hvor alle utenom en av de  $n$  komponentene som inngår kan svikte uten at systemet havner i feiltilstand, så ville dette vært strukturfunksjonen til systemet [37, s. 72]:

$$\phi(x) = 1 - (1 - x_1)(1 - x_2) \dots (1 - x_n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - x_i) = \prod_{i=1}^n x_i$$

Et system kan uttrykkes visuelt gjennom et pålitelighetsnettverk. En slik fremstilling vil vise funksjonssammenhengene til systemet og må ikke forveksles med et koblingsskjema [37, s. 73]. Hvis det eksisterer en sti fra venstre side til høyre side i

nettverket, hvor alle komponentene langs stien er i funksjonsdyktig tilstand, vil også systemet være funksjonsdyktig. Eksempelet i figur 19 for dobbeltkonverterende UPS viser et slikt pålitelighetsnettverk.

Nøyaktig når en komponent eller et system vil svikte kan vanskelig forutsies. Derimot kan sannsynlighetsregning benyttes hvis komponentene som systemet er bygd opp av svikter med eller annen statistisk regelmessighet. Tilstandsvariablene til de  $n$  komponentene som inngår i systemets strukturfunksjon kan nå ansees som stokastiske variabler. Tilstandsvektoren vil da bestå av  $X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)$ , mens strukturfunksjonen uttrykkes  $\phi(\mathbf{X}(t))$ . En viktig forutsetning nå er at de enkelte komponentene opptrer uavhengige av hverandre, slik at de kan modelleres som stokastisk uavhengige av hverandre. De sannsynlighetene som nå kan undersøkes er sannsynligheten for at henholdsvis en individuell komponent  $i$ , eller systemet  $s$  er funksjonsdyktig. Når komponentene er uavhengige av hverandre, vil systempåliteligheten bli en funksjon av sannsynligheten til de individuelle komponentene. Disse uttrykkes slik [35, s. 147–148]:

$$p_i(t) = P(X_i(t) = 1), \quad i = 1, \dots, n$$

$$\mathbf{p}(t) = p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)$$

$$p_s(t) = h(\mathbf{p}(t)) = P(\phi(\mathbf{X}(t)) = 1)$$

Systempåliteligheten til en serie- og en parallelstruktur blir henholdsvis [35, s. 149–150]:

$$\text{seriestruktur: } h(\mathbf{p}(t)) = \prod_{i=1}^n p_i(t) \qquad \text{parallelstruktur: } h(\mathbf{p}(t)) = \prod_{i=1}^n p_i(t)$$

Består derimot systemet av en oppbygging hvor  $k$  av  $n$  mulige komponenter må være funksjonsdyktige for at systemet skal være funksjonsdyktig, så vil dette være en  $k$ -av- $n$  struktur. Hvis, og bare hvis, alle komponentene som inngår har identisk pålitelighet, kan systempåliteligheten uttrykkes slik [35, s. 151]:

$$k \text{ av } n \text{ struktur: } h(\mathbf{p}(t)) = \sum_{j=k}^n \binom{n}{j} p(t)^j (1 - p(t))^{n-j}$$

Birnbaums mål for pålitelighetsmessig betydning er en partialderivering av systempåliteligheten med tanke på komponent  $i$  i systemet. Dette uttrykket beskriver sannsynligheten for at systemet er i en slik tilstand ved tidspunkt  $t_0$ , at komponent  $i$  er kritisk for om systemet er funksjonsdyktig eller ei. Birnbaums mål for pålitelighetsmessig betydning uttrykkes slik [37, s. 145–149]:

$$I^B(i|t_0) = \frac{\partial h(\mathbf{p}(t_0))}{\partial p_i(t_0)}$$

Fra Birnbaums mål for pålitelighetsmessig betydning kan frekvensen til svikt for systemet beregnes. Fra dette uttrykket som beskriver sannsynligheten for om systemet er kritisk med tanke på komponent  $i$ , kan det multipliseres med to andre faktorer. Disse er  $p_i(t)$  (sannsynligheten for at komponent  $i$  er funksjonsdyktig) og  $\lambda_i$  (sviktintensiteten til komponent  $i$ ). Dette gjør at frekvensen til svikt for systemet kan skives slik [38]:

$$F_0 = \sum_i I^B(i) p_i \lambda_i$$

Innen pålitelighetsanalyse benyttes noen sentrale begreper, disse er:

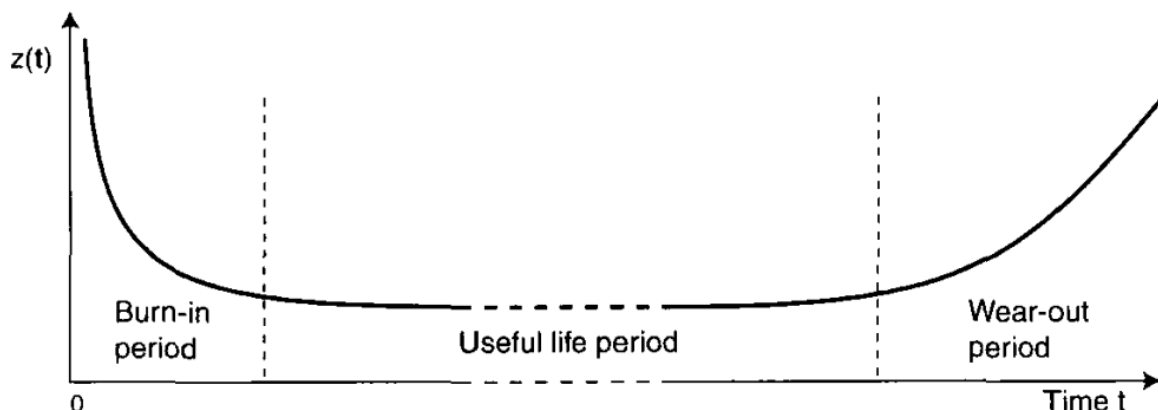
- *Svikt* defineres som et opphør av muligheten til å utføre krevd funksjon.
- Midlere tid til svikt eller *Mean Time To Failure (MTTF)* beskriver gjennomsnittlig levetid for en komponent [35, s. 7].
- Midlere tid til fullført reparasjon eller *Mean Time To Repair (MTTR)*. Beskriver nedetiden etter en svikt. Esrattes med Midlere nedetid eller *Mean Down Time (MDT)* om det ønskes å skille mellom tidsbruken til selve reparasjonen og den totale nedetiden [35, s. 7].
- Midlere tid mellom svikt eller *Mean Time Between Failure (MTBF)*. For dette uttrykket gjelder sammenhengen  $MTBF = MTTF + MTTR$  [37, s. 11]

Feilratefunksjonen beskriver hvor sannsynlig det er at en komponent har overlevd frem til tiden  $t$ , vil svikte i løpet av neste tidsintervall. Generelt sett er det umulig å forutse eksakt når svikten inntreffer, derfor vil  $T$  være en tilfeldig variabel med en tilhørende fordeling. Feilratefunksjonen  $z(t)$  er nå definert som [39, s. 23]:

$$z(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P(t < T \leq t + \Delta t | T > t)$$

Livsløpet til teknisk utstyr består hovedsakelig at tre faser; innkjøringsfasen, bruksfase og en fase hvor komponenten er utslitt. Figur 21 illustrerer typisk feilrate for tekniske komponenter [35, s. 21]. Hvis komponenten blir ivaretatt og vedlikeholdt i bruksfasen slik at tilstanden ikke forringes, kan det åpne for antagelsen om at feilraten i bruksfasen er tilnærmet konstant og uavhengig av tiden. Legger man denne antagelsen til grunn vil feilratefunksjonen  $z(t)$  være lik  $\lambda$ , noe som vil si at det kan antas at feilraten er eksponentialfordelt i dette området. Når denne antagelsen legges til grunn betyr det at komponenten antas å være så god som ny så lenge den fungerer og at svikt som oppstår er tilfeldig og uavhengig av alderen på komponenten. Når feilraten er konstant får man at [39, s. 24]:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{z(t)}$$



**Figur 21** Typisk graf for feilrate for teknisk utstyr, også kjent som "badekarkurve" [35, s. 21]

Har man feildata fra identiske komponenter som har vært driftet og utsatt for de samme ytre påvirkningene, så har man data fra et homogent utvalg av komponenter. For dette utvalget kan feilraten estimeres ut fra  $n$  antall feil og det akkumulerte antallet driftstimer

$\tau$  for alle komponentene. Det mest sannsynlige målet for feilraten  $\lambda$  estimeres da slik [39, s. 25]:

$$\hat{\lambda} = \frac{\text{Antall feil i utvalget}}{\text{Akkumulerte driftstimer i utvalget}} = \frac{n}{\tau}$$

For reparerbare systemer vil det være tilgjengeligheten til systemet  $A_s(t)$ , og ikke systempåliteligheten  $p_s(t)$  som blir undersøkt. Tilgjengeligheten  $A_i(t)$  til en reparerbar komponent  $i$  beskriver sannsynligheten for at denne er funksjonsdyktig ved tidspunktet  $t$ . Både fordelingen til levetiden og fordelingen til reparasjonstiden vil påvirke uttrykket for den tidsavhengige tilgjengeligheten [37, s. 127].

$$A_i(t) = P(\text{Komponenten } i \text{ er funksjonsdyktig ved tidspunktet } t) = P(X_i(t) = 1)$$

Den gjennomsnittlige tilgjengeligheten for en komponent  $i$  vil da være lik [37, s. 128]:

$$A_{AV,i} = \frac{MTTF_i}{MTTF_i + MTTR_i}$$

Gitt at komponentens levetid er uavhengig og eksponensialfordelt med sviktintensiteten  $\lambda$ , og at reparasjonstiden også er uavhengig og eksponensialfordelt med intensiteten  $\mu$ . Da vil den tidsavhengige tilgjengeligheten være gitt ved [37, s. 271]:

$$A_i(t) = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} + \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} e^{-(\lambda_i + \mu_i)t}$$

Mens grensetilgjengeligheten vil bli tilsvarende den gjennomsnittlige tilgjengeligheten [37, s. 271]:

$$A_i = \lim_{t \rightarrow \infty} A_i(t) = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} = \frac{\frac{1}{\bar{\lambda}_i}}{\frac{1}{\bar{\lambda}_i} + \frac{1}{\mu_i}} = \frac{MTTF_i}{MTTF_i + MTTR_i}$$

Ut fra de overstående formlene kan det enkelt sees at en komponent  $i$  vil ha en tilgjengelighet på 1 ved  $t = 0$ , mens den vil konvergere mot den gjennomsnittlige tilgjengeligheten relativt hurtig for en komponent hvor reparasjonsraten er mye større enn sviktintensiteten. Av denne grunnen er det vanlig å bruke bare symbolet  $A$  for både grensetilgjengeligheten og den gjennomsnittlige tilgjengeligheten [37, s. 128].

I denne oppgaven brukes ingen tidsavhengige tilgjengeligheter i beregningene. Det benyttes kun gjennomsnittlige tilgjengeligheter for de komponentene som inngår i pålitelighetsnettverket. Siden et pålitelighetsnettverk kun er egnet til å gi et statisk bilde av hvilke årsaker som fører til systemsvikt, og ikke er egnet for å modellere dynamiske systemer [35, s. 376] må en alternativ fremgangsmåte benyttes for å modellere de delene av strømforsyningen som opptrer dynamisk.

#### 4.1.2 Markov-modell i pålitelighetsanalyse

En to-tilstandsmodell, slik som metoden for pålitelighetsnettverk er, gir ikke alltid en tilstrekkelig nøyaktig beskrivelse av systemet det representerer. For systemer som kan befinne seg i flere tilstander enn funksjonsdyktig eller feiltilstand, vil det ofte være nyttig å bruke Markov-modeller. Dette blir spesielt aktuelt når systemet inneholder redundante komponenter eller komponenter i en stand-by-tilstand [37, s. 159], [40].

En markovprosess har ingen "hukommelse" for hvilken tilstand systemet tidligere har vært i. Dette gjør at et system som er i tilstanden  $i$  ved tidspunktet  $t$  kun er påvirket av overgangssannsynligheten fra denne til en annen tilstand  $j$ . Når alle overgangssannsynlighetene ikke påvirkes av tiden  $t$  (f.eks. slik illustrert i badekarkurven



i figur 21) kan overgangssannsynligheten fra starttilstanden  $i$  til tilstand  $j$  ved et nytt tidspunkt  $v$  skrives slik [37, s. 160]:

$$P_{ij}(v) = P(X(t+v) = j | X(t) = i) \quad \begin{matrix} t, v > 0 \\ i, j = 0, 1, 2, \dots, r \end{matrix}$$

Fra dette kan det defineres en overgangsintensitet  $a_{ij}$  fra starttilstand  $i$  til tilstand  $j$  slik at [37, s. 161]:

$$a_{ij} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(X(t+\Delta t) = j | X(t) = i)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_{ij}(\Delta t)}{\Delta t} = \dot{P}_{ij}(0)$$

For et system med  $r$  antall tilstander kan alle overgangsintensitetene skrives på matriseform, slik at [41]:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -a_{00} & a_{01} & a_{02} & \dots & a_{0r} \\ a_{10} & -a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1r} \\ a_{20} & a_{21} & -a_{22} & \dots & a_{2r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{r0} & a_{r1} & a_{r2} & \dots & -a_{rr} \end{bmatrix}$$

Hvor  $a_{jj}$  er summen av overgangsintensitetene som leder vekk fra tilstand  $j$ , slik at [37, s. 163]:

$$a_{jj} = \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq j}}^r a_{jk}$$

Gitt at starttilstanden  $i$  er kjent, og at sannsynligheten for å befinne seg i en av de  $k$  andre tilstandene er lik 0, så kan dette uttrykkes slik [37, s. 163]:

$$\begin{aligned} P_i(0) &= P(X(0) = i) = 1 \\ P_k(0) &= P(X(0) = k) = 0, \quad k \neq i \end{aligned}$$

Siden starttilstanden  $i$  er kjent, kan notasjonen forenkles, slik at sannsynligheten for å befinne seg i tilstand  $j$  ved tidspunktet  $t$  uttrykkes  $P_j(t)$ . Dette gjør at tilstandsligningen for systemet kan skrives på matriseformen [35, s. 311]:

$$\mathbf{P}(t) \cdot \mathbf{A} = \dot{\mathbf{P}}(t)$$

Hvor:

$$\mathbf{P}(t) = [P_0(t), \dots, P_r(t)]$$

$$\dot{\mathbf{P}}(t) = [\dot{P}_0(t), \dots, \dot{P}_r(t)]$$

Den tidsavhengige løsningen for systemet vil ta formen til en difrensialligning og kan uttrykkes slik [41]:

$$\mathbf{P}(t) = \mathbf{P}(0) e^{t\mathbf{A}}$$

For en del systemer er ikke den tidsavhengige løsningen av spesiell interesse. For et system som har vært i drift i lengere tid, med mulighet til å vandre mellom alle de ulike tilstandene, vil sannsynligheten for å være i en bestemt tilstand være lite avhengig av starttilstanden. Desto lengre systemet får stå og vandre mellom de ulike tilstandene, desto mindre avhengig blir det av starttilstanden. Markov-prosessen vil konvergere mot stasjonære sannsynligheter for å befinne seg i de ulike tilstandene [37, s. 164].

Tilstandsligningen for stasjonær tilstand kan uttrykkes slik [35, s. 315]:

$$P(t) \cdot A = 0$$

Når stasjonærsannsynlighetene til prosessen er kjent, kan det videre settes opp en rekke uttrykk som kan være av interesse. Disse er bl.a. [35, s. 321]:

- Systemets gjennomsnittlige tilgjengelighet  $A_s$ . De tilstandene hvor systemet kan sies å fungere er medlem av mengden  $B$ , mens de resterende vil tilhøre mengde  $F$ . Da kan  $A_s$  uttrykkes slik:

$$A_s = \sum_{j \in B} P_j$$

- Frekvensen til systemsvikt  $\omega_F$ . Frekvensen beskriver hvor ofte systemet går fra en tilstand i mengde  $B$  til en tilstand i mengde  $F$ .

$$\omega_F = \sum_{j \in B} \sum_{k \in F} P_j \cdot a_{jk}$$

- Gjennomsnittlig nedetid for systemet  $MDT_s$ . Tiden det tar fra systemet går inn i en av tilstandene i mengde  $F$  til det går over i en av tilstandene tilhørende mengde  $B$ .  $MDT_s$  vil da være utilgjengeligheten til systemet delt på frekvensen til hvor ofte dette skjer. Uttrykkes:

$$MDT_s = \frac{1 - A_s}{\omega_F}$$

- Gjennomsnittlig tid mellom svikt  $MTBF_s$  er tiden det tar mellom hver gang man går fra en fungerende tilstand til en ikke-fungerende tilstand. Uttrykkes:

$$MTBF_s = \frac{1}{\omega_F}$$

## 4.2 Modell av strømtilførsel frem til CT

For å kunne kvantifisere risikoen for avbrudd i strømtilførselen til CT ble det laget en modell av strømtilførselen til en fiktiv avdeling for bildediagnostikk. Siden både forfatter, institutt og veileder ønsker at denne rapporten skal være fritt tilgjengelig, har det ikke vært mulig å se på reelle anlegg og de sårbarhetene som disse måtte ha.

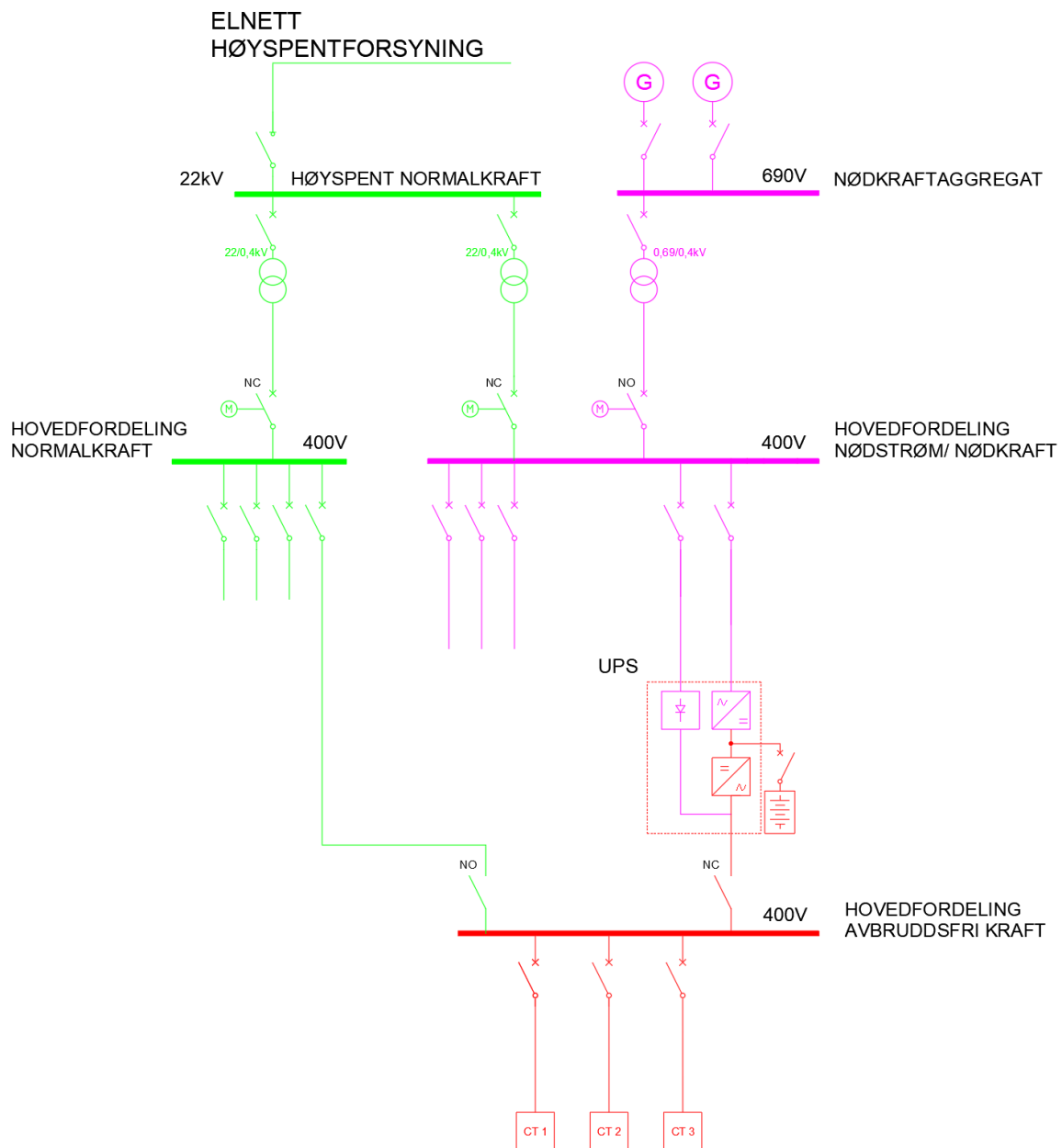
Modellen er representativ for norske sykehus i den grad at den viser en av flere vanlige løsninger for strømforsyningen. Valgte løsning, der det kreves, møter alle minstekravene til nødstrømsforsyning fremsatt i normen NEK 400-5-56 [2]. Modellen baserer seg også på etablerte praksiser hos COWI, og er inspirert av reelle systemskjemaer fra flere nyere sykehusprosjekter [42]. Skisse av sykehusmodellen sees i figur 22, og består av følgende elementer:

- **En enkelt forsyning fra nettleverandøren.** Sykehus er normalt tilkoblet høyspentnettet med en eller flere dedikerte transformatorer.
- **To transformatorer mot nettleverandør.** En transformator går til hovedfordeling normalkraft og en går til hovedfordeling nødkraft. Det er mulig å bare ha en transformator mot nettleverandørens høyspentnett, men denne blir da erfaringsmessig så stor at det ofte ikke inngår i nettleverandørens vanlige portefølje av transformatorer. Store, ukurante størrelser av transformatorer vil være vanskeligere å få tak i om det skulle være behov for utskiftning. Derfor reduseres forventet nedetid ved å benytte transformatorer i nettleverandørens standardutvalg.
- **To dieselaggregater.** Disse fungerer som sykehusets nødstrømskilder. Slike generatorer er ofte laget for å driftes på 690V IT nett, men andre spenningsnivå benyttes også [42]. Det kreves minimum to aggregater for et sykehus som driftes 24/7. Det må alltid være minst en nødstrømskilde tilgjengelig, også når det

utføres vedlikehold på et aggregat. Dette skyldes bl.a. dette kravet i NEK 400:2018 [2]:

- NEK 400-5-56-560.6.1: *"Følgende nødstrømkilder kan benyttes: [...] generatoranlegg uavhengig av den normale strømforsyningen"*

- **Hovedfordeling nødkraft.** Sykehuset vil ha en hovedfordeling for nødkraft. Fra denne hovedfordelingen forsynes både forbrukere av nødstrøm og reservestrøm. Det vil si at utstyr for opprettholdelse av liv og helse, men også annet utstyr hvor det er praktisk at strømforsyningen blir opprettholdt ved et avbrudd hos nettleverandøren, er forsynt fra samme hovedfordeling. Inne i denne hovedfordelingen sitter det en automatisk omkoblingsautomatikk (ATS). Denne enheten vil ved avbrudd eller betydelige forstyrrelser i normalkraftspenningen, starte prosessen med å koble hovedfordeling nødkraft over på drift fra nødstrømsgeneratorene.
- **Hovedfordeling normalkraft.** Denne hovedfordelingen forsyner utstyr som ikke er knyttet til kritiske operasjoner ved sykehuset. Benyttes det en enkelt UPS i strømtilførselen til en gruppe modaliteter vil det være naturlig å legge inn et manuelt bypass rundt UPSen, slik at det kan gjøres vedlikehold på denne uten at det går ut over produksjonen av røntgenundersøkelser.
- **En UPS** som forsyner  $n$  antall CT-maskiner. Denne kilden for avbruddsfri kraftforsyning er hovedfokuset i denne masteroppgaven. Modaliteter slik som CT defineres ikke som forbrukere av nødstrøm, men er isteden forbruker av reservekraft. Dette betyr at det ikke er krav til at det må brukes en løsning med dublerede UPSer. Det vil da være mulig å benytte en manuell bypass fra hovedfordeling normalkraft ved vedlikehold på UPSen, noe som ikke hadde vært tillatt om UPSen fungerte som nødstrømskilde for en last som var i bruk 24/7.



Krafttype	Farge
Normalkraft	
Nødkraft	
Avbruddsfri kraft	

Figur 22 Modell for strømforsyning av CT-maskiner

## 4.3 Modell for pålitelighet

### 4.3.1 Kilder for pålitelighetsdata

Utvalgte kilder for pålitelighetsdata som brukes i denne rapporten er listet opp under. Komplette oversikter over pålitelighetsdata benyttet i beregningen i denne rapporten finnes i vedlegg 2, 3 og 4.

- **OREDA** [39]  
OREDA (**O**ffshore & **O**nshore **RE**liability **D**Ata) er en prosjektorganisasjon med mellom 7 til 11 olje og gasselskaper som har samlet inn pålitelighetsdata fra sine installasjoner i mer enn 35 år. Disse pålitelighetsdataene er tilgjengelig via skytjenesten OREDA@Cloud, eller i håndbokformat (sist publisert i 2015) [43].
- **IEEE Std 493** [44]  
Boken IEEE Std 493 presenterer deg grunnleggende teorien om pålitelighetsanalyse til bruk ved planlegging og design av industrielle og kommersielle elektriske kraftdistribusjonssystemer. Boken inneholder en rekke pålitelighetsdata for elektrisk lavspenningsutstyr [45].
- **NVEs avbruddsstatistikk** [46]  
For avbrudd benyttes avbruddstatistikken til NVE for de siste 5 årene med publiserte data, dvs. perioden 2015 til 2022 [46].
- **Egne beregninger basert på målinger ved St. Olavs hospital**  
I tillegg til de overnevnte kildene brukes det egne beregninger for å si noe om sannsynligheten og hyppigheten for overbelastning av UPSens vekselretter.

### 4.3.2 Forenklet elektrisk modell for pålitelighetsanalyse

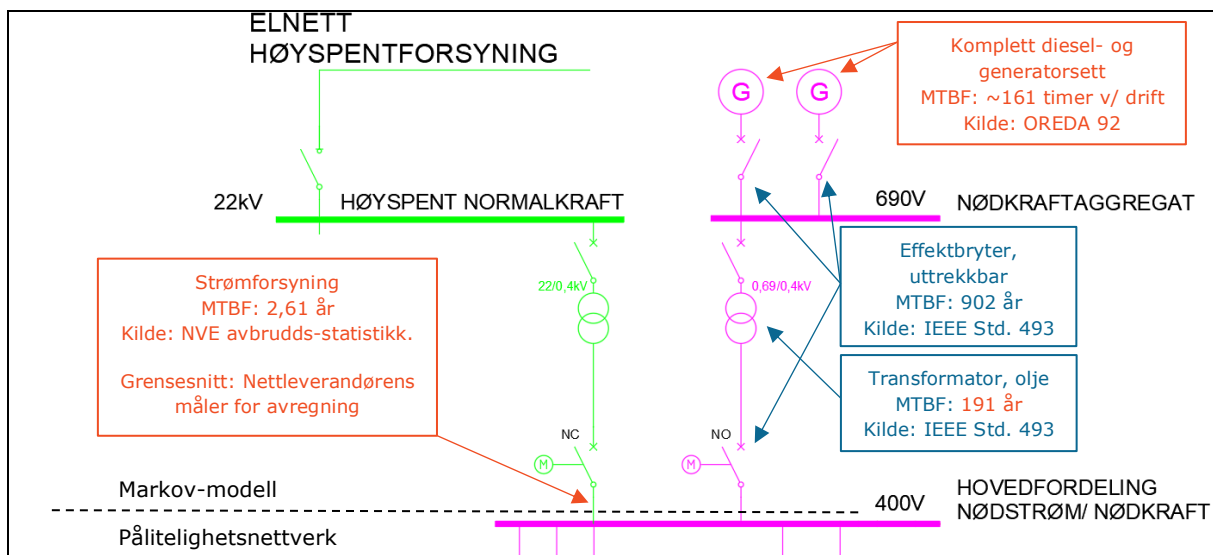
Påliteligheten til strømforsyningen som forsyner CT-maskinene vurderes ved hjelp av en forenklet hybridmodell av systemet i figur 22, hvor strømforsyningen er funksjonsdyktig om det ikke oppstår avbrudd i denne. Andre spenningsfenomener vurderes ikke.

Strømforsyningen frem til effektbryterne som forsyner UPSen i hovedfordeling nødkraft, modelleres ved hjelp av en Markov-modell. Systemet fra omkoblingsautomatikken og frem til hovedfordeling avbruddsfri kraft modelleres ved hjelp av et pålitelighetsnettverk.

Det er nødvendig å foreta en forenkling av pålitelighetsmodellen for strømforsyningen frem til CT-maskinene. Ved en gjennomgang av påliteligheten til de individuelle komponentene i den elektriske modellen, har komponenter med en MTBF på mer enn ti ganger bygningsmassens levetid (som er minst 60 år for sykehus [47]), blitt ekskludert fra pålitelighetsmodellen. Dette er illustrert i figur 23 og 24, hvor blå kommentarer viser komponenter som er ekskludert, mens røde kommentarer viser medtatte komponenter. En slik eksklusjon er ikke ideelt for pålitelighetsanalysen, men det vil gjøre det mulig å gjennomføre den nødvendige modelleringen uten at disse blir for uhåndterlige, slik at spesialprogramvare må benyttes.

En annen forenkling som gjøres, er at transformatoren mellom fordeling for nødkraftaggregatene og hovedfordeling nødkraft ignoreres. Begrunnelsen for dette er at denne rapporten ikke skal ta stilling til spenningsnivået på generatorene. Om disse er høyspente, skal ha 690V IT eller vanlig 400V TN er ikke tema her. Merk at denne forenklingen kan ha betydning for nødstrømmens pålitelighet, spesielt siden IEEE Std. 493 [44] har en MTBF på bare 191 år for denne komponenten.

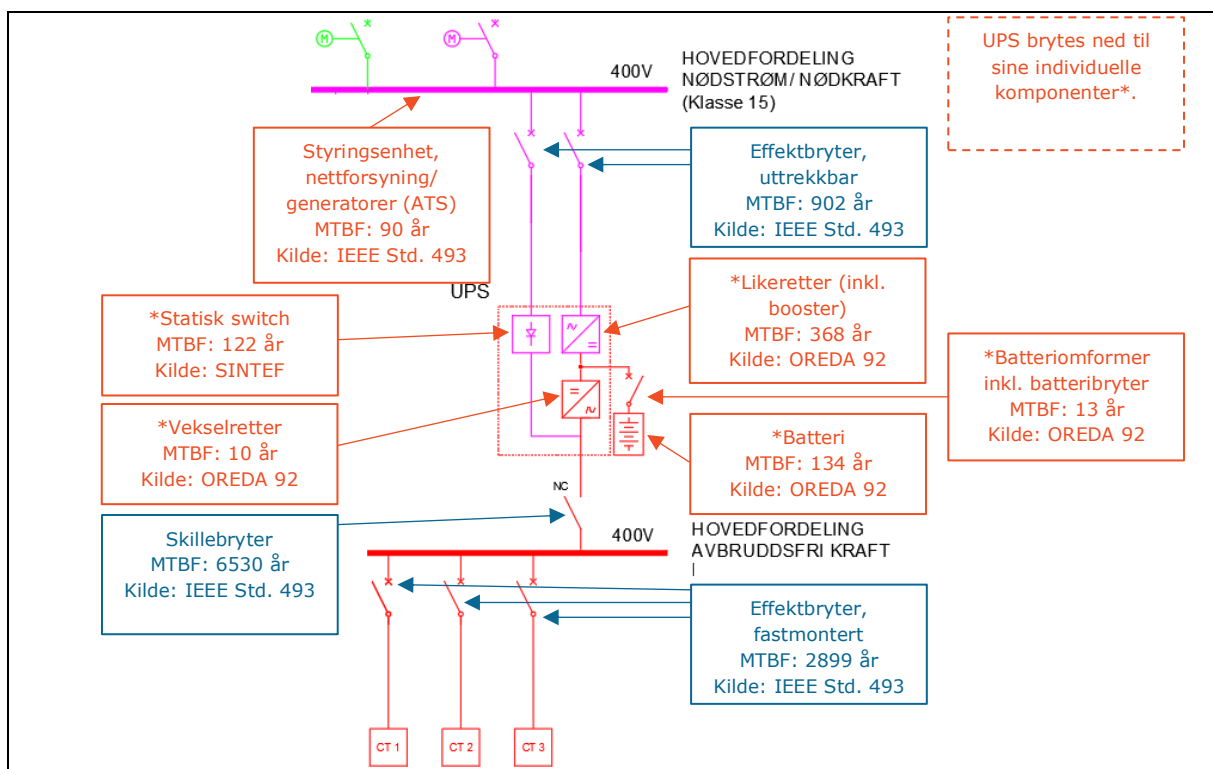
Alle kabler og strømskinner som inngår i den elektriske modellen neglisjeres i pålitelighetsberegningene. For det første indikerer IEEE Std. 493 [44] at kabler generelt sett vil ha en MTBF på 2037 år om strekket er 1000ft (305m). Dette er kabellengder som er i øvre sjikt for hva som kan forventes ut av en hovedfordeling, noe som gjør at MTBF sannsynligvis er mye høyere. For det andre er det umulig å forutse nøyaktig hvilke kabeltyper og dimensjoner som vil bli benyttet, men sannsynligvis vil funksjonssikker kabling inngå i oppbygningen av sykehusets nødstrøm. Siden dette er en kabel som tåler betydelig større ytre påkjenninger enn vanlig kabel, vil det være fornuftig å tro at MTBF pr. meter øker enda mer.



**Figur 23 Forenklinger og grensesnitt Markov-modell**

En rekke komponenter er tegnet inn i normalkraftforsyningen frem til hovedfordeling nødkraft, uten at de er direkte medtatt i pålitelighetsberegningene. Begrunnelsen for dette er at det må forventes at avbruddsstatistikken til NVE tar utgangspunkt i data rapportert inn fra alle de ulike målerne nettselskapene har installert hos kundene i kundegruppe 31, *Helse og sosialtjenester*. Derfor må grensesnittet mellom NVE sin statistikk og resten av sykehusets el-installasjon settes ved måleren, slik at svikt på inntakstransformator og brytere ikke blir regnet inn to ganger.

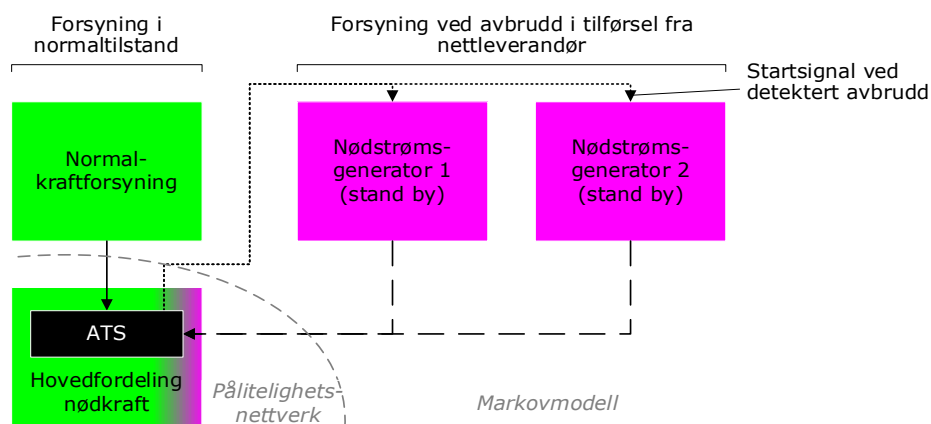
En komponent som ikke er tegnet inn i systemskjemaet, er den automatiske omkoblingsautomatikken (ATS) som er plassert inne i hovedfordeling nødkraft. Funksjonen og grensesnittet til denne er tegnet inn i figur 25.



**Figur 24 Forenklinger pålitelighetsnettverk**

### 4.3.3 Markov-modell for normalkraft- og nødstrømforsyning

I denne rapporten modelleres deler av sykehusets nødstrømforsyning som en Markovprosess, mens resten behandles ved hjelp av et pålitelighetsnettverk. Gitt kravet til en nødstrømforsyning, slik beskrevet i kap. 4.2, består nødstrømforsyningen av minst to aggregat. Hvert av disse kan alene drive alt påkrevd utstyr om forsyningen fra nettleverandøren svikter. Når ytre nett er til stede står normalt aggregatene i stand-by. Forsvinner forsyningen fra nettleverandøren, starter alle nødstrømsaggregatene opp. Disse må ta over strømforsyningen innen 25 sekunder for å tilfredsstille kravene til bl.a. omkoblingstid for *strømkilder for annet viktig utstyr og nødbelysningskurser* i medisinske områder gruppe 1 og 2 (jf. NEK 400:2018 7-710.560.6.103) [2].



**Figur 25 Blokkdiagram for komponenter tilhørende strømforsyning frem til HF nødskraft. Viser grensesnitt mellom Markov-modell og pålitelighetsnettverket.**

I hovedfordeling nødskraft sitter det en automatisk omkoblingsautomatikk (ATS) (Eng: *Automatic Transfer Switch*). Denne overvåker spenningskvaliteten som nettleverandøren leverer, og initierer oppstarten av nødstrømsaggregatene om det enten detekteres et avbrudd eller om spenningskvaliteten fra nettleverandøren blir for dårlig. Kravet til omkoblingstid er som kjent 25 sekunder. I løpet av denne tiden vil ATSen sende et oppstartssignal til nødstrømsgeneratorene, koble ut tilførselen fra nettleverandøren og koble inn tilførselen fra generatorene etter at disse har startet opp. Den vanligste løsningen for slik inn/ut- kobling er å benytte kontaktorer [48].

En slik kontaktorstyrt ATS kan svikte på mange forskjellige måter. Eksempelvis kan kontraktoren for normalkraften kan være sveiset fast, og ikke klare å koble fra nettet. Eller kontraktoren for nødstrømsaggregatene kan ha en brent spole og derfor klarer den ikke legge inn forsyningen fra aggregatene. Det kan også hende at selve PLSen som styrer denne automatikken har gått i stykker og det derfor aldri blir sent noe oppstartssignal i det hele tatt. Dette er forhold som IEEE Std. 493 [44] ikke sier noe om. Den posten (C4-100) som brukes for å beskrive ATSen gir bare sviktintensitet og reparasjonsrate for denne komponenten. Derfor antas den minst gunstige tolkningen av svikt for ATSen. En svikt i ATSen fører til et avbrudd i spenningen ut av hovedfordeling nødskraft.

Det er vanlig å programmere inn en tidsforsinkelse før startsignalet sendes til generatorene. En slik forsinkelse vil ofte være i området 3 til 5 sekunder. Hensikten med denne er å unngå at generatorene starter unødige om det bare var en kort spenningsdipp hos nettleverandøren, og ikke et lengere avbrudd [49].



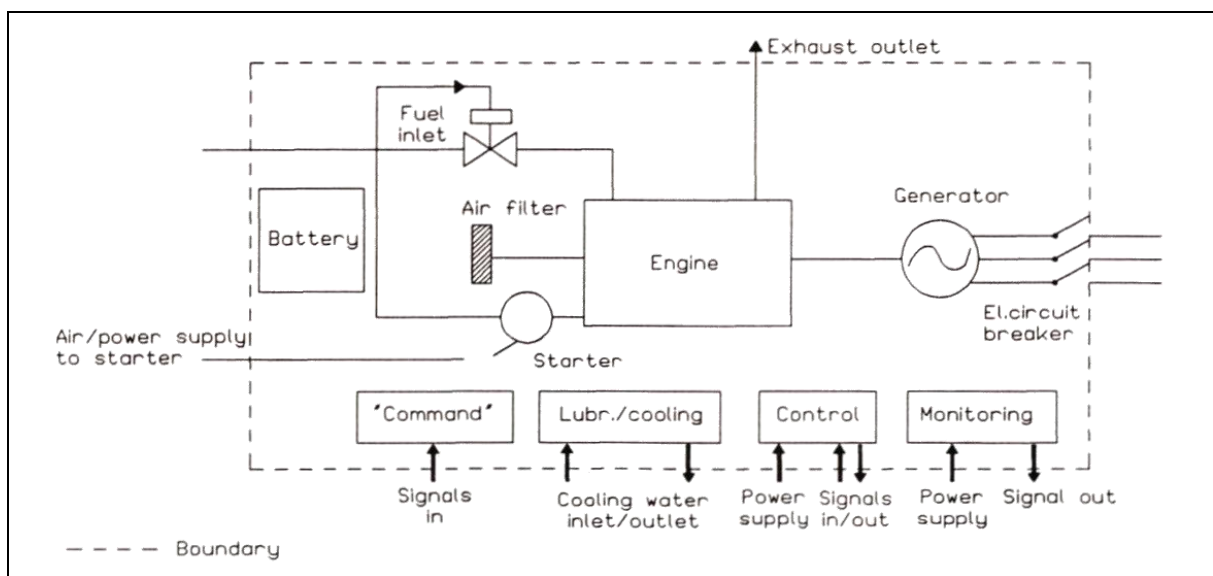
Den totale oppstartstiden fra et avbrudd inntreffer til nødstrømsaggregatene kan forsyne alle reserve- og nødstrømsforbrukere vil typisk være 10 sekunder, men kan i noen tilfeller strekke seg opp mot 15 sekunder [49]. I denne oppgaven legges det til grunn at forventet omkoblingstid for et aggregat er lik kravet i standarden NEK 400, nemlig 25 sekunder. Dette er en pessimistisk tolkning av hva som kan forventes av oppstartstider for aggregatene.

I denne oppgaven forutsettes det også at det benyttes utstyr for synkronisering mot nettleverandørens nett, slik at tilbakekoblingen fra aggregatene til nett foretas blinkfritt. Dette blir ofte gjort på mellomstore anlegg, slik at man også kan testkjøre aggregatene mot nettleverandørens nett [50].

For de to nødstrømsaggregatene som inngår i Markov-modellen må det gjøres noen antagelser grunnet manglende data. Kilden som er valgt for feildataene for disse er OREDA 92. Her har OREDA- prosjektet samlet inn feildata for hele nødstrømsaggregatet sett under ett. Grensedefinisjonen for dette aggregatet sees i figur 26. Dette gjør at det kan benyttes en svikintensitet og en reparasjonsrate for hele aggregatet sett under ett, noe som forenkler konstruksjonen av Markov-modellen. Nyere utgaven av OREDA har en annen og mer detaljert oppdeling, og var derfor ikke aktuelle for bruk i denne oppgaven.

Modelleringen av aggregatene må allikevel tilpasses noe til de tilgjengelige feildataene. Derfor må følgende forutsetninger settes for nødstrømsaggregatene:

- Aggregat kan ikke svikte når de ikke er i bruk.
- Det er en viss sannsynlighet for at et aggregat ikke klarer å starte opp.
- Skjulte feil på aggregatene som først blir avslørt når de starter opp tas ikke med, men antas å være en del av sannsynligheten for en vellykket oppstart



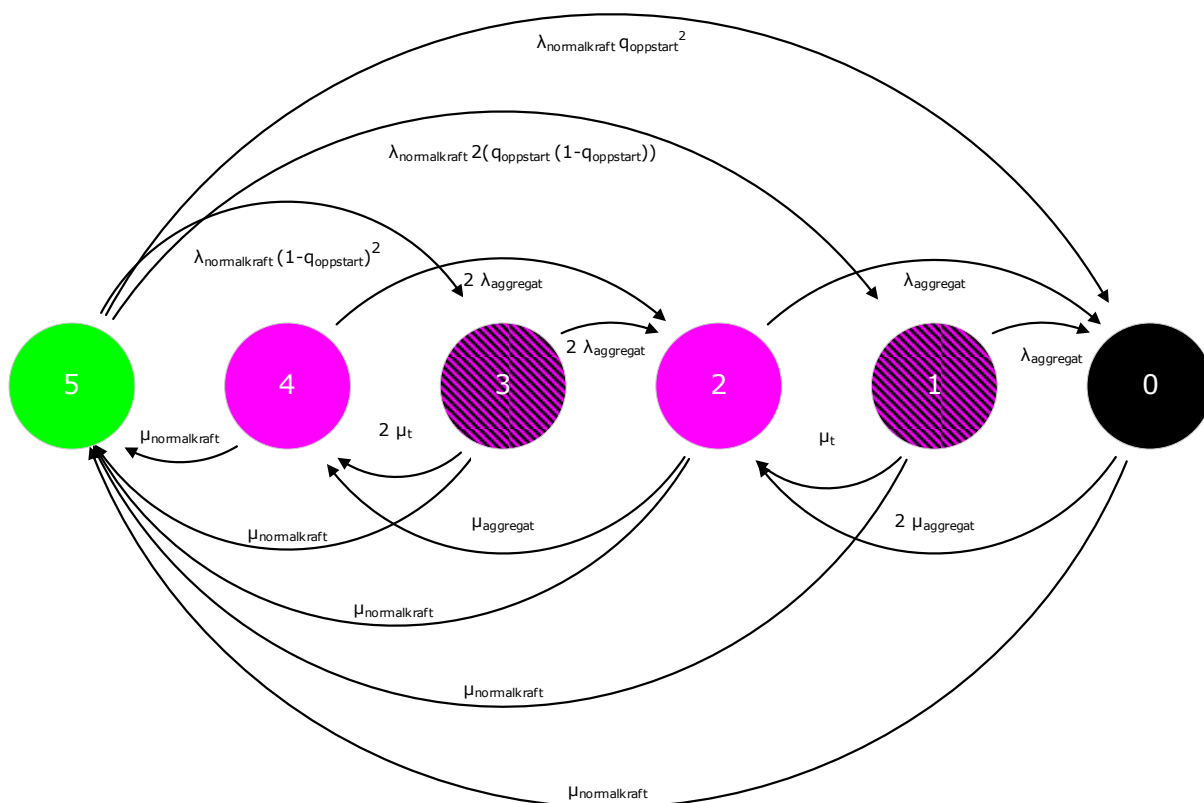
**Figur 26 – Grensedefinisjon for nødstrømsgenerator slik de er definert i OREDA 92 [51, s. 482]**

En Markov-modell kan nå konstrueres basert på definerte forenklinger og grensesnitt, slik disse er beskrevet i figur 23 og 25. Strømforsyningen inn på hovedfordeling nødskraft vil være et dynamisk system, som i gjennomsnitt vil måtte gå fra forsyningen fra nettleverandøren over til nødstrømsgeneratorer hvert 2,6 år. Selve modellen for denne overgangen er vist i figur 27, mens hver tilstand er beskrevet i tabell 5. Tilstand 5 representerer strømforsyning på normalkraft, mens tilstand 3 og 1 representerer

oppstarten av nødstrømsaggregatene. Det er en viss sannsynlighet ( $q_{oppstart}$ ) for at et aggregat ikke klarer å starte. Sannsynligheten for at ingen av de to aggregatene klarer å starte, vil derfor være  $q_{oppstart}^2$ . Skulle dette skje idet ytre nett forsvinner ( $\lambda_{normalkraft}$ ) vil systemet gå over i tilstand 0, hvor begge aggregatene vil være inntil de blir reparert, eller nettleverandørens spenning kommer tilbake.

Lykkes derimot et eller begge aggregater med oppstarten, havner systemet i tilstand 1 eller 3. Disse tilstandene er introdusert for å vise at det er en tidsforsinkelse mellom avbruddet i forsyningen inn til sykehuset inntreffer og spenningen i hovedfordeling nødkraft blir gjenopprettet av aggregatene. Denne tidsforsinkelsen er ekvivalent med omkoblingstiden, og selve tidsforsinkelsen er representert med  $\mu_t$ . Systemet vil så driftes med ett aggregat i tilstand 2 frem til det andre blir reparert ( $\mu_{aggregat}$ ), eller på to aggregater. Merk at i tilstand 0 til 4 kan det ytre nett når som helst komme tilbake, noe som fører systemet tilbake til normalkraft-tilstanden 5.

Markov-modellen er illustrert på neste side.



**Figur 27 Markov-modell, nødstrømsforsyning med forsinket oppstart**

Tilstand	Krafttype:	Beskrivelse
	Normalkraft	Sykehuset forsynt fra nettleverandør. Begge nødstrømsaggregatene står i stand-by.
	Nødkraft	Ytre nett er ikke tilstede. Begge nødstrømsaggregatene forsyner alt påkrevd utstyr med nødskraft.
	Avbrudd	Ytre nett er ikke tilstede. Begge nødstrømsaggregatene er i oppstartsfasen, men strømforsyningen er fortsatt ikke gjenopprettet.
	Nødkraft	Ytre nett er ikke tilstede. Et nødstrømsaggregat forsyner alt påkrevd utstyr med nødskraft.
	Avbrudd	Ytre nett er ikke tilstede. Et av nødstrømsaggregatene er i oppstartsfasen, men strømforsyningen er fortsatt ikke gjenopprettet.
	Avbrudd	Ytre nett er ikke tilstede. Nødstrømsaggregatene forsyner ikke hovedfordeling nødskraft.

**Tabell 5 Beskrivelse av tilstandene i Markov-modellen i figur 27**

For systemet beskrevet i Markov-modellen i figur 27 og tabell 5 kan følgende matrise for overgangsintensitetene settes opp:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -(2\mu_a + \mu_n) & 0 & 2\mu_a & 0 & 0 & \mu_n \\ \lambda_a & -(\mu_t + \mu_n) & \mu_t & 0 & 0 & \mu_n \\ \lambda_a & 0 & -(\lambda_a + \mu_a + \mu_n) & 0 & \mu_a & \mu_n \\ 0 & 0 & 2\lambda_a & -(2\mu_t + \mu_n) & 2\mu_t & \mu_n \\ 0 & 0 & 2\lambda_a & 0 & -(2\lambda_a + \mu_n) & \mu_n \\ \lambda_n q_o^2 & \lambda_n 2(q_o(1 - q_o)) & 0 & \lambda_n(1 - q_o)^2 & 0 & -(\lambda_n q_o^2 + \lambda_n 2(q_o(1 - q_o)) + \lambda_n(1 - q_o)^2) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}(t) \cdot \mathbf{A} = 0$$

Nå introduseres regelen om total sannsynlighet inn i matrisen. Siden sannsynligheten for at systemet befinner i tilstandene 5 til 0 er 100%, eksisterer sammenhengen  $P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 1$ . I praksis erstattes nå en kollone i **A** matrisen med en rekke ettall, slik at denne sammenhengen blir med. Vektoren **b** benyttes for å representere at systemet har en starttilstand. I dette tilfelle starter systemet ved  $t = 0$  i tilstand 5. Praktisk løsning blir derfor:

$$\mathbf{P} = \mathbf{b} \cdot \mathbf{A}^{-1}$$

$$\mathbf{P} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1] \cdot \begin{bmatrix} -(2\mu_a + \mu_n) & 0 & 2\mu_a & 0 & 0 & 1 \\ \lambda_a & -(\mu_t + \mu_n) & \mu_t & 0 & 0 & 1 \\ \lambda_a & 0 & -(\lambda_a + \mu_a + \mu_n) & 0 & \mu_a & 1 \\ 0 & 0 & 2\lambda_a & -(2\mu_t + \mu_n) & 2\mu_t & 1 \\ 0 & 0 & 2\lambda_a & 0 & -(2\lambda_a + \mu_n) & 1 \\ \lambda_n q_o^2 & \lambda_n 2(q_o(1 - q_o)) & 0 & \lambda_n(1 - q_o)^2 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1}$$

Fra vedlegg 1 til 4 har det blitt valgt ut relevante feildata for denne modellen. De verdiene som er benyttet for Markov-modellen er listet opp i tabell 6.

Feilrate				Reparasjonsrate			
Beskrivelse	Symbol	Tall-verdi	Kilde / basert på	Beskrivelse	Symbol	Tall-verdi	Kilde / basert på
Normalkraft-forsyning	$\lambda_n$	0,38310986 år <sup>-1</sup>	NVEs avbrudds-statistikk [46]	Normalkraft-forsyning	$\mu_n$	0,032408986 min <sup>-1</sup>	NVEs avbrudds-statistikk [46]
Nødstrøms-aggregat	$\lambda_a$	8500 $\frac{1}{1E6 h}$	OREDA 92 [51]	Nødstrøms-aggregat	$\mu_a$	$\frac{1}{14 h}$	OREDA 92 [51]
Sannsynlighet for svikt ved oppstart, Nødstrøms-aggregat	$q_o$	$\frac{1,3}{1000}$	OREDA 92 [51]	Oppstartstid aggregat	$\mu_t$	$\frac{1}{25 s}$	Forutsetning ref. NEK 400:2018

**Tabell 6 Data for Markov-modellen**

#### 4.3.4 Modellering av bruken av CT-maskinene

I denne rapporten behandles CT-maskinen som en binær last, etter inspirasjon fra inndelingene i systemtilstander som rapportene [20] og [22] presenterte (se kap. 2.3). I motsetning til disse, som benyttet de fire tilstandene *skann*, *tomgang*, *lavenergi* og *av*, benytter det i denne oppgaven to tilstander:

Systemtilstand:	Beskrivelse:	Parallell til pålitelighetsanalyse:
<i>Skann</i>	Maskinen trekker vesentlig mer strøm enn normalt. Indikerer at røntgenrøret er aktivert og at et <i>skann</i> utføres på en pasient.	Maskinen opptar en betydelig del eller hele kapasiteten som UPSens vekselretter kan tilby. → Komponenten er i feiltilstand. → $x_{CT} = 0$
<i>Stand-by</i>	Maskinen trekker en normal mengde strøm. Indikerer at det ikke foretas et <i>skann</i> .	Maskinen opptar en ubetydelig del av kapasiteten som UPSens vekselretter kan tilby. → Komponenten er i funksjonsdyktig. → $x_{CT} = 1$

**Tabell 7 Definisjon av tilstander for CT-maskin**

Som figur 1 i innledningen viste, vil de forskjellige senarioene som undersøkes nedskalere UPSens installerte effekt i inkremitter som tilsvarer en CT-maskin. For å modellere dette i en pålitelighetsanalyse, benyttes en k-av-n struktur, slik beskrevet i kap. 4.1.1. I dette tilfelle vil  $k$  representere antall CT-maskiner som til enhver tid må finne seg i tilstanden *Stand-by* blant  $n$  CT-maskiner for at UPSens vekselretter ikke skal bli overbelastet. Dette gjør at tilgjengeligheten og frekvensen med hensyn på overbelastning (OB) av UPSens vekselretter er gitt ved:

$$A_{CT} = \frac{\mu_{CT}}{\lambda_{CT} + \mu_{CT}}$$

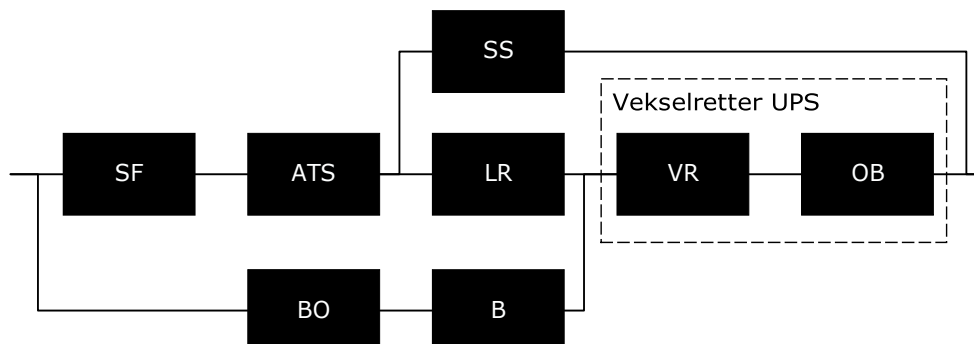
$$A_{ob} = h(A_{CT}) = \sum_{j=k}^n \binom{n}{j} A_{CT}^j (1 - A_{CT})^{n-j}$$

$$F_{0\ CT} = \sum_i \frac{\partial h(\mathbf{A})}{\partial A_i} A_i \lambda_i = \frac{d(h(A_{CT}))}{dA_{CT}} \cdot A_{CT} \cdot \lambda_{CT}$$

Nøkkelen til å kunne bruke denne metoden er å benytte en svikintensitet og en reparasjonsrate som er felles for alle CT-maskinene, slik at de fra et pålitelighetsmessig ståsted kan sies å opptre identiske.

#### 4.3.5 Pålitelighetsnettverk, strømtilførsel for CT

For den elektriske forsyningen frem til CT-maskinene kan pålitelighetsnettverket i figur 28 settes opp. Dette er en videreutvikling av modellen i figur 19, som var benyttet i artiklene [32] og [33]. Pålitelighetsnettverket består av følgende deler, hvor samtlige forutsettes å være uavhengige av hverandre:



**Figur 28 Pålitelighetsnettverk for strømforsyningen frem til CT om UPS benyttes**

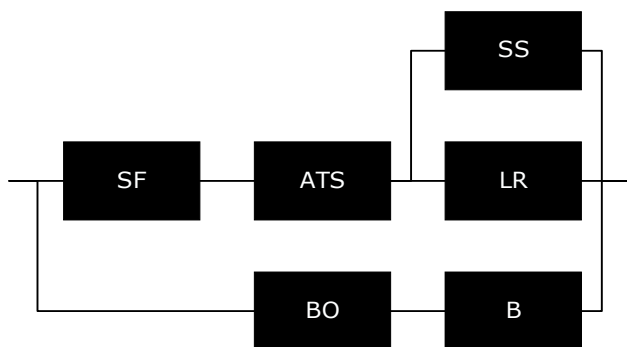
Del:	Beskrivelse:	Kommentar:
SF	Strømforsyningen frem til hovedfordeling nødskraft.	Denne delen representerer resultatene fra Markov-modellen i kap. 4.3.3
ATS	<i>Automatic Transfer Switch</i> . Komponent som styrer og kobler om til forsyningen fra nødstrømsaggregatene ved avbrudd.	Grensesnitt mellom Markov-modellen i figur 27 og pålitelighetsnettverket i figur 28 er definert i figur 25.
SS	Statisk Switch. Enten en integrert del i UPSen, eller en frittstående komponent	Virkemåte og funksjon er beskrevet i kap. 3.1, 3.2 og 3.4
LR	UPSens likeretter	Virkemåte og funksjon er beskrevet i kap. 3.1
BO	UPSens batteriomformer inkl. batteribryter	Virkemåte og funksjon er beskrevet i kap. 3.1 og 3.3
B	UPSens batteri Merk: Batteristørrelse behandles ikke her, dvs. batteriet kan ikke bli utladet.	Virkemåte og funksjon er beskrevet i kap.3.1
VR	UPSens vekselretter, komponentsvikt	Virkemåte og funksjon er beskrevet i kap. 3.1 og 3.2
OB	Belastninger som oppstår nedstrøms UPSen og som kan føre til overbelastning av UPSens vekselretter. Overbelastning inntreffer øyeblikkelig i det antall CT-maskiner i <i>skann</i> overstiger det UPSen er dimensjonert for	Baserer seg på resultatene for bruken av CT-maskiner slik disse er presentert i kap. 5.3.2

**Tabell 8 Komponentbeskrivelse pålitelighetsnettverk**

Strukturfunksjonen til strømforsyningen frem til CT-maskinene finnes ved å foreta en pivotal dekomposisjon om UPSens vekselretter, markert med stiplede linjer i figur 28. Vekselretteren kan befinne seg i to tilstander, enten så virker den eller så virker den ikke. Disse to tilstandene inkluderer både overbelastning av vekselretteren (OB) og annen komponentsvikt (VR). Her forutsettes det at overbelastning av vekselretteren og annen svikt er uavhengige av hverandre, noe som betyr at forutsetningene for overbelastning i anlegget kan inntreffe selv om vekselretteren er ødelagt. To strukturer kan settes opp omkring UPSens vekselretter:

1. **Vekselretteren fungerer.** Når denne komponenten fungerer som den skal, kan effekten til CTene flyte via UPSens likeretter, UPSens bypass, eller komme fra UPSens energilager. Resultatet sees i figur 29

$$\begin{aligned} \phi(x_{vr} = 1 \wedge x_{ob} = 1, \mathbf{x}) &= ((x_{ss} \parallel x_{lr})x_{sf} \cdot x_{ats} \parallel x_{bo} \cdot x_b) \\ &= x_{ss} \cdot x_{sf} \cdot x_{ats} + x_{lr} \cdot x_{sf} \cdot x_{ats} - x_{ss} \cdot x_{lr} \cdot x_{sf} \cdot x_{ats} + x_{bo} \cdot x_b \\ &\quad - (x_{ss} \cdot x_{sf} \cdot x_{ats} + x_{lr} \cdot x_{sf} \cdot x_{ats} - x_{ss} \cdot x_{lr} \cdot x_{sf} \cdot x_{ats}) \cdot x_{bo} \cdot x_b \end{aligned}$$



Figur 29

2. **Vekselretteren fungerer ikke** og resultatet blir strukturen i figur 30. Når vekselretteren er i denne tilstanden, kan effekten til CTene kun flyte via UPSens bypass. Dette gjør at:

$$\phi(x_{vr} = 0 \vee x_{ob} = 0, \mathbf{x}) = x_{sf} \cdot x_{ats} \cdot x_{ss}$$



Figur 30

For å sette sammen disse to dekomposisjonene til en strukturfunksjon som beskriver hele systemet inkl. vekselretteren benyttes følgende formel for pivotal dekomposisjon [37, s. 97]:

$$\phi(\mathbf{x}) = x_i \phi(x_i = 1, \mathbf{x}) + (1 - x_i) \phi(x_i = 0, \mathbf{x})$$

Siden det foretas en pivotal dekomposisjon rundt to komponenter i serie og ikke en, slik formelen over tar høyde for, må strukturfunksjonen til figur 29 multipliseres med både  $x_{vr}$  og  $x_{ob}$ . Tilsvarende må strukturfunksjonen til figur 30 multipliseres med  $1 - x_{vr} \cdot x_{ob}$ . Strukturfunksjonen til strukturen i figur 28 blir da:

$$\begin{aligned}
\phi(\mathbf{x}) &= ((x_{vr} \cdot x_{ob})((x_{ss} \parallel x_{lr})x_{sf} \cdot x_{ats}) \parallel x_{bo} \cdot x_b)) + (1 - x_{vr} \cdot x_{ob})x_{sf} \cdot x_{ats} \cdot x_{ss} \\
&= ((x_{ss} \cdot x_{sf} \cdot x_{ats}) \cdot x_{vr} \cdot x_{ob} + (x_{sf} \cdot x_{ats} \cdot x_{lr}) \cdot x_{vr} \cdot x_{ob} - (x_{ss} \cdot x_{sf} \cdot x_{ats} \cdot x_{lr}) \cdot x_{vr} \cdot x_{ob} + x_{bo} \\
&\quad \cdot x_b \cdot x_{vr} \cdot x_{ob} \\
&\quad - ((x_{ss} \cdot x_{sf} \cdot x_{ats}) \cdot x_{bo} \cdot x_b \cdot x_{vr} \cdot x_{ob} + (x_{sf} \cdot x_{ats} \cdot x_{lr}) \cdot x_{bo} \cdot x_b \cdot x_{vr} \cdot x_{ob} - (x_{ss} \cdot x_{sf} \\
&\quad \cdot x_{ats} \cdot x_{lr}) \cdot x_{bo} \cdot x_b \cdot x_{vr} \cdot x_{ob})) \\
&\quad + x_{ss} \cdot x_{sf} \cdot x_{ats} - x_{ss} \cdot x_{sf} \cdot x_{ats} \cdot x_{vr} \cdot x_{ob}
\end{aligned}$$

Systempåliteligheten og frekvensen til strukturen i figur 28 blir nå:

$$\begin{aligned}
h(\mathbf{p}) &= p_{ss} \cdot p_{sf} \cdot p_{ats} \cdot p_{vr} \cdot p_{ob} + p_{sf} \cdot p_{ats} \cdot p_{lr} \cdot p_{vr} \cdot p_{ob} - p_{ss} \cdot p_{sf} \cdot p_{ats} \cdot p_{lr} \cdot p_{vr} \cdot p_{ob} \\
&+ p_{bo} \cdot p_b \cdot p_{vr} \cdot p_{ob} - p_{ss} \cdot p_{sf} \cdot p_{ats} \cdot p_{bo} \cdot p_b \cdot p_{vr} \cdot p_{ob} \\
&- p_{sf} \cdot p_{ats} \cdot p_{lr} \cdot p_{bo} \cdot p_b \cdot p_{vr} \cdot p_{ob} + p_{ss} \cdot p_{sf} \cdot p_{ats} \cdot p_{lr} \cdot p_{bo} \cdot p_b \cdot p_{vr} \cdot p_{ob} \\
&\quad + p_{ss} \cdot p_{sf} \cdot p_{ats} - p_{ss} \cdot p_{sf} \cdot p_{ats} \cdot p_{vr} \cdot p_{ob}
\end{aligned}$$

$$F_0 = \sum_i \frac{\partial h(\mathbf{p})}{\partial p_i} p_i \lambda_i$$

Siden alle komponentene og delene som inngår i pålitelighetsnettverket i figur 28 er reparerbare, kan den tidsavhengige  $p(t)$  erstattes den med tilgjengeligheten  $A(t)$ . Og siden det som er av interesse i dette tilfelle er de stasjonære/ gjennomsnittlige tilgjengeligheten, erstattes  $A(t)$  med  $A$ , slik vist i kap. 4.1.1. Gjennomsnittlig tilgjengeligheten og frekvensen til strukturen i figur 28 blir nå:

$$\begin{aligned}
h(\mathbf{A}) &= A_{ss} \cdot A_{sf} \cdot A_{ats} \cdot A_{vr} \cdot A_{ob} + A_{sf} \cdot A_{ats} \cdot A_{lr} \cdot A_{vr} \cdot A_{ob} - A_{ss} \cdot A_{sf} \cdot A_{ats} \cdot A_{lr} \cdot A_{vr} \cdot A_{ob} \\
&\quad + A_{bo} \cdot A_b \cdot A_{vr} \cdot A_{ob} - A_{ss} \cdot A_{sf} \cdot A_{ats} \cdot A_{bo} \cdot A_b \cdot A_{vr} \cdot A_{ob} \\
&\quad - A_{sf} \cdot A_{ats} \cdot A_{lr} \cdot A_{bo} \cdot A_b \cdot A_{vr} \cdot A_{ob} + A_{ss} \cdot A_{sf} \cdot A_{ats} \cdot A_{lr} \cdot A_{bo} \cdot A_b \cdot A_{vr} \cdot A_{ob} \\
&\quad + A_{ss} \cdot A_{sf} \cdot A_{ats} - A_{ss} \cdot A_{sf} \cdot A_{ats} \cdot A_{vr} \cdot A_{ob} \\
F_0 &= \sum_i \frac{\partial h(\mathbf{A})}{\partial A_i} A_i \lambda_i
\end{aligned}$$

Hvor tilgjengeligheten til den individuelle komponenten  $i$  er [37, s. 271]:

$$A_i = A_{AV,i} = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} = \frac{MTTF_i}{MTTF_i + MTTR_i}$$

Kildene som er valgt for pålitelighetsdata for de ulike komponentene sees i figur 24, mens utvalgte data fra disse kildene er gjengitt i vedlegg 2 til 4.



## 4.4 Oppsett for målinger; utnyttelse CT

I tidsrommet 10 juni 2022 til 17 juni 2022 ble det utført undersøkelser og målinger ved St. Olavs hospital, Trondheim. Målet med disse undersøkelsene var todelt. For det første var det nødvendig å undersøke om modellen for bruk av CT-maskiner, slik den var fremsatt i rapportene [20] og [22] (kap. 2.3), stemte overens med bruken av CT ved et norsk sykehus. For det andre ville slike undersøkelser avdekke om enkelte CT-maskiner ble mer brukt enn andre, noe som ville påvirke gyldigheten til valgte modell for overbelastning vekselretter i UPS. Resultatene fra disse målingene bearbejdes slik at de danner grunnlaget for beregningene av tilgjengelighet for vekselretter UPS med tanke på overbelastning (OB).

Hos St. Olavs ble følgende CT-maskiner målt og undersøkt:

CT-maskin:	Bygg/ funksjon:	Antall:	Nominelle effekter:
GE Revolution Apex [52]	Akutten og Hjertelunge-senteret (Akutt CT)	1	Maksimalt: 200 kVA Gjennomsnitt: 11 kVA
Siemens Somatom Definition Flash [53]	Gastrocenteret (CT 1 og 2)	2	2 sekunder: 283 kVA 35 sekunder: 177 kVA 100 sekunder: 85 kVA Stand-by: 6 kVA
Siemens Somatom Definition AS [53]	Gastrocenteret (CT 3)	1	3 sekunder: 140 kVA 35 sekunder: 93 kVA 100 sekunder: 43 kVA Stand-by: 4 kVA
Siemens Somatom Definition Edge [53]	Nevrosenteret	1	3 sekunder: 140 kVA 35 sekunder: 93 kVA 100 sekunder: 43 kVA Stand-by: 4 kVA

**Tabell 9 Undersøkte CT-maskiner St. Olavs**

Valgte metode for innhenting av data var måling og logging av strømtrekket i en av fasene til alle CT-maskinene. Måleutstyret ble koblet opp i hovedfordeling nødkraft i hvert av byggene hvor en fase på hver av effektbryterne til CT-maskinene ble målt. Utstyret som ble benyttet i disse målingene var:

- 3 stk bærbare PCer tilkoblet datalogger.
- 3 stk dataloggere av typen Keysight 34972A LXI Data Acquisition / Data Logger Switch Unit [54]
- 6 stk strømtenger av typen Fluke i1000s AC-strømprøbe [55]

Dataloggerne som ble brukt leser verdien på en inngang/ strømtang om gangen før den går videre til neste kanal. Testing av utstyret avdekte at dataloggerne brukte et sekund pr. kanal som skulle måles. Dette gjorde at samplingstiden i praksis ikke kunne bli mindre enn 3 sekunder, siden Gastro- bygget inneholder tre CT-maskiner. Planen var å benytte samme samplingstid på alle byggene for å enkelt kunne samstille dataene i ettertid. Ved oppstart av målingene i Gastro- bygget ble det oppdaget at en av de to-rørs CT-maskinene fra Siemens hadde to effektbrytere, noe som førte til at en ekstra strømtang måtte benyttes. Dette økte også samplingstiden fra 3 til 4 sekunder for hver kanal i dette bygget. Siden de øvrige målingene var startet, og det var begrenset med tid

til å gjøre endringer i oppsettet på plassen, ble samplingstiden for akutten og Nevrosenteret beholdt på 3 sekunder.

## 4.5 Bygg, kostnad og entreprise

Når det gjelder kontraktsinngåelse med entreprenører i et byggeprosjekt, kan disse deles inn i to kategorier. Disse er [56]:

- **Utførelsesentreprise.** Her står entreprenørene bare for utførelsen. Dette betyr at hen bare bærer risikoen for selve utførelsen av sitt arbeid og valg av arbeidsmetode. Standarden NS 8405 er laget for denne entrepriseformen.
- **Totalentreprise.** Her har en totalentreprenør ansvaret for både prosjektering og utførelse, noe som betyr at hen også sitter med ansvaret for prosjekteringen. Det må her ligge til grunn et forprosjekt eller en beskrivelse som danner grunnlag for entreprenørens prosjektering. Standarden NS 8407 er laget for denne entrepriseformen.

Det skilles mellom tre modeller for **utførelsesentrepriser** [56]:

- **Delte entrepriser** (også kalt byggherrestyrte entrepriser). Her inngår byggherren egne kontrakter med hver entreprenør.
- **Hovedentreprise.** Her inngår byggherren kontrakt med en hovedentreprenør som har ansvaret for et bestemt antall fag, f.eks. alle byggfagene. Så kan byggherren inngå kontrakter med øvrige fag separat, slik som f.eks. teknikk.
- **Generalentreprise.** Her inngår byggherren en kontrakt med en generalentreprenør som har ansvar for hele utførelsen, dvs. anbudsinnhenting, koordinering og fremdrift.

Felles for alle modellene for utførelsesentrepriser er at det er byggherren som har hovedansvaret for prosjekteringen. Byggherren må da gjerne knytte til seg korrekt kompetanse for denne jobben ved å inngå kontrakt med arkitekter og rådgivere.

En bygning består av en rekke forskjellige bygningsdeler. En bygningsdel kan være en enkelt byggevarer, eller bestå av et eller flere produkter. Standarden *NS 3451 bygningsdelstabellen* [57] inneholder en standardisert inndeling av bygnings- og installasjonsdeler som til sammen utgjør de fysiske delene av en bygning. Inndeling iht. *NS 3451* benyttes bl.a. i byggebeskrivelser, statistikk og tilbakeføring av erfaringer om kostnader, bruksegenskaper m.m. [58]. Standarden har 3 detaljnivåer slik illustrert i figur 31.

I Bygg- og anleggsbransjen benyttes *NS 3420* for å utarbeide beskrivelser og mengdelister i forbindelse med konkurransegrunnlag, kalkulasjon av forespørsler og under utførelses- og avviklingsfasen, når utførelsesentreprise er benyttet. Standarden inneholder krav til materialer og utførelse. *NS 3420* er en serie bestående av en rekke delstandarder, hvor *Del W* omhandler installasjoner for elkraft og ekom [59].

Det er derfor bare i utførelsesentrepriser at kostnadene direkte knyttet til UPS-installasjonen vil komme tydelig frem. I en totalentreprise vil byggherre enkelt sagt få en sum for sykehusprosjektet å forholde seg til. I en utførelsesentreprise, og spesielt om denne er av typen byggherrestyrt, vil alle kostnadene for en UPS være synlige i en oppdeling iht. *NS 3420*. I denne rapporten benyttes derfor kun data fra byggherrestyrte entrepriser som grunnlag for estimerte kostnad for UPS.

Ensiffer nivå	Tosiffer nivå	Tresiffer nivå
2 Bygning 3 VVS 4 Elkraft 5 Tele og automatisering 6 Andre installasjoner 7 Utendørs	... 40 Elkraftinstallasjoner, generelt 41 Basisinstallasjoner for elkraft 42 Høyspent forsyning 43 Lavspent forsyning 44 Lys 45 Elvarme 46 Reservekraft 47 Lokal elkraftproduksjon 48 Installasjon for elektrisk beskyttelse 49 Andre elkraftinstallasjoner ...	... 461 Elkraftaggregater <i>Omfatter komplett installasjon, inklusive kontrolltavle, drivstoff, eksos og kjøleanlegg.</i> <b>462 Avbruddsfri kraftforsyning. Inkludert eventuelle batterier.</b> 463 Akkumulatoranlegg <i>Inkludert utstyr for ladning.</i> ...

**Figur 31 NS 3451 bygningsdelstabellen, avbruddsfri kraft**

I utarbeidelsen av kalkyler for de ulike prosjektene benyttes ulike oppslagsverk, hvor *Norsk Prisbok* er et av disse oppslagsverkene. Dette er en oppdatert prisdatabase som inneholder prisinformasjon for kostnader for et byggeprosjekt, livssyklus-kostnader (LCC) og *carbon footprint* verdier. Den inneholder også erfaringspriser pr. kvadratmeter bruttoareal for en mengde bygningstyper [60].

## 4.6 Metode for kostnadsestimering av UPS

I denne rapporten benyttes vinneranbudene for elektroentrepriser fra tidligere sykehusprosjekter COWI har vært involvert i, for å estimere forventede direkte kostnader ved med anskaffelsen av ulike størrelser av UPS. Dette estimatet vil kun være gyldig for de delene av UPS- installasjonen som faller inn under kapittel 462 i bygningsdelstabellen.

Enkelte av kostnadene forbundet med avbruddsfri kraftforsyning antas å være relativt uavhengig av ytelsen til UPSen, slik at de ikke varierer med installert effekt. Eksempelvis forutsettes det at batteri, og kontrollsystemet til dette, variere med energilagringsskapasiteten til UPSen. Selve batteriet inngår derfor ikke i kostnadsestimatet. Dette skyldes at batteristørrelsen ikke inngår direkte som en faktor for hvor mye effekt UPSen leverer. Så lenge det kan levere den nødvendige strømmen inn på DC-leddet i UPSen, vil UPSen kunne operere med sin nominelle ytelse.

Ved å utføre en lineær regresjon på innsamlede data kan det estimeres et uttrykk for forventet investeringskostnad for UPSen som funksjon av ytelsen til denne. En slik metoden forutsetter at det faktisk er en lineær sammenheng mellom ytelse og investeringskostnad. Estimater for investeringskostnadene blir derfor uttrykt på følgende form:

$$\text{Investeringskostnad UPS uten batteri} = S_{n\text{ UPS}} \sum \text{Variable kostnader} + \sum \text{Konstante kostnader}$$

I en lineær regresjon benyttes minste kvadraters metode for å kunne estimere sammenhengen mellom to variabler. Konstantledd og stigningstall til en rett linje velges slik at summen av kvadratet av avstanden fra hvert enkelt datapunkt til denne linjen blir minst mulig. Denne linjen vil nå vise den estimerte sammenhengen mellom de to variablene. Ekstremverdier i datamaterialet kan påvirke den estimerte linjen betydelig [61]. Lineære regresjon i denne oppgaven er utført vha. analyseverktøyet innebygd i Excel.

## 5 Resultater og analyse

Dette kapittelet har følgende oppbygning:

- 5.1. Først presenteres forventet pålitelighet for den avbruddsfrie strømforsyningen frem til CT-maskinene. Denne forsyningen presenteres her i tre deler som følger strømforsyningens oppbygning. Disse er:
  - 5.1.1. Normalkraftforsyningen fra nettleverandør frem til måler for avregning.
  - 5.1.2. Strømforsyningen frem til omkoblingsautomatikken (ATS) som er plassert i hovedfordeling nødkraft. Denne er en kombinasjon av normalkraftforsyningen og sykehusets nødstrømsaggregater.
  - 5.1.3. Strømforsyningen ut av UPSen, og som CT-maskinene er tilkoblet. Denne er et resultat av påliteligheten til strømforsyningen inn til hovedfordeling nødkraft, omkoblingsautomatikken (ATS) som er plassert i denne og de forskjellige komponentene som utgjør UPSen.
- 5.2. Deretter følger forventede kostnader for selve UPSen, og en betraktning av investeringskostnaden opp mot den økte pålitelighet.
- 5.3. I del 3 presenteres målingene for utnyttelsen av CTene ved St. Olavs. Disse målingene ble brukt som grunnlag for hvor ofte, og hvor lenge, UPSens vekselretter ville være overbelastet i pålitelighetsberegningene for denne.
- 5.4. Til sist følger en kvalitetssikring av egne beregninger og de metodene som er benyttet i denne rapporten.

### 5.1 Påliteligheten til strømforsyningen

#### 5.1.1 Pålitelighet; normalkraftforsyning

Den forventede påliteligheten i strømtilførselen fra nettleverandøren baseres seg på årsrapportene for avbruddsstatistikk som NVE har publisert for perioden 2015 til 2020 [46]. Verdier for kundegruppe 31 *Helse og sosialtjenester* er benyttet som en generell verdi for tilførselen inn til sykehuset. Disse verdiene danner datagrunnlaget for den estimerte feilraten  $\hat{\lambda}$  og reparasjonsraten  $\hat{\mu}$  for normalkraftforsyningen som er beregnet. Komplette data og utregninger finnes i vedlegg 1, der verdier for korte og lange avbrudd er lagt sammen. Verdiene fra disse beregningene blir derfor:

	Beregnet og forventet verdi:
MTBF [ <i>år</i> ]	2,610276
MDT [ <i>min</i> ]	30,85564
Feilrate $\hat{\lambda}$ [ <i>år</i> <sup>-1</sup> ]	0,383110
Reparasjonsrate $\hat{\mu}$ [ <i>min</i> <sup>-1</sup> ]	0,032409

**Tabell 10 Beregnet forventet verdi for avbrudd i strømtilførselen fra nettleverandør**

#### 5.1.2 Pålitelighet; strømtilførsel inn til hovedfordeling nødkraft

Hovedfordeling nødkraft har i modellen to tilførsler inn. Den ene er normalkraftforsyningen fra nettleverandøren, den andre er tilførselen fra nødstrømsaggregatene som står i stand-by inntil et avbrudd inntreffer.

I den valgte elektriske modellen for et sykehus er ATSen som styrer omkoblingen mellom normalkraft og nødkraft plassert i hovedfordelingen for nødkraft, men andre løsninger finnes også. Markov-modellen i figur 27 beskriver hvordan strømforsyningen frem til ATSen vil veksle mellom normal- og nødkraft. For denne delen av sykehusets strømforsyning kan det forventes følgende fordeling mellom de ulike tilstandene:

Tilstand	Krafttype:	Sannsynlighet for at systemet befinner seg i tilstanden	Frekvens, overgang til en tilstand med avbrudd
5	Normalkraft	0,99997751	4,3733E-05 pr. time
4	Nødkraft (2 generatorer)	2,20957E-05	0
3	Avbrudd (2 generatorer starter opp)	1,50432E-07	Ikke aktuell
2	Nødkraft (1 av 2 generatorer)	2,42221E-07	2,05888E-09 pr. time
1	Avbrudd (1 av 2 generatorer starter opp)	7,78045E-10	Ikke aktuell
0	Avbrudd	1,02492E-09	Ikke aktuell
Sum:		1	4,37351E-05 pr. time

**Tabell 11 Resultater Markov-modell**

Det er 3 tilstander i tabell 5 og 11 som vil sørge for at det er strømtilførsel frem til ATSen. Disse er tilstand 5, 4 og 2. Tilgjengeligheten til denne strømforsyningen inn til hovedfordeling nødkraft vil da være summen av sannsynlighetene for at systemet er i en av disse tilstandene. Frekvensen som beskriver hvor ofte et avbrudd vil oppstå er et resultat av hvor ofte systemet går ut av tilstandene 5, 4 og 2 og over til en tilstand med avbrudd, sammen med sannsynligheten for at systemet er i en av tilstandene 5,4 eller 2. Sammenhengen og formlene som benyttes er beskrevet i kap. 4.1.2

Som tabell 11 viser, vil aldri tilstand 4 i Markov-modellen i figur 27 kunne gå over i en tilstand med avbrudd. Først må en generator svikte, slik at systemet havner i tilstand 2, så kan den andre havarere og sykehuset opplever et strømbrudd. Legges frekvensene til tilstand 5 og 2 sammen, fås frekvensen til strømbrudd generelt sett. Dette gir disse verdiene:

- Gjennomsnittlig tid mellom avbrudd i strømforsyningen frem til ATSen:
  - $MTBF_s = 2,610152824$  år
- Gjennomsnittlig varighet på avbrudd i strømforsyningen frem til ATSen:
  - $MDT_s = 12,53100603$  sekunder

I resultatene over vises det at den gjennomsnittlige tiden mellom avbrudd blir marginalt kortere enn den til strømforsyningen fra nettleverandøren. Dette kommer av at f.eks. strømforsyningen innimellom svikter mens den driftes av nødstrømsgeneratorene etter at et avbrudd i normalkraften har inntruffet. Da vil tiden mellom avbruddet i normalkraften,

og avbruddet når anlegget driftes av generatorene bli kort. Dette vil trekke ned gjennomsnittlig tid mellom avbrudd. Men siden forskjellen i MTBF bare er 0,00012 år, må betydningen sies å være liten.

Det vises også at gjennomsnittlig varigheten på avbruddene blir betydelig kortere enn MDT for strømforsyningen fra nettleverandøren. Dette er som forventet siden dette er hele poenget med nødstrømsaggregatene i utgangspunktet. En MDT på 12,53 sekunder i strømforsyningen frem til ATSen, er om lag halvparten av de 25 sekundene som her brukes som forventet oppstartstid for et aggregat. Siden et aggregat skal være tilstrekkelig for å forsyne hovedfordeling nødkraft, gir dette mening. Reparasjonsraten for overgangen mellom tilstand 3 og 4 er 2 ganger den for de individuelle aggregatene, og siden reparasjonsraten er den inverse av forventet oppstartstid, svarer dette til 12,5 sekunder med forsinkelse. Siden MDT for strømforsyningen frem til ATSen er litt lengere enn halvparten av oppstartstiden, vil dette bety at sannsynligheten for feil i oppstarten av aggregatene har en liten betydning for dette målet. En sjelden gang vil anlegget gå over i tilstand 1 eller 0, noe som vil trekke MDT oppover.

Siden tidsforsinkelsen for oppstart er modellert med den tidsuavhengige reparasjonsraten  $\mu_t$ , som svarer til  $1/25$  sekunder, blir det et avvik i forhold til hvordan denne tidsforsinkelsen egentlig oppfører seg. ATSen vil normalt ha 3-5 sekunders tidsforsinkelse som ikke er hensyntatt her. I tillegg vil en slik tidsuavhengig reparasjonsrate bety at det er mulig for dieselaggregatet å starte momentant, noe som neppe er tilfelle.

### 5.1.3 Pålitelighet; strømforsyningen frem til CT

Her følger de endelige resultatene fra modelleringen av strømforsyningen frem til CT-maskinene. Resultatene kommer av pålitelighetsnettverker i figur 28, hvor både resultatene fra Markov-modellen og resultatene fra målingene av bruken av CT-maskinene ved St. Olavs inngår. Disse målingene og tilhørende estimater for sviktintensitet og reparasjonsrate finnes i kapittel 5.3.

Målingene fra St. Olavs hospital indikerer at CT-maskinene brukes med en intensitet innenfor normal arbeidstid (hverdager kl. 7 til 15), og en annen utenfor normal arbeidstid (helger, kveld og nattestid). Derfor presenteres to sett med tabeller for tilgjengeligheten og MTBF. Det er et sett for hverdager mellom klokken 7 til 15 (også kalt *normal arbeidstid*), og et annet sett for hverdager utenom klokken 7 til 15 og helger (også kalt for *utenom normal arbeidstid*).

I de to påfølgende tabellene varierer resultatene med to forhold. Disse er:

- $n$  antall installerte CT-maskiner
- $k$  antall CT-maskiner som ikke kan *skanne* samtidig for at UPSens vekselretter ikke skal bli overbelastet. Dette betyr at  $n$  minus  $k$  CT-maskiner kan *skanne* samtidig uten at UPSen må gå over til drift via bypassen.

Disse to forholdene svarer til  $k$  og  $n$  som er benyttet i formelen for tilgjengelighet til binomisk fordelte strukturer, slik beskrevet i kapittel 4.3.4.

For å vise den praktiske betydningen av  $k$  og  $n$  er påfølgende tabeller fargekodet. Disse kodene viser hvor mange CT-maskiner som UPSen dekker det dimensjonerende effektbehovet for. Sammenhengen er slik:

Farge-kode:	Stand-by effekt	1 CT	2 CTer	3 CTer	4 CTer
-------------	-----------------	------	--------	--------	--------

n \ k	1	2	3	4	5
1	0,999998988				
2	0,999999956	0,999998021			
3	0,999999995	0,999999879	0,999997092		
4	0,999999996	0,999999990	0,999999768	0,9999962	
5	0,999999996	0,999999996	0,999999981	0,999999625	0,999995343

**Tabell 12 Tilgjengelighet hverdager kl. 7 til 15**

n \ k	1	2	3	4	5
1	0,999999488				
2	0,999999986	0,999998989			
3	0,999999996	0,999999966	0,999998501		
4	0,999999996	0,999999995	0,999999936	0,999998023	
5	0,999999996	0,999999996	0,999999994	0,999999898	0,999997554

**Tabell 13 Tilgjengelighet kveld, natt og helg**

I pålitelighetsanalyse er MTBF den inverse av frekvensen til svikt for systemet. Hvordan frekvensen er beregnet er beskrevet i kapittel 4.3.5. For pålitelighetsnettverket i figur 28 fås følgende to sett med MTBF som varierer med  $k$  og  $n$ :

n \ k	1	2	3	4	5
1	0,437359034				
2	5,499171036	0,227735632			
3	91,24472737	1,909790312	0,158108373		
4	1479,705258	23,91731189	0,994604598	0,123488916	
5	7854,353192	348,4588165	9,977836492	0,621545361	0,102879148

**Tabell 14 MTBF hverdager kl. 7 til 15 [år]**

n \ k	1	2	3	4	5
1	0,989553441				
2	24,62561414	0,504921582			
3	757,6687656	8,390338905	0,343504975		
4	7616,277192	204,6890736	4,282949911	0,262900068	
5	10063,3242	3860,918286	84,56560966	2,622906329	0,214622477

**Tabell 15 MTBF kveld, natt og helger [år]**

Ved å sammenligne resultatene fra tabell 14 mot tabell 15, sees det at det er en viss forskjell i MTBF for normal arbeidstid og MTBF ellers. Hvilken intensitet CT-maskinene benyttes med vil ha en viss betydning for gjennomsnittlig antall år mellom hvert strømbrudd. Men den faktoren som har størst innvirkning på MTBF vil være antall CT-maskiner som kan skanne samtidig.

Ved å ignorere komponenten OB (overbelastning vekselretter) i pålitelighetsnettverket i figur 28, fås forventet pålitelighet til en avbruddsfri strømforsyning hvor UPSens vekselretter ikke forventes overbelastet. Denne løsningen svarer til gjeldende praksis for dimensjonering av UPS for CT, hvor denne er dimensjonert for å takle den



dimensjonerende effekten til samtlige CTer. Tilgjengeligheten, MTBF og MDT for denne løsningen blir henholdsvis:

$$A_s = 0,999999996$$

$$MTBF_s = 10\,147,426 \text{ år}$$

$$MDT_s = 1\,200,805 \text{ s}$$

Studerer derimot strømforsyningen ut av hovedfordeling nødkraft, altså et alternativ hvor CTene er direkte knyttet til denne uten noen UPS, fås et betydelig enklere system. Alle blokkene i pålitelighetsnettverket (figur 28) bortsett fra blokkene for strømforsyningen inn til hovedfordeling nødkraft (SF) og omkoblingsautomatikken i denne (ATS) ignoreres. Pålitelighetsnettverket blir en seriestruktur av de to blokkene SF og ATS, og resultatene blir da blir:

$$A_s = 0,99999681$$

$$MTBF_s = 2,537 \text{ år}$$

$$MDT_s = 225,252 \text{ s}$$

Det legges i denne rapporten til grunn at CT-maskinene benyttes intensivt hverdager mellom kl 7 og kl 15, noe som svarer til 40 timer pr. uke. De resterende 128 timene pr. uke utnyttes CT-maskinene med en lavere intensitet, slik vist i resultatene i kapittel 5.3.2. Den gjennomsnittlige tilgjengeligheten til strømforsyningen kan da beregnes:

$$\bar{A}_s = A_s \text{ hverdag 7 til 15} \cdot \frac{40 \text{ t}}{168 \text{ t}} + A_s \text{ kveld/natt og helg} \cdot \frac{128 \text{ t}}{168 \text{ t}}$$

Den gjennomsnittlige tilgjengeligheten for strømforsyningen frem til CT-maskinene, basert på pålitelighetsnettverket i figur 28, blir som følger:

k \ n	100% dekning UPS	1	2	3	4	5	Ingen UPS
1	0,999999996	0,999999369					0,999997184
2		0,999999979	0,999998759				
3		0,999999996	0,999999945	0,999998165			
4		0,999999996	0,999999994	0,999999896	0,999997589		
5		0,999999996	0,999999996	0,999999991	0,999999833	0,999997027	

**Tabell 16 Gjennomsnittlige tilgjengeligheten for strømforsyningen**

Verdiene i tabell 16 kan omskrives slik at de representerer gjennomsnittlig utilgjengelighet for strømforsyningen. I tabell 17 presenteres denne utilgjengeligheten som gjennomsnittlig antall sekunder pr. år hvor CT-maskinene ikke får strømforsyning.

k \ n	100% dekning UPS	1	2	3	4	5	Ingen UPS
1	0,118	19,905					88,801
2		0,666	39,144				
3		0,135	1,728	57,853			
4		0,119	0,185	3,271	76,047		
5		0,118	0,121	0,280	5,265	93,742	

**Tabell 17 gjennomsnittlige utilgjengeligheten for strømforsyningen (sekunder pr. år)**

Som både tabell 16 og 17 viser, et tilgjengeligheten for  $k$  og  $n$  lik 5 dårligere enn om ingen UPS ble installert. Dette indikerer at et alternativ med 5 installerte CT-er, vil disse utføre såpass mange *skann* at UPSens vekselretter vil overbelastet meget hyppig. Den lille gevinsten som en installasjon av UPS i dette tilfelle ville gitt, blir altså spist opp av den upåliteligheten som kommer av økt kompleksitet i systemet. Siden det introduseres

en statisk switch i serie med øvrig strømforsyning, vil påliteligheten til denne komponenten ha innvirkning på systemets pålitelighet når vekselretteren er overbelastet (jf. figur 30).

Forventet gjennomsnittlig tid mellom hvert avbrudd som CT-maskinene vil oppleve er presentert i tabell 18. Verdiene her er et vektet gjennomsnitt av MTBF for hverdager og MTBF for kveld og helg. Tilsvarende kan gjøres for MDT. Verdiene er regnet ut slik:

$$\overline{MTBF}_s = MTBF_{s \text{ hverdag } 7 \text{ til } 15} \cdot \frac{40 t}{168 t} + MTBF_{s \text{ kveld og helg}} \cdot \frac{128 t}{168 t}$$

k \ n	100% dekning UPS	1	2	3	4	5	Ingen UPS
1	10147,426	0,858					2,537
2		20,072	0,439				
3		598,996	6,847	0,299			
4		6155,189	161,648	3,500	0,230		
5		9537,379	3024,618	66,807	2,146	0,188	

**Tabell 18 Forventet gjennomsnittlig antall år mellom svikt i strømforsyningen til CT. Avrundet til tre desimaler.**

k \ n	100% dekning UPS	1	2	3	4	5	Ingen UPS
1	1200,805	15,503					225,252
2		10,091	15,645				
3		75,731	8,601	15,824			
4		729,849	24,237	8,272	16,015		
5		1128,785	360,623	13,096	8,179	16,212	

**Tabell 19 Forventet gjennomsnittlig varighet på avbrudd i sekunder**

En interessant observasjon fra disse resultatene er det at for samtlige av de kombinasjonene hvor UPSen kun dekker stand-by behovet til CT-maskinene, vil MTBF være betydelig kortere enn om disse var koblet direkte til nødkraften. Denne logiske bristen skyldes at modellen ikke tar høyde for at CT-maskinene vil ha en viss oppstartstid etter et strømbrydd. Dette kan eksemplifiseres: Et avbrudd inntreffer, og nødstrømsaggregatene forventes å bruke 25 sekunder på å starte opp. I løpet av disse 25 sekundene kan en eller flere CT-maskiner komme i tilstanden *skann*. For hvert *skann* som starter vil UPSens vekselretter bli overbelastet og derfor forsøke å gå i bypass. Siden strømforsyningen til hovedfordeling nødkraft ikke er til stede, vil heller ikke CT-maskinen motta noen spenning via den statiske switchen, og i realiteten må nå samtlige CTer bootes opp på nytt. Dette tar derimot ikke modellen høyde for, slik at de universelle, teoretiske CTene som modelleres vil fortsette *skanningen* uavhengig om spenningen er til stede eller ei. Dette gjør at MTBF blir urealistisk kort for alle tilfellene hvor  $k$  er lik  $n$ . Dette er også noe som til en viss grad sees i tabell 18.

## 5.2 Kostnad ved avbruddsfri strømforsyning for CT

### 5.2.1 Kostnad; innkjøp av UPS

For å kunne anslå reduksjonen i investeringskonstanter som følge av at en mindre UPS, har det i arbeidet med denne rapporten blitt samlet inn en rekke priser fra tidligere sykehusprosjekter hvor COWI har vært involvert. Tekniske beskrivelser og tilbudsevalueringer for totalt 9 prosjekter med til sammen 45 UPSer ble undersøkt. Det er bare prisene i de ulike vinneranbudene som er brukt som datagrunnlag. Det betyr i hovedsak at prisene i figur 32 er de beste man kunne oppnå i markedet når anbudskonkurransen ble gjennomført. Pris er normalt det som blir vektet tyngst i en slik konkurranse. For UPSer med en mindre ytelse enn det som er normalt inngår i et sykehusprosjekt, presenteres datapunkter hentet fra *Norsk Prisbok* [60].

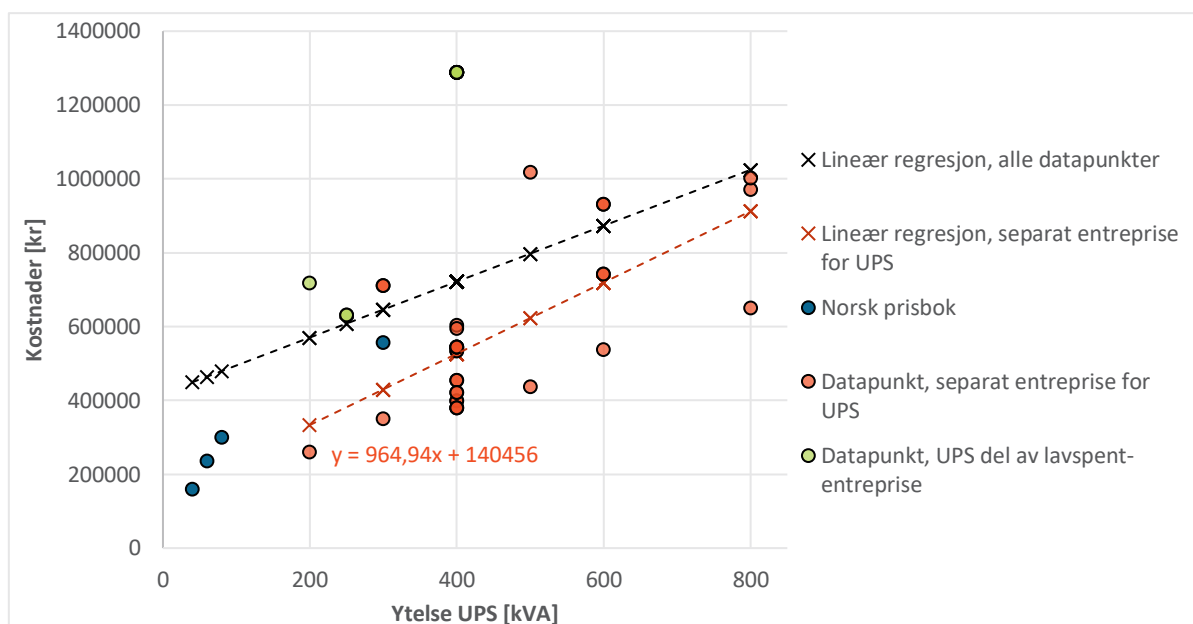
Undersøkte prosjekter strekker seg fra midten av 2010- tallet og frem til 2022. For å kunne sammenligne eldre priser med nyere har samtlige blitt indeksjustert. Det er en utbredt praksis i byggebransjen å regulere iht. *Byggekostnadsindeks for boligblokk*, utarbeidet av statistisk sentralbyrå (SSB) [62], [63]. Dette er denne indeksen som er benyttet her.

Post for selve akkumulatorbateriene medtas ikke. De postene som inngår i dette datamaterialet, iht. oppdelingen i NS 3420, er disse:

Post:	Postkode NS3420:
"Pris for et komplett, levert og montert batteriovervåkningssystem med nødvendige signalkabler, kontrollskjerm og control units for overvåkning/ måling av batterier."	WD2A
Overstrømsvern for batterier (DC)	WF1.929A
Kabler fra batteri til mellomledd UPS	WJ2.491A
Skap med hjelpeutstyr for batteri	WB3.481
FAT (rutinetest på fabrikk)	-
SAT (rutinetest på stedet)	-
Strømforsyning (UPS)	WB3.211A

**Tabell 20 Inkluderte poster i datasett for UPS**

Alle tilbud som kommer inn i en anbudskonkurranse er konfidensielle. Derfor navngis ikke de forskjellige prosjektene her. En anonymisert og forenklet samstilling dataene sees i figur 32. I dette datasettet skilles det mellom datapunkter hvor UPSen var en del av den generelle lavspent-entreprisen, og datapunkt hvor den avbruddsfrie kraftforsyningen var skilt ut i en egen entrepriser.



**Figur 32 Data for ytelse og kostnad ulike UPSer**

Som figur 32 viser, er det en god spredning mellom de ulike prosjektene og UPSene i disse. Studeres prisene fra de prosjektene hvor UPSen var medtatt i samme entrepris som resten av lavspenstinstallasjonen, sees det at disse i snitt har en høyere pris enn om UPSene var skilt ut i en egen separat entrepris. Det kan være flere grunner til denne forskjellen, men en sannsynlig forklaring er denne:

Flere av de totale kostnadene, slik som administrasjon og inntransportering på byggeplassen, er bakt inn i postene til UPSen når denne er en del av entreprisen for den generelle lavspenstinstallasjonen. Dette er kostnader som uansett ville påløpt prosjektet om UPSen var skilt ut i en egen entrepris. Er UPSen en del av entreprisen for den generelle lavspenstinstallasjonen må entreprenøren stå for alt av koordinering mellom sine underleverandører. Er derimot generell el-installasjon og UPS skilt i to forskjellige entrepriser, må byggherre eller hans rådgivere stå for denne koordineringen og påfølgende ansvar. Det er derfor ikke sikkert at det er noen reell besparelse for prosjektet ved å ha separate entrepriser, selv om det ser slik ut fra resultatene i figur 32.

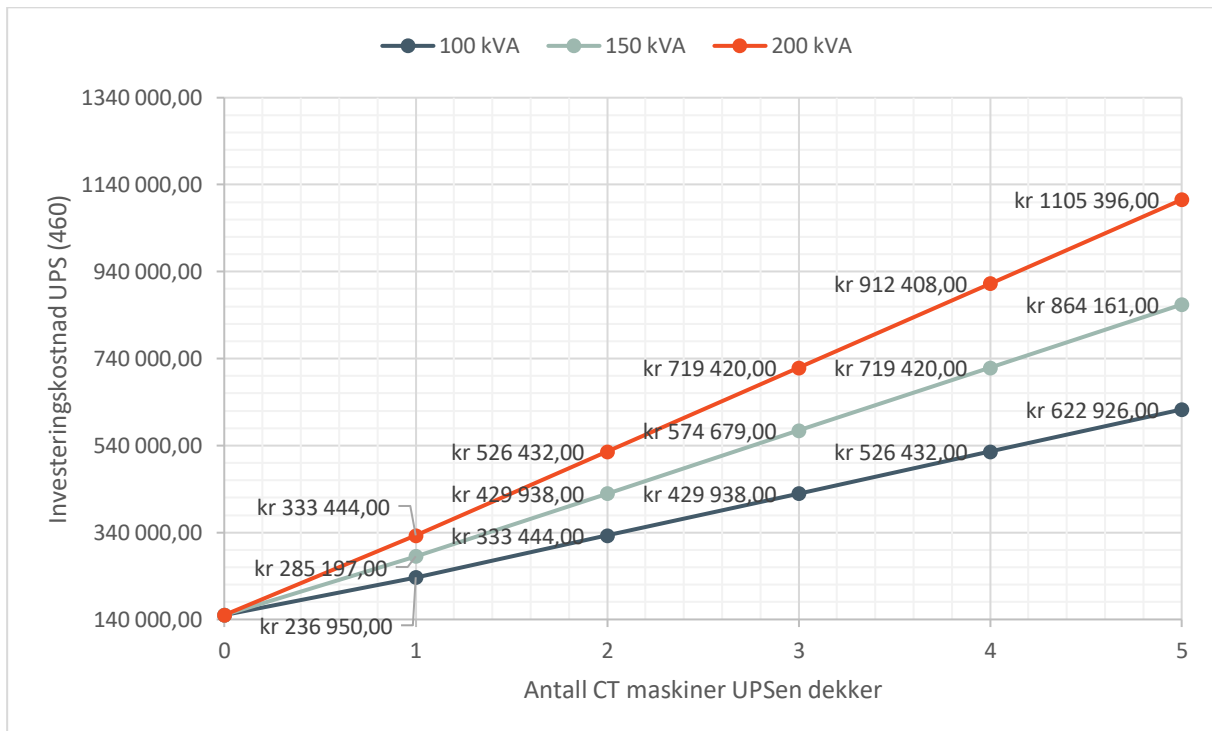
Konsekvensen av disse avvikende prisene er at datapunktene for UPS som en del av entreprisen for generell lavspenstinstallasjon ikke benyttes i estimatet for kostnadene direkte forbundet med UPS. Kun de datapunktene hvor den avbruddsfrie kraftforsyningen var del av en egen, separat entrepris, benyttes i en lineær regresjon. Estimatet for investeringskostnaden for UPS ift. kapittel 462 i bygningsdelstabellen blir derfor:

$$\text{Investeringskostnad UPS uten batteri} = S_{n_{UPS}} \cdot 964,94 \frac{\text{kr}}{\text{kVA}} + 140\,456 \text{ kr}$$

### 5.2.2 Kostnad; økt pålitelighet

Fra funksjonsuttrykket for estimert investeringskostnad for UPSen (uten batterier) kan en enkel sammenheng plottes. I figur 33 sees forventet investeringskostnad direkte knyttet til UPSen, som en funksjon av hvor mange CT-maskiner som kan skanne samtidig uten å overbelaste vekselretteren. Når det i dette plottet står at 0 CTer samtidig vil koste 151 000 kr, betyr det at dette er forventet kostnad om UPSen bare dekker CTenes effektbehov i stand-by. De tre grafene viser henholdsvis forventet kostnad om de

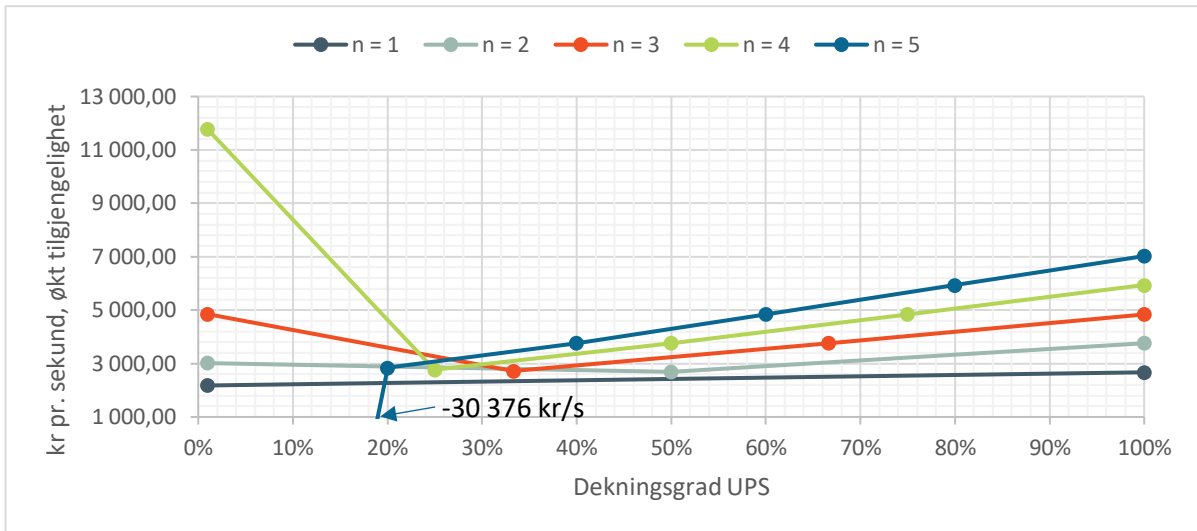
individuelle CTene har en dimensjonerende effekt på 100, 150 eller 200 kVA. Basert på de vanlige CT-maskinene (ikke DSCT) ved St. Olavs vil det virke fornuftig at dimensjonerende effekt for en CT vil være i denne størrelsesordenen.



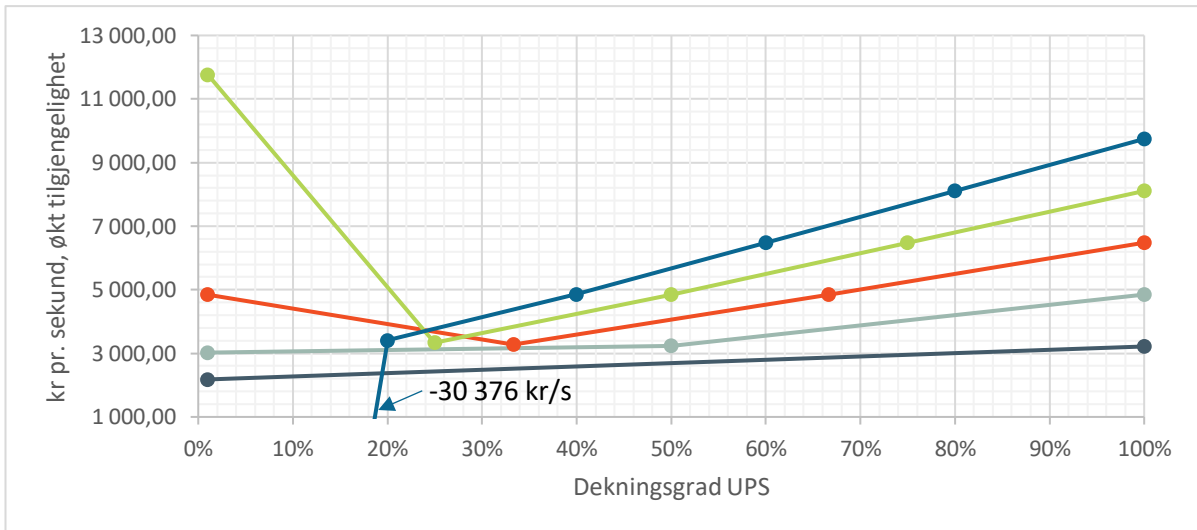
**Figur 33 Forventet investeringskostnad for UPS til CT, iht. kap. 462 i bygningsdelstabellen.**

En interessant parameter å studere når det kommer til forventede kostnader, er hva den økte tilgjengeligheten til strømforsyningen frem til CTene vil koste. I figur 34 til 36 er det plottet inn antall kroner pr. sekund med økt pålitelighet. Her er økningen i pålitelighet referert til tilgjengeligheten om CTene var direkte tilknyttet hovedfordeling nødkraft. Som tidligere vist i tabell 17, vil gjennomsnittlig årlig utilgjengelighet ved å koble CT-maskinene direkte til hovedfordeling nødkraft tilsvare 88,801 sekunder pr. år. Det er hvert sekund med forbedring av denne verdien kostnadene i påfølgende plott uttrykker.

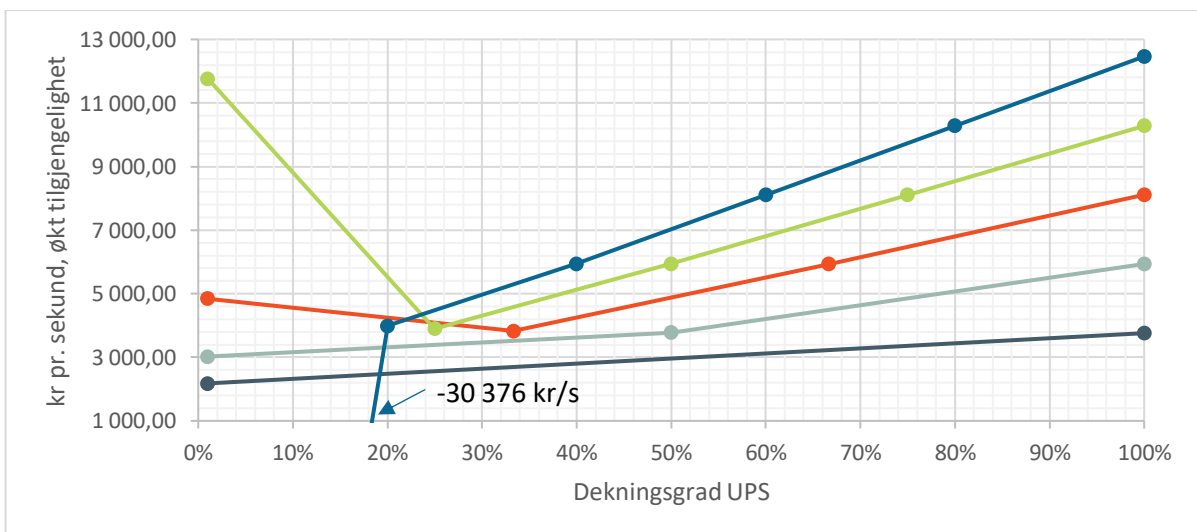
Som figurene 34 til 36 viser, blir hvert sekund med økt tilgjengelighet meget kostbart for en løsning hvor UPS bare dekker stand-by-effekten. Derimot ser det ut som det er et optimum, hvor hvert sekund ekstra koster minst ved dekning av den dimensjonerende effekten til en av CTene. Dette gjelder uavhengig av antall maskiner som er tilkoblet UPSen. Som disse grafene viser, ser det ut som det er en lineær sammenheng mellom pris pr. sekund fra dette optimumet. Helt til venstre i plottet sees resultatene om UPSen bare dekker CTenes stand-by behov. Her er det verd å merke seg at en UPS som bare dekker stand-by-behovet til 5 CT-maskiner vil ha en negativ kroner pr. sekund verdi, noe som viser at om denne konfigurasjonen velges så blir resultatet både dårligere pålitelighet og samtidig økte kostnader.



Figur 34 UPS dimensjonert for CT på 100 kVA



Figur 35 UPS dimensjonert for CT på 150 kVA



Figur 36 UPS dimensjonert for CT på 200 kVA

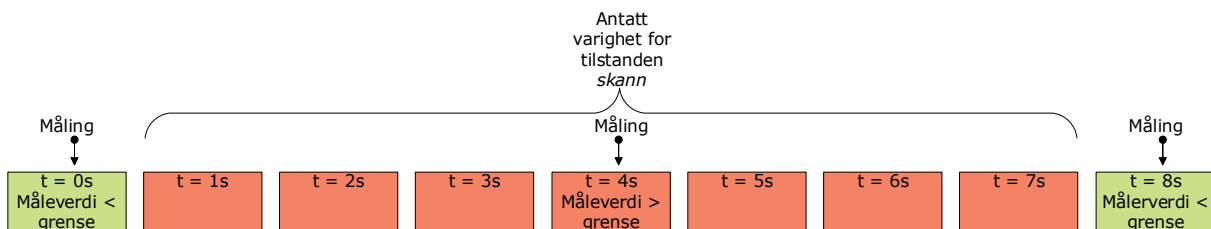
## 5.3 Bruken av CT-maskiner ved St. Olavs hospital

### 5.3.1 Bruken av de individuelle CT-maskinene

Formålet med de målingene som ga følgende resultater, var å kunne estimere sannsynligheten og hyppigheten for overbelastning av UPSens vekselretter. Det er derfor dette formålet som har vært styrende i analysen av disse resultatene.

Det skilles her mellom aktivitet innenfor normal arbeidstid (hverdager kl 07:00 til 15:00) og aktivitet utenom normal arbeidstid (alle andre tidspunkter, heretter kalt kveld, natt og helg). Denne oppdelingen er valgt etter en visuell gjennomgang av alle plottene i vedlegg 5. At en normal arbeidsdag er 8 timer spiller også inn i denne vurderingen.

Siden samplingstiden til dataloggerne er relativt lang, har det blitt gjort etterarbeider i innsamlet datamateriale for å kompensere for den usikkerheten dette medfører. En CT-maskin kan her befinne seg i kun to tilstander, *stand-by* eller *skann*. Start og stopp for tilstanden *skann* er definert i figur 37, hvor det røde område er definert som varigheten av et slikt *skann*.



**Figur 37 Prinsipp for definisjon av varigheten til et *skann*.**

Som figur 37 viser, blir starten og slutten på et *skann* definert av når et av målepunktene passerer en bestemt grenseverdi. Denne grensen er valgt slik at den er betydelig høyere enn *stand-by*-strømmen som CTene trekker, men lav nok til at alle betydelige avvik fra *stand-by*-strømmen registreres som et *skann*. Grenseverdiene er valgt etter en visuell gjennomgang av samtlige plott som finnes i vedlegg 5. For CT-maskinen i akuttmottaket er grenseverdien satt til 20 A, mens for de resterende CT-maskinene er grensen 10 A. Dette oppsettet har i perioden 10. til 17. juni gitt resultatene som sees i tabell 21. Totalt ble 4578 *skann* registrert i perioden

Det er store forskjeller i utnyttelsen av de ulike maskinene. Mens CT-maskinen til Nevrosenteret kun har utført 10 *skann* utenfor normal arbeidstid, har CT 2 i gastroenteret utført nesten dobbelt så mange *skann* utenfor normal arbeidstid som innenfor. Det er også en betydelig forskjell i varigheten på *skann* mellom de ulike maskinene. Mens maskinen til Nevrosenteret primært har meget hurtige *skann* med gjennomsnittlig varighet på 5 sekunder, bruker CT-maskinene i gastroenteret i gjennomsnitt 3 til 5 ganger så lang tid pr. *skann* som utføres.

I de påfølgende tabellene og figurene vil forskjellen i intensitet og varighet av *skann* ved de forskjellige CT-maskinene vises. Merk at alle dataloggerne ikke er startet på samme tidspunkt, så akkumulerte timer for målingene er forskjellige for de ulike senterne ved St. Olavs. I disse figurene er også konsekvensen av forskjellig samplingstid mellom dataloggerne synlig. Det er bare dataloggerne plassert i akutten og Nevrosenteret som har høy nok oppløsning til å logge *skann* med en varighet som gjør at de kan plasseres i stolpen for varighet på 0 til 5 sekunder.

Tidspunkt	CT-maskin	Antall <i>skann</i> i perioden	Total tid i tilstanden <i>skann</i> [h:m:s]	Gjennomsnittlig varighet <i>skann</i> [h:m:s]	Gjennomsnittlig tid mellom <i>skann</i> [h:m:s]
Hverdager kl. 07:00 – 15:00	Nevro	563	00:51:13	00:00:05	00:04:38
	Akutt	673	01:29:33	00:00:08	00:03:41
	Gastro, CT 1	423	02:49:19	00:00:24	00:10:11
	Gastro, CT 2	528	02:45:52	00:00:19	00:04:29
	Gastro, CT 3	466	02:15:37	00:00:17	00:08:05
	<b>Totalt</b>	<b>2653</b>	<b>10:11:34</b>	<b>00:00:14</b>	<b>00:05:51</b>
Kveld, natt og helg	Nevro	10	00:00:50	00:00:05	01:40:36
	Akutt	686	01:28:55	00:00:08	00:11:30
	Gastro, CT 1	81	00:37:22	00:00:28	00:26:22
	Gastro, CT 2	977	05:30:05	00:00:20	00:08:08
	Gastro, CT 3	174	00:43:38	00:00:15	00:37:41
	<b>Totalt</b>	<b>1925</b>	<b>08:20:50</b>	<b>00:00:16</b>	<b>00:13:15</b>
Alle dager, alle tidspunkt	Nevro	573	00:52:03	00:00:05	00:06:18
	Akutt	1356	02:58:28	00:00:08	00:07:37
	Gastro, CT 1	504	03:26:41	00:00:25	00:12:47
	Gastro, CT 2	1505	08:15:57	00:00:20	00:06:51
	Gastro, CT 3	640	02:59:15	00:00:17	00:16:08
	<b>Totalt</b>	<b>4578</b>	<b>18:32:24</b>	<b>00:00:15</b>	<b>00:08:58</b>

**Tabell 21 Bruken av CT ved St. Olavs hospital. Målt 10 til 17 juni 2022.**

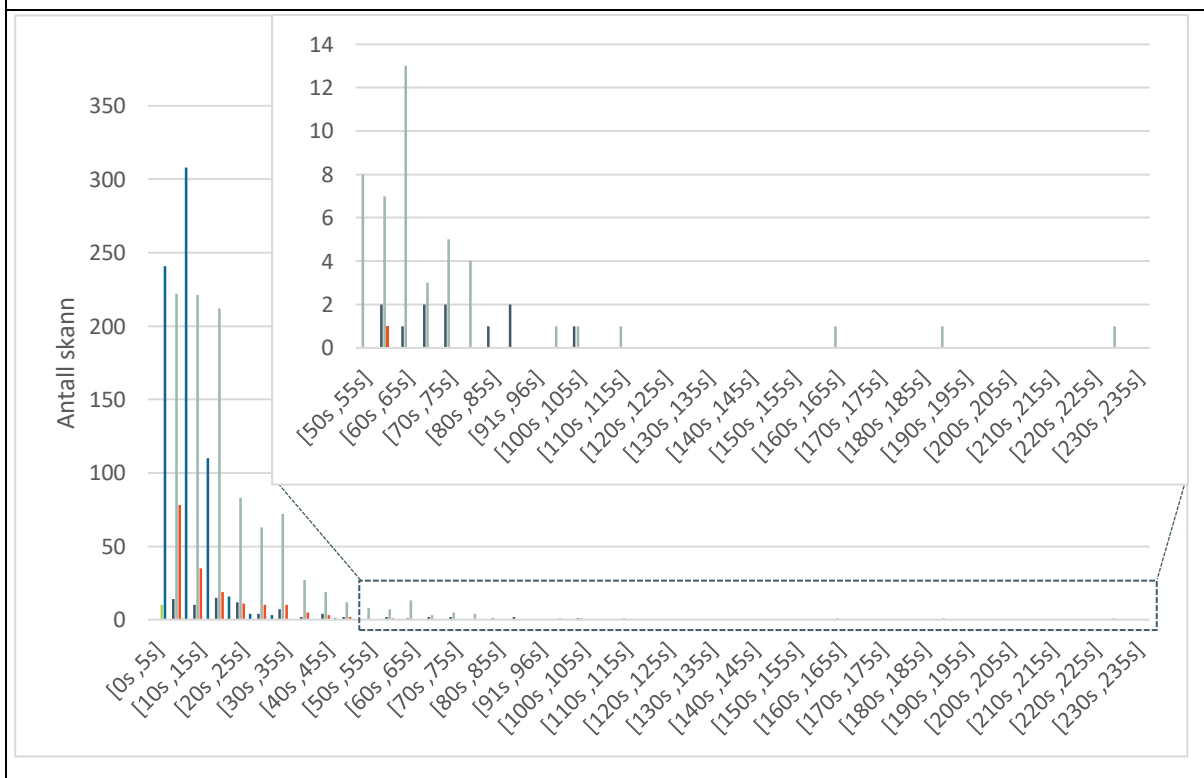
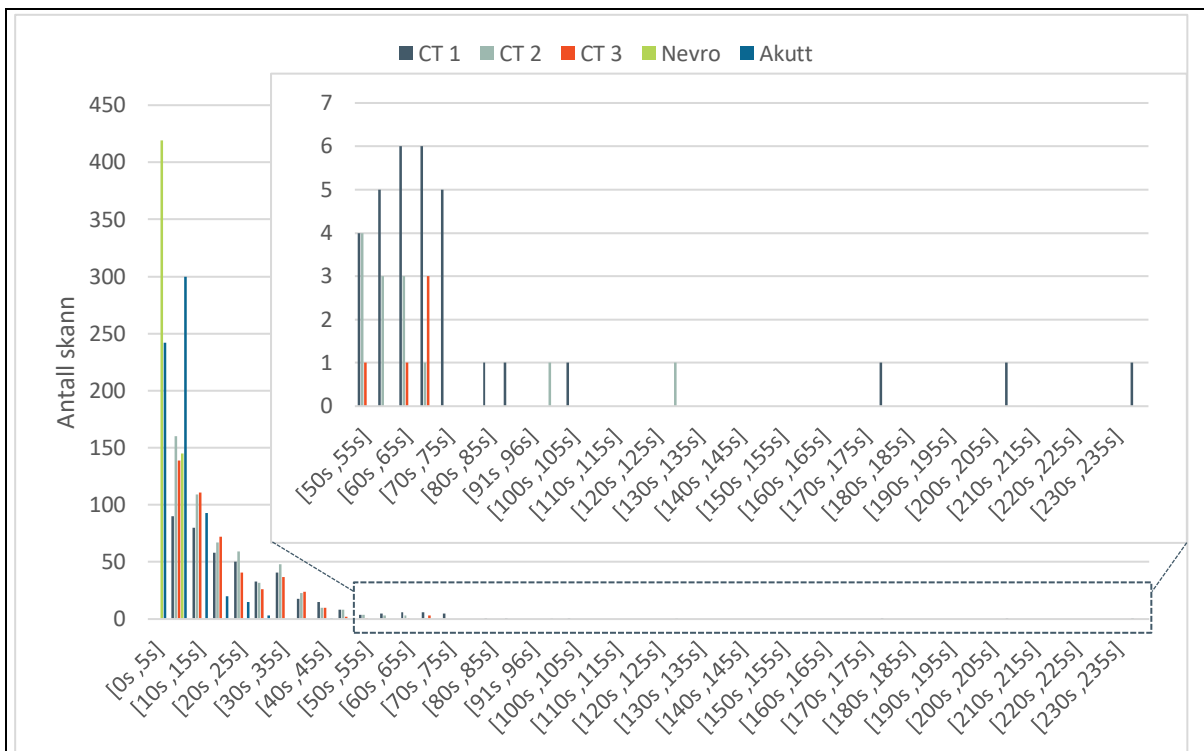
Plassering:	Oppstart Kl.:	Avsluttet Kl.:	Akkumulert tid [h:m:s]:	Akkumulert tid hverdag [h:m:s]:	Akkumulert tid kveld, natt og helg [h:m:s]:
Nevrosenteret	09:01:38	14:05:56	173:04:18	45:04:18	128:00:00
Akutt og Hjerter-lungesenteret	09:26:08	14:15:02	172:48:54	44:48:54	128:00:00
Gastrosenteret	09:41:09	13:52:37	172:11:28	44:11:28	128:00:00
<b>Totalt for alle maskiner</b>	-	-	<b>862:27:36</b>	<b>222:27:36</b>	<b>640:00:00</b>

**Tabell 22 Akkumulerte timer for datalogger og CT-maskiner.**

### Varigheten av tilstanden *skann*:

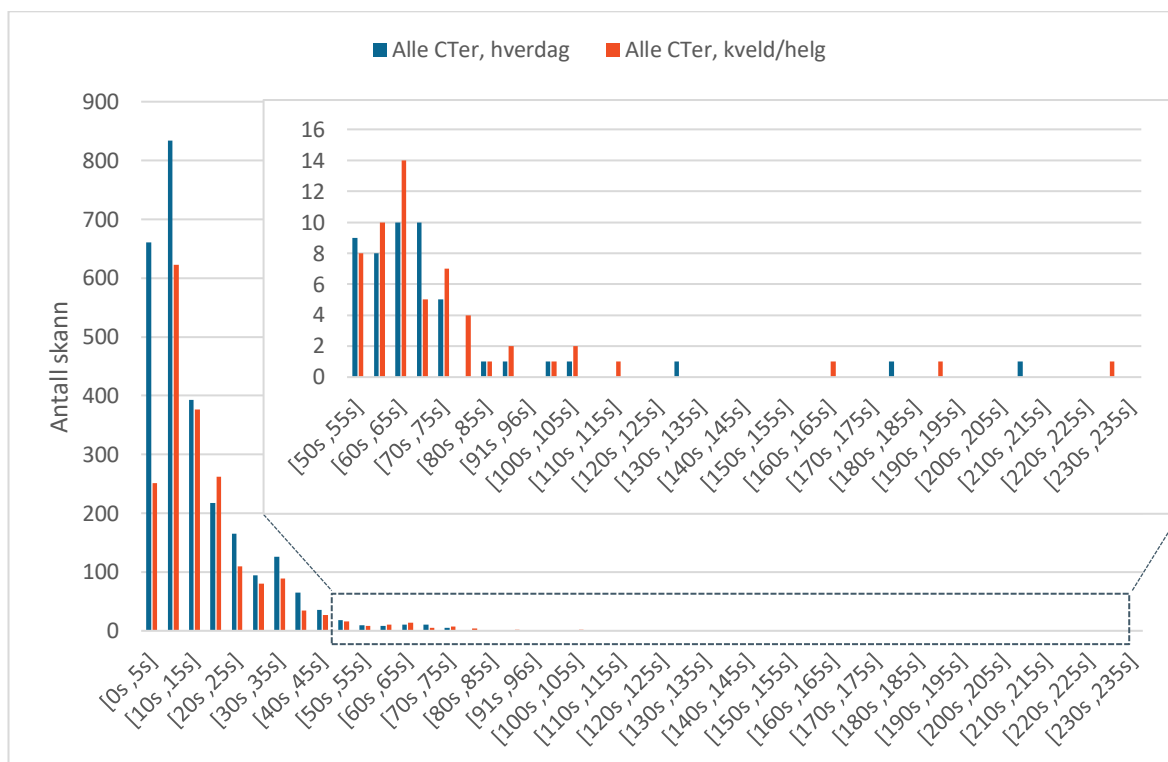
I figur 38 vises to histogrammer over observerte varigheter av tilstanden *skann* for de 5 CT-maskinene ved St. Olavs hospital. Alle maskinene har betydelig flere hurtige *skann* enn langvarige, og ytterst få av de registrerte skannene har en varighet på mer enn 60 sekunder. Ut fra disse histogrammene kan det se ut som varigheten til *skann* for de enkelte maskinene følger en eksponentialfordeling, selv om det er en liten overvekt av *skann* med svært kort varighet.





**Figur 38 Varighet skann ulike CT-maskiner St. Olavs. Øverst: Hverdager 07:00 til 15:00. Nederst: Kveld, natt og helg.**

I figur 39 er alle varighetene til de forskjellige observerte skannene lagt sammen i to kategorier, en for hvert aktivitetsnivå. Også etter dette ser det ut som varigheten til skannene følger en eksponentialfordeling. Avviket fra dette er fortsatt de aller hurtigste skannene, som det er en overvekt av. I figur 38 ser det ut som det er flere *skann* i kategorien 5 til 10 sekunder, enn det er i kategorien 0 til 5. Dette skyldes problematikken med samplingstiden, slik at det er bare *skann* registrert i hovedfordeling nødkraft i Nevrosenteret og Akutten/ Hjerte-Lunge-senteret som havner i denne kategorien. Dette er spesielt synlig i figur 39, hvor det for hverdagene mellom 7 og 15 er 661 *skann* med en varighet på 0 til 5 sekunder, mens det er hele 834 *skann* med en varighet på 5 til 10 sekunder.



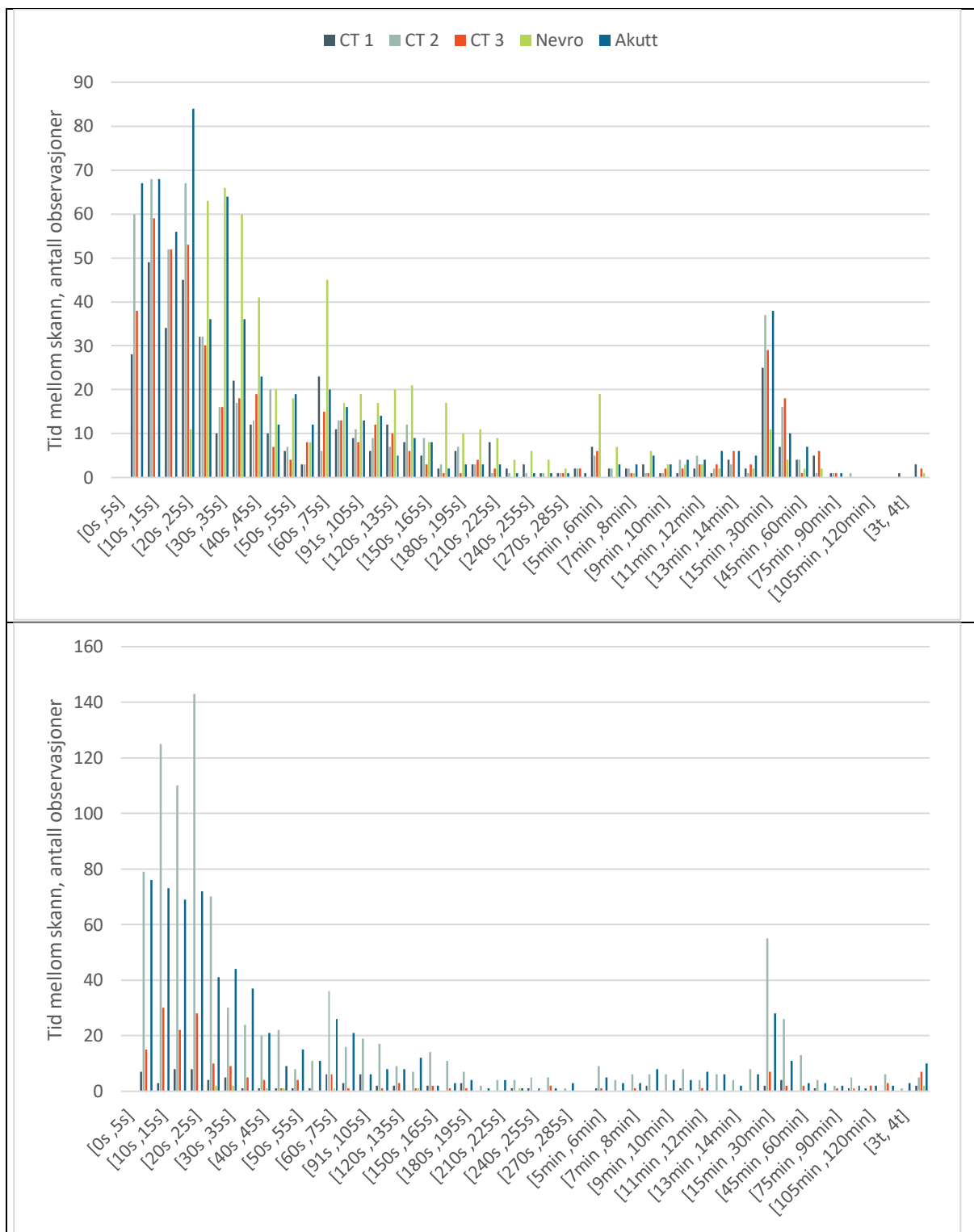
**Figur 39 Varighet skann for alle CT-maskiner ved St. Olavs.**

### Tid mellom tilstander av skann:

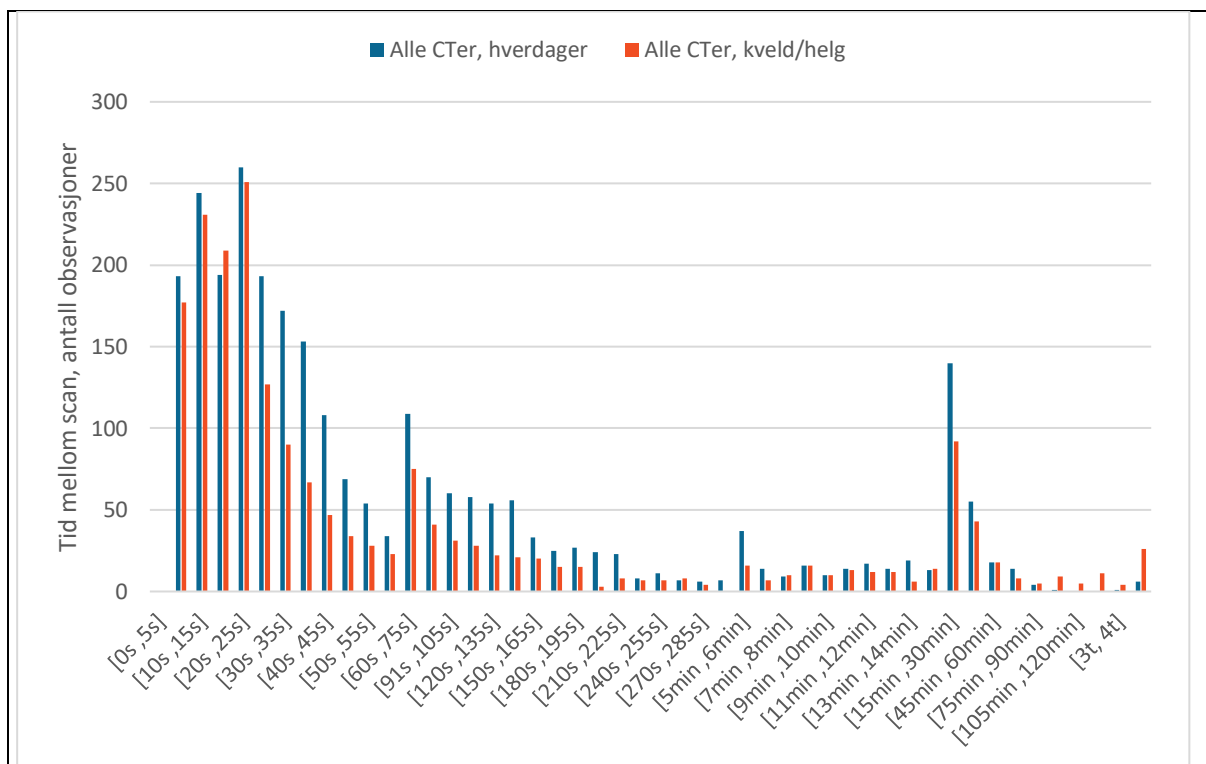
I figur 40 vises tiden mellom ulike *skann* for de 5 CT-maskinene ved St. Olavs hospital. Med tid mellom ulike *skann* menes det tiden som går fra et *skann* blir startet til et påfølgende *skann* for den samme CT-maskinen blir startet.

Som figur 40 viser er varigheten mellom flertallet av skannene korte. Det indikerer at en og samme pasient mottar flere *skann*, siden det vil være praktisk umulig å få en ny pasient inn i CT-gantryen ilt. den korte tiden som går mellom de fleste av skannene.

Fra og med intervallet 20 til 25 sekunder ser det ut som om tid mellom *skann* også følger en eksponentialfordeling. (Merk at også dette histogrammet ikke er delt opp i like store intervaller). For intervaller under 20 sekunder er det derimot ingen klar sammenheng, og for intervallet 0 til 5 sekunder er det ikke gjort en eneste observasjon, noe som følger av definisjonen som ble gjort for *skann* i figur 37. Siden denne definisjonen ble innført for å tolke måleusikkerheten på minst gunstige måte, vil intet *skann* kunne ha en kortere tid mellom seg enn det minstetiden til varigheten av et *skann* tilsier.



**Figur 40 Tid mellom skann, ulike CT-maskiner St. Olavs. Øverst: Hverdager 07:00 til 15:00. Nederst: Kveld, natt og helg.**



**Figur 41 Tid mellom skann, start til start, for alle CT-maskiner v. St. Olavs.**

For CT-maskinene ved St. Olavs hospital er det laget histogrammer som viser tid mellom skann og varigheten til skann. Disse to målene kan sammenlignes med målene MTBF og MDT i tradisjonell pålitelighetsanalyse.

Siden tid mellom skann på mange måter svarer til MTBF kan det se ut som denne til en viss grad følger en eksponentialfordeling. Siden MTBF svarer til MTTF pluss MDT er det egentlig to separate mål som er sammenlagt i figur 40 og 41, noe som kan forklare fordelingen som vises her.

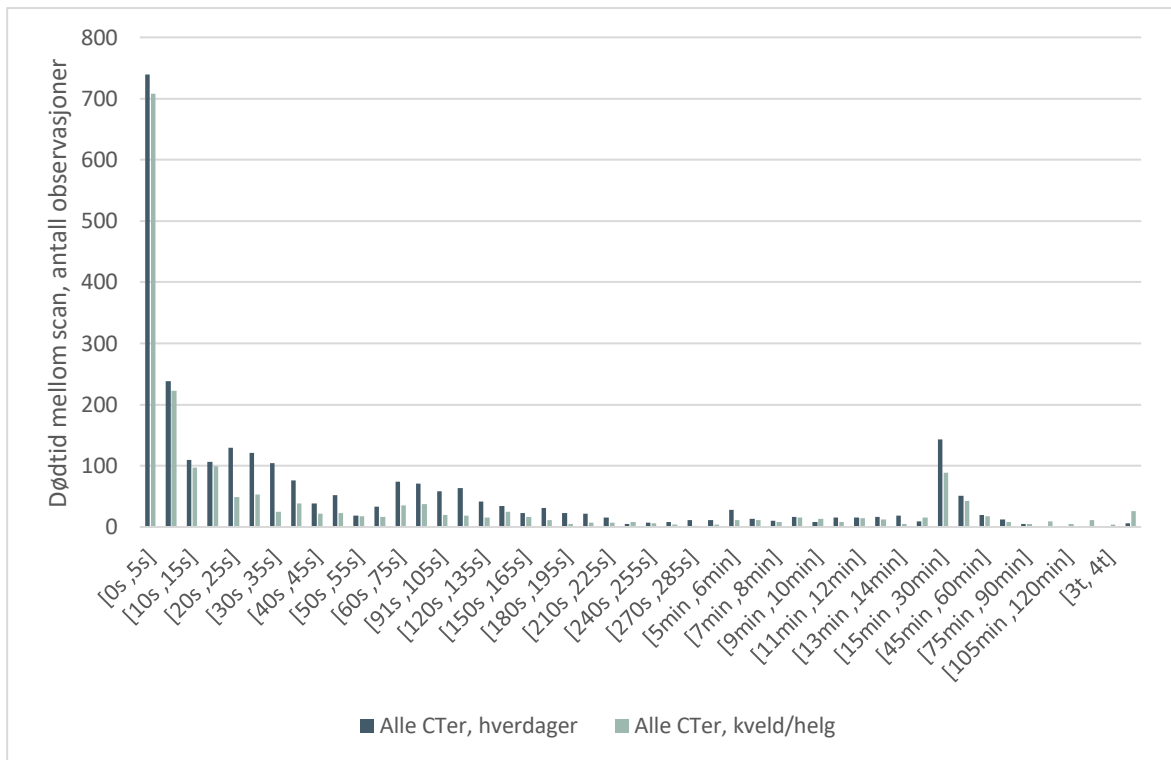
### Dødtiden mellom skann:

Med dødtid menes den tiden mellom skann hvor CT-maskinen er i en lite effektkrevende tilstand. Dødtid defineres som tiden fra et skann er avsluttet til et nytt skann på samme maskin starter. Trekkes varigheten til skann fra respektive tid mellom skann, fås varigheten på dødtiden mellom skannene. Siden denne tiden løper fra slutten av et skann til starten på det neste, kan dette målet til en viss grad sammenlignes med MTTF i klassisk pålitelighetsanalyse. Denne dødtiden sees i histogrammet i figur 42. Det er godt mulig at også dødtiden i realiteten er eksponensialfordelt, men dette er kun svakt indikert i figur 42.

Siden det i definisjonen av skann ble besluttet å bruke verst tenkelig scenario for å kompensere for lang samplingstid, kan det virke som om varigheten av skann i figur 42 blir litt for lange for de hurtigste skannene. Dette vil i sin tur gjøre at dødtiden mellom skann blir for kort for intervallene helt til venstre i figur 42.

Grunnen til at det er så interessant å se om dødtid mellom skann, og varigheten av skann, er eksponensialfordelt, er ønsket om å konstruere en teoretisk, universell og tidsuavhengig CT. Hvis dødtid mellom skann (ekvivalent med MTTF) og varighet av skann (ekvivalent med MDT) kan anses for å være eksponensialfordelt, vil de konstruerte

sviktintensitetene og reparasjonsratene også være konstante og derav tidsuavhengige (jf. figur 21, badekarkurve).



**Figur 42 Dødtid mellom skann, slutt til start, for alle CT-maskiner v. St. Olavs.**

### 5.3.2 Estimering av sviktintensitet og reparasjonsrate CT (*skann*)

For å kunne modellere påliteligheten til strømforsyningen frem til CT-maskinene ved hjelp av tradisjonell pålitelighetsanalyse må to parametere bestemmes. Disse er sviktintensiteten  $\lambda$  og reparasjonsraten  $\mu$ , som henholdsvis representerer med hvilken frekvens *skann* starter med og hvilken frekvens *skann* avsluttes med.

Formålet med disse beregningene er å få en sviktintensitet og reparasjonsrate som representerer en *universell* CT-maskin, uavhengig av hvilken avdeling som primært benytter den. Denne *universelle* CT-maskinen er en teoretisk konstruksjon for å kunne modellere forventet overbelastning av UPSens vekselretter.

Etter en visuell gjennomgang av plottede grafer i vedlegg 5, ble det besluttet å dele opp sviktintensiteten og reparasjonsraten i to deler. En del representerer bruken av CT-maskinen innenfor normal arbeidstid, dvs. mandag til fredag, 7 til 15. Den andre delen representerer alle tidspunkt utenom normal arbeidstid.

Fra resultatene i tabell 21 og 22 kan følgende sviktintensiteter ( $\lambda$ ) og reparasjonsrater ( $\mu$ ) estimeres:

Parameter:	Tallverdi
$\hat{\lambda}_{\text{hverdager kl.7 til 15}}$	12,49839694 h <sup>-1</sup>
$\hat{\lambda}_{\text{kveld/natt og helg}}$	3,047560412 h <sup>-1</sup>
$\hat{\mu}_{\text{hverdager kl.7 til 1}}$	260,282335 h <sup>-1</sup>
$\hat{\mu}_{\text{kveld/natt og helg}}$	230,6156406 h <sup>-1</sup>

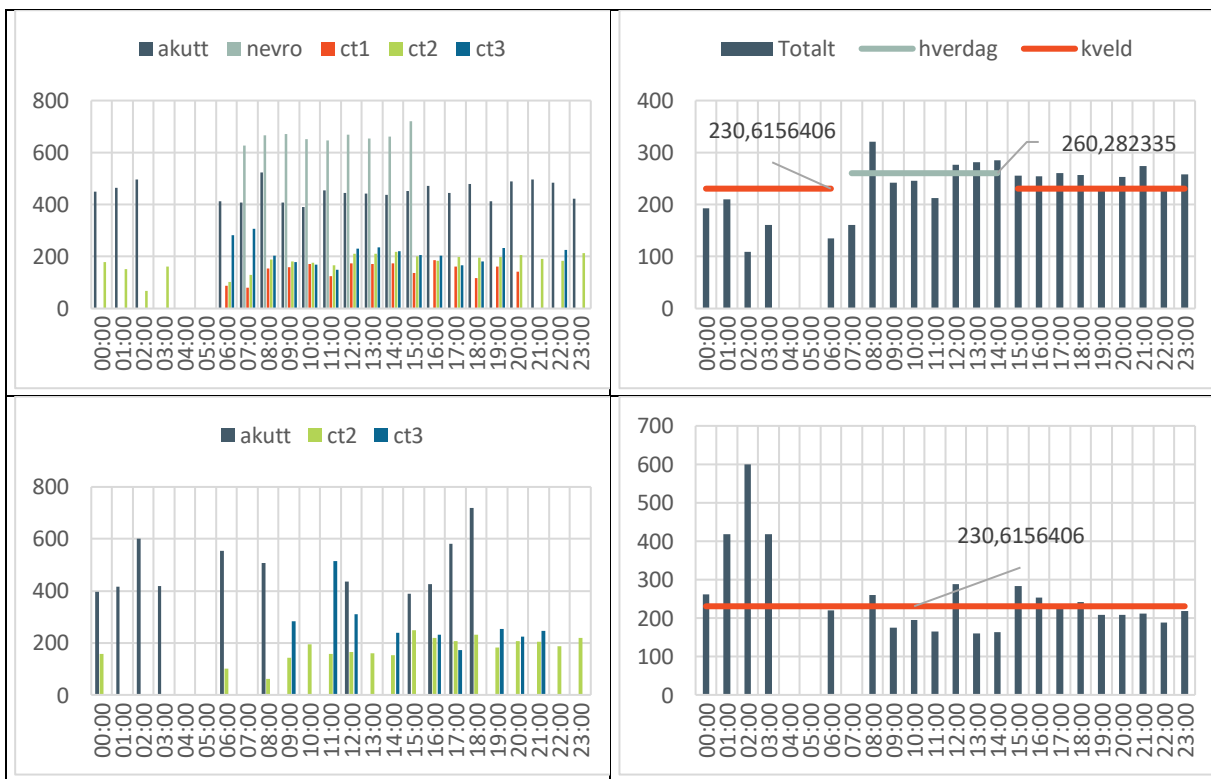
**Tabell 23 Sviktintensitet og reparasjonsrate for en *universell* CT-maskin**

Resultatene i tabell 22 er ikke reelle sviktintensiteter og reparasjonsrater, men er utelukkende beregnet for å kunne benytte klassisk pålitelighetsanalyse for modelleringen av mulige senarioer for når UPSens vekselretter blir overbelastet. Det er ingenting som går i stykker, eller må repareres i dette tilfellet. CT-maskinene vil derfor være *god som ny* det øyeblikket et *skann* avsluttes.

For å sikre at sviktintensiteten og reparasjonsraten innenfor valgte intervaller ikke varierer for mye med tiden på døgnet, ble følgende plott utarbeidet hvor de mer tidsuavhengige estimatene testes mot timesverdier:



**Figur 43 Sviktintensiteten som funksjon av klokkeslett. Øverst: Hverdager. Nederst: Helg Venstre: Sviktintensitet pr. maskin. Høyre: Total sviktintensitet for universell CT.**



**Figur 44 Reparasjonsraten som funksjon av klokkeslett, intervaller på en time. Øverst: Hverdager. Nederst: Helg Venstre: Reparasjonsrate pr. maskin. Høyre: Total reparasjonsrate for universell CT.**

Som figur 43 viser, er det en betydelig forskjell i aktiviteten til CTene innenfor og utenfor normal arbeidstid. Dette viser hvorfor det var nødvendig å splitte opp sviktintensiteten i to deler. Som vist øverst til høyre i figuren treffer estimatene for sviktintensiteten relativt godt på de tidsavhengige sviktintensitetene. Nede i høyre hjørne på figur 43 kan man legge merke til at estimatet for sviktintensiteten er en god del høyere enn det man kunne forvente om denne gjaldt for kun disse to dagene i helgen. Her er det spesielt CT 2 i gastroenteret som drar opp estimatet. Som vist oppe til venstre i figuren er det nesten like høy aktivitet her på kvelden frem til klokken 21, som det er innenfor normal arbeidstid. Om dette er normalt aktivitetsnivå for CT2, eller om dette er overtidsarbeid for å kompensere for koronastengte sykehus eller ta unna pasienter før fellesferien vites ikke. Uansett vil denne aktiviteten bli en del av kveld, natt og helg-estimatet. At akutt-CTen benyttes til alle døgnets tider er som forventet, men at det skulle være større aktivitet på CT2 enn akutt-CTen mellom 15 og 21 alle dager i uken var en overraskelse.

En sviktintensitet som skiller seg ut fra de andre i venstre del av figur 43, er den for akutt CTen mellom klokke 8 og 9. I dette tidsrommet er det stor aktivitet på denne maskinen. Datamaterialet viser at det er omtrent samme antall *skann*, med samme varighet hver dag. Det er derfor nærliggende å tro at dette avviket skyldes daglig kontroll og testing av denne kritiske CT-maskinen. Det som er litt overaskende er at det ikke er spor av noen slik daglig kontroll på noen av de andre maskinene. Slike kontroller og kalibrering må utføres, gjerne flere ganger daglig, for å sikre at bildekvaliteten blir høy nok. En mulig forklaring er at akutt CTen er den eneste CT-maskinen i utvalget som ikke er produsert av Siemens, og derfor kan det tenkes at det er et annet test- og kalibreringsregime for denne. En annen forklaring er at man ønsker en daglig stresstest av akutt CTen, slik at feil og mangler oppdages under testen istedenfor senere når en traumepasient ligger inne i den.

I motsetning til sviktintensiteten, er det nesten ikke forskjell i de tidsavhengige reparasjonsratene. Til venstre i figur 44 vises reparasjonsratene for de individuelle CT-maskinene. Her er det nesten lik rate, time for time, for en og samme maskin. Dette indikerer at varigheten på et *skann* når det først har startet er ganske likt fordelt mellom antall undersøkelser. Mens sviktintensiteten kan påvirkes av ytre forhold, slik som antall pasienter pr. time eller når radiografene har matpause, er varigheten av et *skann* ofte forhåndsdefinert i rutinen som CT-maskinen kjører, og derfor også ganske lik fra gang til gang. Dette gjør at estimatet for reparasjonsraten i større grad blir påvirket av hvilke maskiner som benyttes i og utenfor normal arbeidstid. Spesielt CT-maskinen til Nevrosenteret drar opp dette estimatet for hverdager, siden denne kun er benyttet innenfor normal arbeidstid.

Estimatene i tabell 23 antas derfor å være gode nok til å kunne benyttes i de videre beregningene, til tross for at sviktintensiteten varierer noe ut fra hvilken time det er snakk om.



### 5.3.3 Forventet utnyttelse av CT maskiner

Videre følger de beregnede pålitelighetsdataene for forventede overbelastninger av UPSens vekselretter. Det vises her en samstilling av resultatene ved ulike k-av-n konfigurasjoner basert på de to ulike brukssenarioene *hverdag* og *kveld, natt og helg*.

De påfølgende resultatene baseres seg på formelen for identiske komponenter i en k-av-n konfigurasjon, slik vist i kapittel 4.3.4. Den identiske komponenten i dette tilfelle er den *universelle* CT-maskinen fra kapittel 5.3.2. Benyttes denne *universelle* CTen som grunnlag for beregningene av vekselretterens tilgjengelighet med tanke på overbelastning, fås disse resultatene for ulik grad av dekning:

n \ k	1	2	3	4	5
1	0,96011396				
2	0,998409104	0,921818816			
3	0,999936545	0,995354221	0,885051114		
4	0,999997469	0,999753775	0,990954666	0,84974993	
5	0,999999899	0,999987749	0,999402813	0,985322569	0,815856771

**Tabell 24 Tilgjengelighet vekselretter UPS, overbelastning (OB), Hverdager, Man – Fre 07:00 – 15:00.**

n \ k	1	2	3	4	5
1	0,979874214				
2	0,999594953	0,960153475			
3	0,999991848	0,998801162	0,940829631		
4	0,999999836	0,999967885	0,997634439	0,921894695	
5	0,999999997	0,999999193	0,999920922	0,996110117	0,90334084

**Tabell 25 Tilgjengelighet vekselretter UPS, overbelastning (OB), Kveld, natt og helg, Man – Fre 07:00 – 15:00 og Lør – Søn 00:00 – 24:00.**

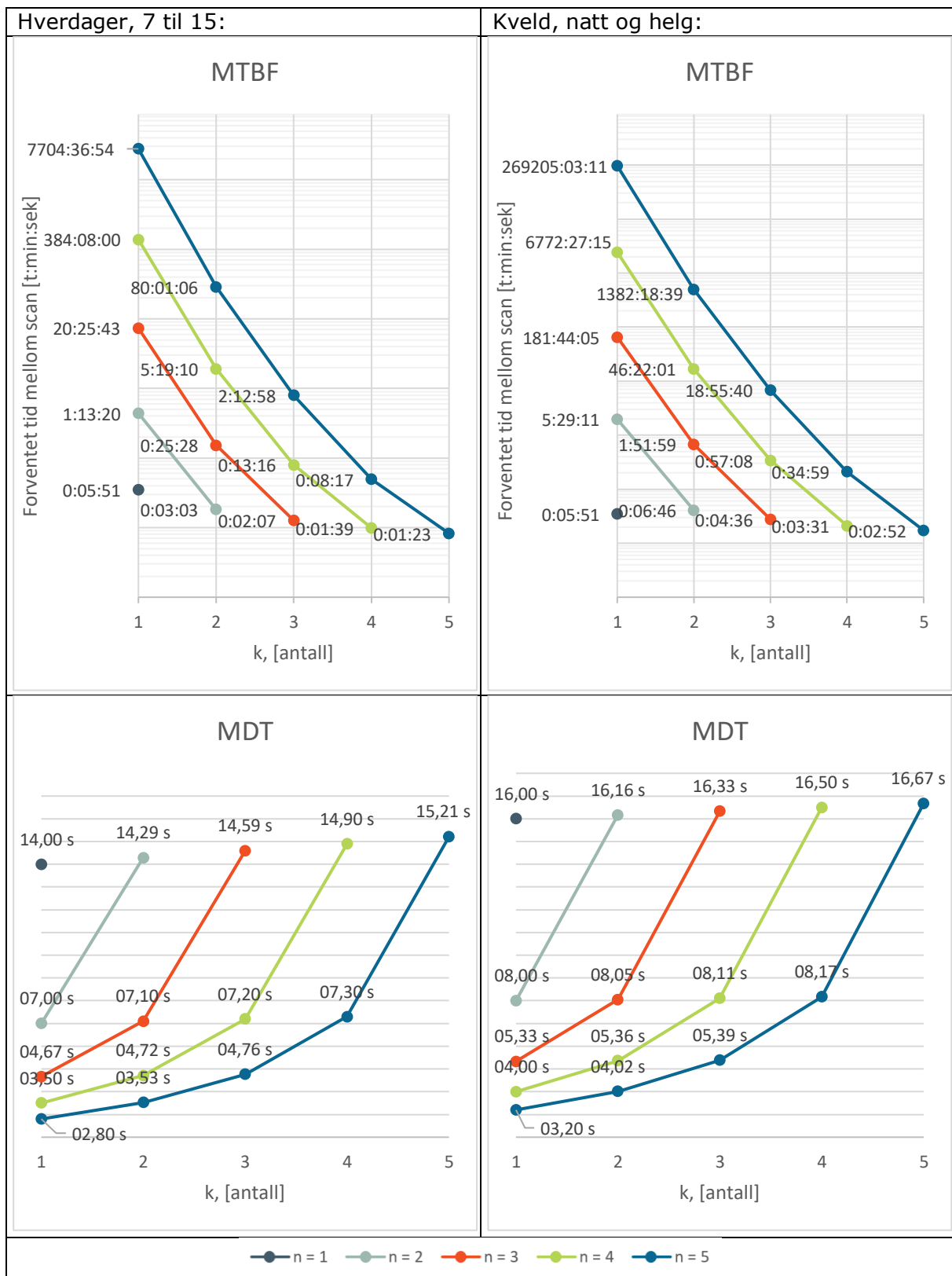
n \ k	1	2	3	4	5
1	0,0975				
2	1,222232143	0,050775223			
3	20,42873724	0,424335788	0,035256386		
4	384,13322	5,319352205	0,220981991	0,027540782	
5	7704,614869	80,01825532	2,216133678	0,138097351	0,022947928

**Tabell 26 MTBF vekselretter UPS, overbelastning (OB), hverdager**

n \ k	1	2	3	4	5
1	0,220833333				
2	5,486328125	0,112684531			
3	181,7346191	1,866337552	0,076665984		
4	6772,454166	46,36682356	0,952335272	0,058680479	
5	269205,0531	1382,310927	18,92766353	0,583137259	0,047908581

**Tabell 27 MTBF vekselretter UPS, overbelastning (OB), kveld, natt og helg**

Ved å regne ut frekvensen til de ulike k-av-n konfigurasjonene kan MTBF og MDT for hendelsen *overbelastning av UPSens vekselretter (OB)* regnes ut. Avhengig av hvor mange CT-maskiner som forsynes ( $n$  antall) og hvor mange av disse som ikke kan skanne samtidig ( $k$  antall), får følgende resultater:



**Tabell 28 Overbelastning (OB) av vekselretter UPS.**

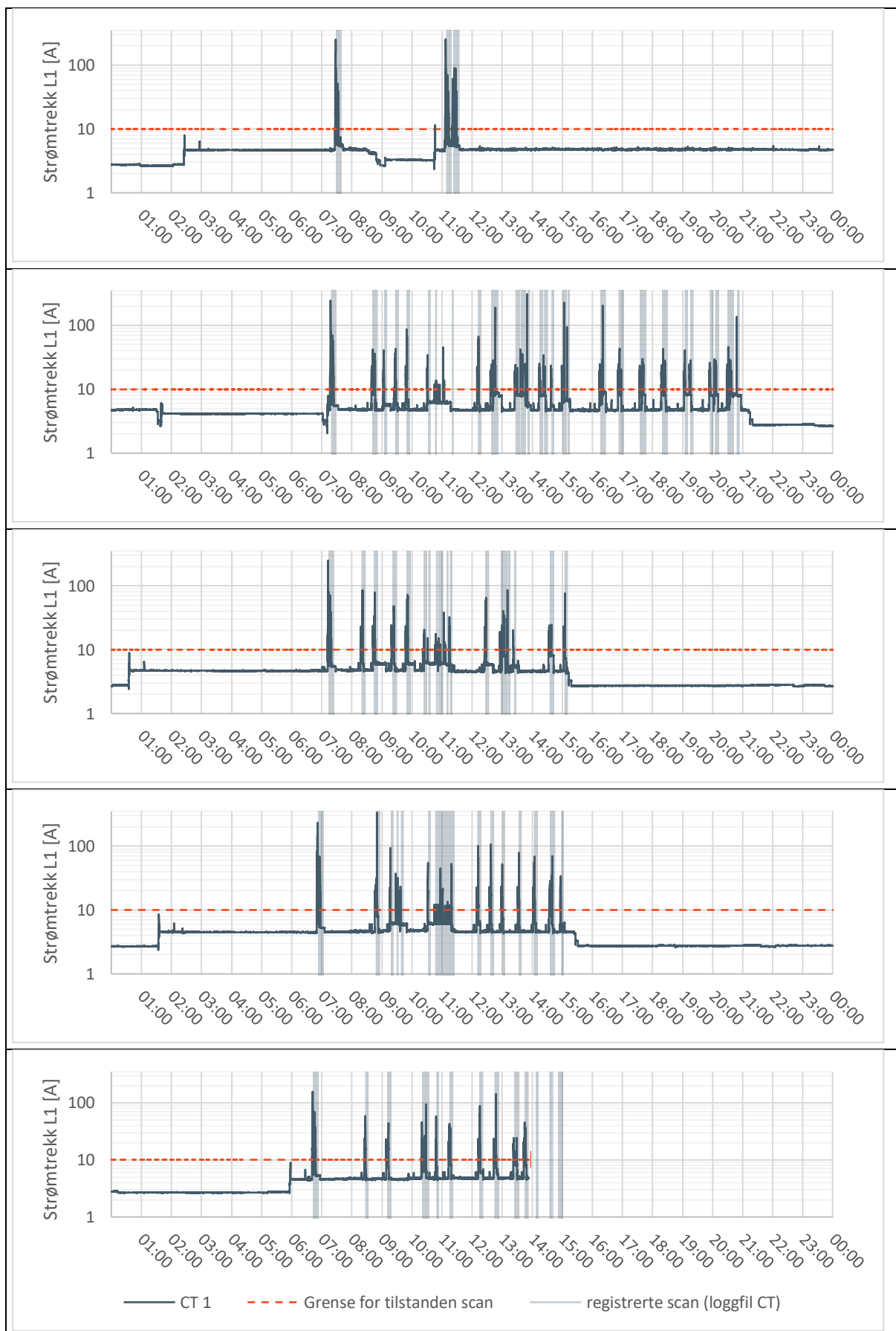
## 5.4 Kvalitetssikring, modell og metode

### 5.4.1 Kontroll av måleoppsett.

I forberedelsene til målingene ved St. Olavs ble tilgjengelig måleutstyr testet ved kalibreringslabben til institutt for elkraftteknikk, NTNU. Under disse testene ble det oppdaget at tilgjengelige dataloggere av typen Keysight 34972A LXI Data Acquisition / Data Logger Switch Unit [54] bruker ca. et sekund pr. kanal for å innhente et datapunkt. Dette gjorde at samplingstiden for dataloggeren som ble plassert i Gastrobygget ble på hele 4 sekunder, siden 4 kanaler var i bruk.

For å sikre at en så lang samplingstid ikke ville ha en betydelig negativ påvirkning på datasettet, ble målingene for en CT-maskin sammenlignet med maskinens egne, interne loggfil. Det var ikke ønskelig å komme i en situasjon hvor mange hurtige *skann* ikke ble registrert. Resultatene under viser at nesten samtlige loggførte *skann* for CT 1 i Gastrobygget også ble detektert av dataloggeren plassert i hovedfordelingen. Det er funnet et avvik. Tirsdag klokken 11:22 er det registrert et *skann* i loggfilen uten at dataloggeren har registret et strømtrekk som var høyere enn valgte grense. Tilgjengelig logg for CT 1 startet mandag morgen 13. juni og slutter fredag 17 juni. En grafisk fremstilling av loggen og målingene fra CT 1 er presentert i figur 45, hvor fargelagt område representerer start og stopp for et *skann* i loggen. Fra disse grafene kan det se ut som klokken til dataloggeren ligger 3 minutter foran klokken til CT-maskinen.

I teorien kunne loggene fra samtlige Siemens-maskiner blitt hentet ut i samarbeid med en av St. Olavs sine teknikere. Dessverre viste det seg at disse loggene nullstilles hver helg. Tilfeldigheter gjorde at det var mulig å hente ut en av loggfilene for den ene CTen på fredag den 17. juni. Grunnet høy aktivitet på sykehuset, ble det besluttet at loggfilene for resterende maskiner kunne hentes ut påfølgende uke. Men da var maskinene resatt, og de diagnostiske loggfilene slettet.



**Figur 45 Sammenligning målinger CT 1 med loggfil for maskinen, fra mandag 13.06 (øverst) til fredag 17.06 (nederst)**

## 5.4.2 Kontroll av beregninger

Foruten de direkte resultatene fra pålitelighetsnettverket, er det gjort en kvalitetssikring av beregningene. Et ekvivalent feiltre til pålitelighetsnettverket i figur 28 ble satt opp i pålitelighetsanalyseprogrammet CARA-FaultTree v4.0. Det eneste forskjellen mellom feiltreet og pålitelighetsnettverket var at i CARA ble en k-av-n blokk benyttet for å representere dekningen av de individuelle CT-maskinene. I dette programmet ble tilgjengeligheten til strømforsyningen frem til CT-maskinene, og frekvensen til avbrudd i denne, beregnet. Tilgjengeligheten fra CARA og tilgjengeligheten som er beregnet vha. formlene i denne rapporten er, som forventet, identiske. Derimot er det et ubetydelig, men reelt, avvik i MTBF mellom disse to metodene. Dette avviket kan skyldes flere forhold, men en sannsynlige forklaringer er denne:

MTBF er det inverse resultatet av frekvensen til avbrudd i dette tilfelle. Dette gjør at resultatene fra CARA må hentes ut fra programmet, for så å inverteres i Excel eller annet egnet regneverktøy. Siden CARA oppgir frekvensen med bare 5 desimalers presisjon gir dette rom for avvik, spesielt med tanke på at beregningene gjort i denne rapporten er gjort i et og samme regneark, uten noen form for avrunding i mellomregningene.

Uansett er det verd å merke seg at MTBF for beregningene i denne rapporten, og kvalitetssikringen som er utført i CARA, er verdimesig svært like. Dette indikerer at formlene og metodene som er anvendt her, har ført til et korrekt resultat. I påfølgende tabeller er MTBF fra CARA sammenlignet med de beregnede verdiene fra kapittel 5.1.3, som her står i parentes.

n k	1	2	3	4	5
1	0,420032788 (0,437359034)				
2	5,280662569 (5,499171036)	0,218714617 (0,227735632)			
3	87,64453285 (91,24472737)	1,833887054 (1,909790312)	0,151846215 (0,158108373)		
4	1429,07711 (1479,705258)	22,96761567 (23,91731189)	0,955074262 (0,994604598)	0,118598669 (0,123488916)	
5	7781,331875 (7854,353192)	335,0402562 (348,4588165)	9,581123256 (9,977836492)	0,596843391 (0,621545361)	0,098805774 (0,102879148)

**Tabell 29 Kontroll CARA, MTBF hverdager kl. 7 til 15 [år]**

n k	1	2	3	4	5
1	0,969792552 (0,989553441)				
2	24,13312907 (24,62561414)	0,494840506 (0,504921582)			
3	743,5758467 (757,6687656)	8,222309138 (8,390338905)	0,336646813 (0,343504975)		
4	7577,463883 (7616,277192)	200,6617246 (204,6890736)	4,197131123 (4,282949911)	0,257651901 (0,262900068)	
5	10061,54324 (10063,3242)	3812,495029 (3860,918286)	82,88215603 (84,56560966)	2,57034637 (2,622906329)	0,210338352 (0,214622477)

**Tabell 30 Kontroll CARA, MTBF kveld, natt og helger [år]**

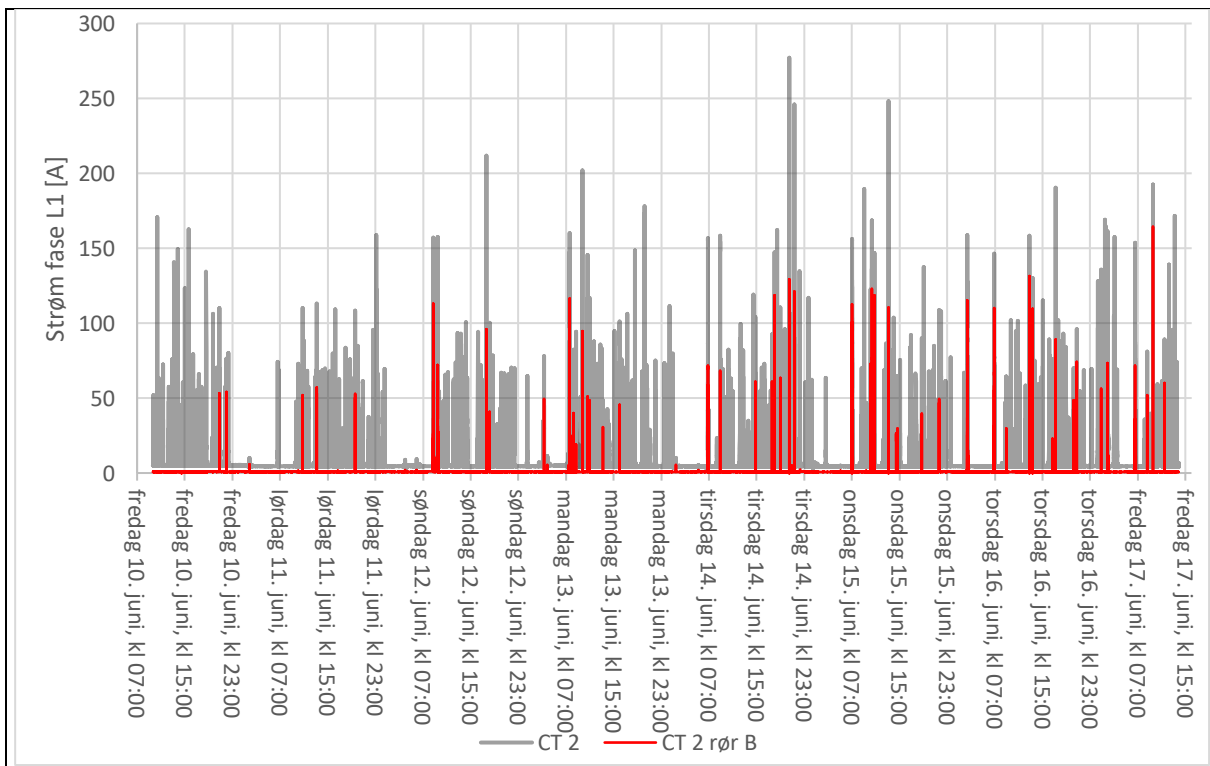
### 5.4.3 Utnyttelse av DSCT

CT 2 i gastrobygget ble en gang i tiden oppgradert fra en tradisjonell CT-maskin med et røntgenrør, til en nyere type fra Siemens med to røntgenrør (DSCT). Den eksisterende stigekabelen fra hovedfordelingen med tilhørende effektbryter, er benyttet for å forsyne røntgenrør- og generator B. En ny stigekabel, tilknyttet en effektbryter som sto i reserve, var trukket frem til røntgenrør- og generator A. Denne oppdelingen gjorde det mulig å studere bruken av doble rør fra det innsamlede datamaterialet.

Som både tabell 31 og figur 46 viser, blir rør B i denne DSCT-maskinen sjelden brukt. I figur 46 vises strømtrekket til rør b opp mot totalt strømtrekk. Disse resultatene kan indikere at rent pålitelighetsmessig, vil det ikke ha stor betydning om det installeres en DSCT sammen med vanlige CTer. Da kan det forventes at UPSen vil gå i bypass litt oftere enn om alle CT-maskinene var av en tradisjonell type. DSCT er ikke hensyntatt i beregnede påliteligheter for strømforsyningen frem til CT.

Tidspunkt	Røntgenrør- og generator	Antall skann i perioden	Tid i tilstanden skann [h:m:s]	Gjennomsnittlig varighet skann [h:m:s]	Gjennomsnittlig tid mellom skann [h:m:s]
Hverdager kl. 07:00 – 19:00	A	814	03:53:36	00:00:17	00:04:32
	B	63	00:12:13	00:00:12	01:01:41
Kveld, natt og helg	A	687	03:30:30	00:00:18	00:09:38
	B	78	00:14:30	00:00:11	01:13:00
Alle dager, alle tidspunkt	A	1501	07:24:06	00:00:18	00:06:52
	B	141	00:26:43	00:00:11	01:07:59

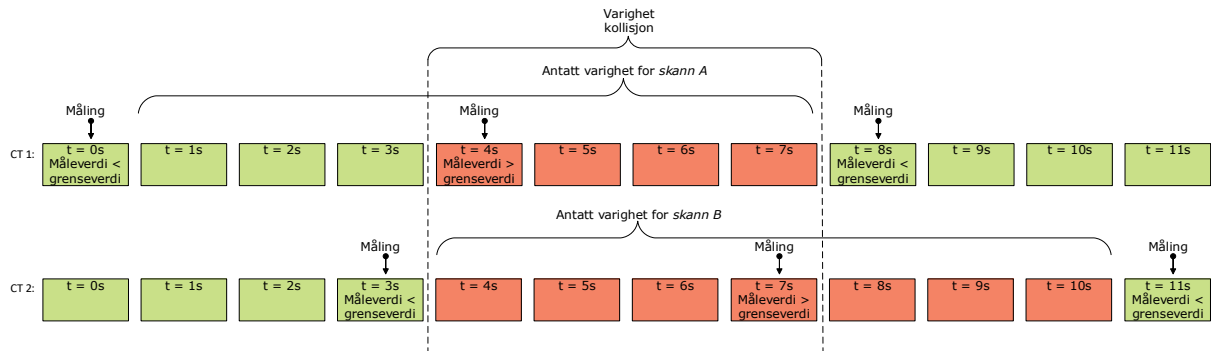
**Tabell 31 Bruken av doble rør ved St. Olavs, CT 2. Måleperiode 10 juni til 17 juni 2022.**



**Figur 46 Utnyttelse rør B i DSCT ved St. Olavs hospital, sett opp mot totalt strømtrekk.**

#### 5.4.4 Detekterte kollisjoner ved St. Olavs hospital

Ut fra de innsamlede dataene ved St. Olavs hospital er det også mulig å studere hvor ofte to eller flere CT-maskiner tar bilde samtidig. Dette gjøres ved å sammenholde dataene for samtlige CT-maskiner, slik illustrert i figur 47. Antall detekterte kollisjoner i måleperioden, samt varigheten til disse er listet opp i tabell 32.

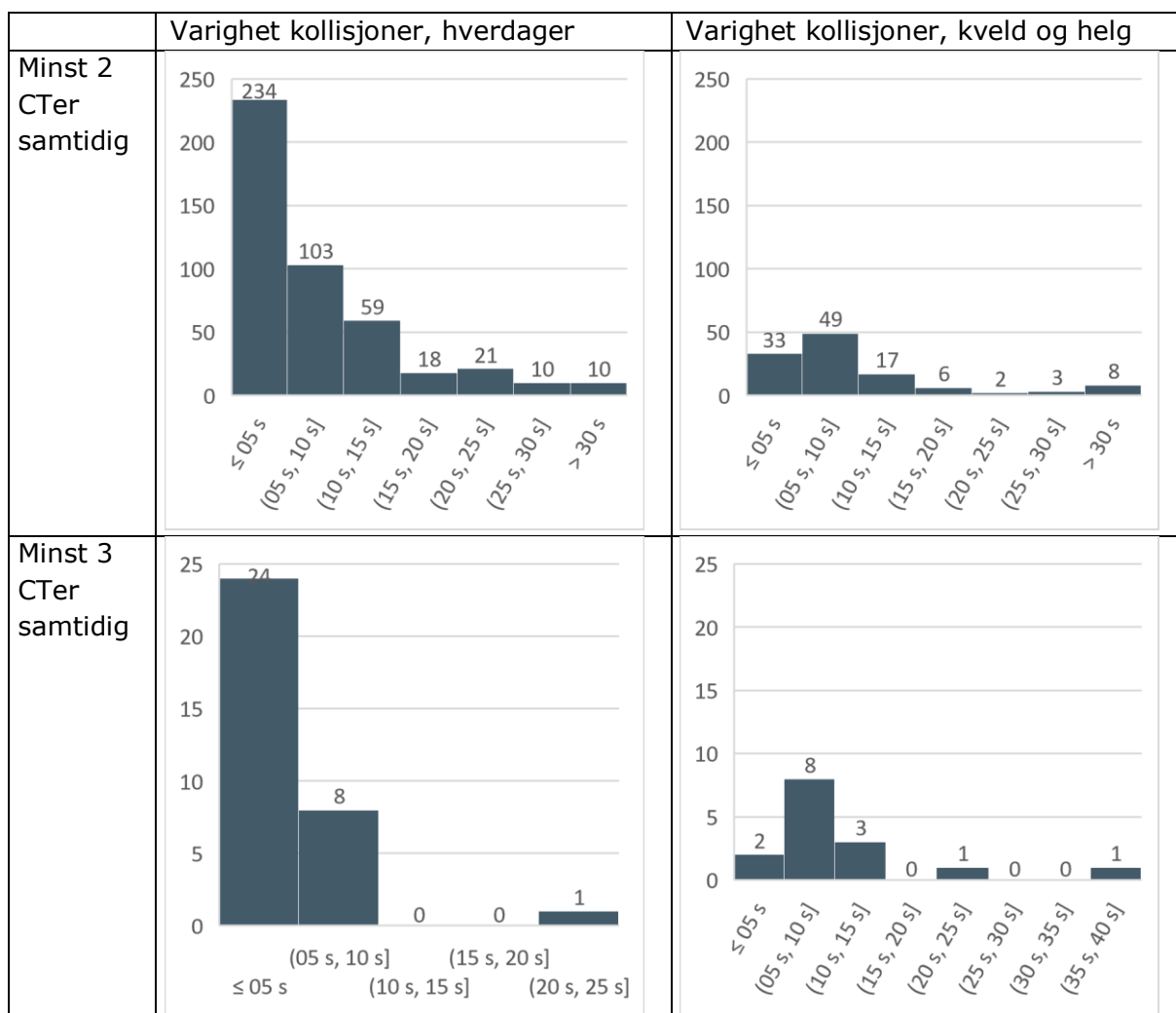


**Figur 47 - Definisjon av kollisjon mellom to CT-maskiner i tilstanden skann**

Tidspunkt	Type kollisjon	Antall kollisjoner i perioden	Akkumulert tid i kollisjon [h:m:s]	Gjennomsnittlig varighet på kollisjon [h:m:s]	Gjennomsnittlig tid mellom kollisjoner [h:m:s]
Hverdager kl. 07:00 – 15:00	Minst 2 CTer samtidig	454	01:02:25	00:00:08	00:05:37
	Minst 3 CTer samtidig	33	00:02:36	00:00:05	04:37:52
Kveld, natt og helg	Minst 2 CTer samtidig	118	00:21:51	00:00:11	01:05:52
	Minst 3 CTer samtidig <sup>1</sup>	15	00:02:47	00:00:11	01:14:07
Alle dager, alle tidspunkt	Minst 2 CTer samtidig	572	01:24:16	00:00:09	00:18:03
	Minst 3 CTer samtidig	48	00:05:23	00:00:07	03:32:51

**Tabell 32 Resultater deteksjon av kollisjoner, St. Olavs hospital**

<sup>1</sup> For kollisjoner mellom 3 eller flere CT maskiner ble det registrert 15 kollisjoner i tidsrommet definert som kveld eller helg. 14 av disse kollisjonene ble registrert på torsdag 16. juni i tidsrommet 06:50 til 07:00, mens en ble registrert onsdag 15. juni kl 15:05.



**Tabell 33 Histogram varigheten av kollisjoner mellom skann**

Som tabell 33 viser, vil de aller fleste kollisjoner ikke være spesielt lange. Studeres stolpediagrammene, og spesielt de oppe i venstre hjørne, ser det ut som varigheten av slike kollisjoner følger fordelingen til varighet av *skann* (figur 39). Det er en stor overvekt av kollisjoner som ikke varer lenge, mens kollisjoner lenger enn 30 sekunder utgjør en meget liten andel.

Studeres derimot stolpene tilhørende kollisjonene for kveld, natt og helg er bilde litt mer uklart. Dette kan skyldes at det er observert færre kollisjoner i dette tidsrommet, slik at en entydig trend ikke peker seg ut, eller det kan skyldes at det er en annen utnyttelse av CT-maskinene på dette tidspunktet. Som resultatene fra de enkelte maskinene i kapittel 5.3.1 viste, er CTen i Nevrosenteret knapt i bruk utenfor normal arbeidstid. Siden dette også er den CT-maskinen med kortest varighet på skannene sine, vil det være rimelig å tro at dette vil påvirke fordelingen på kveldstid noe.



	Tid mellom kollisjoner, hverdager	Tid mellom kollisjoner, kveld, natt og helg																																												
Minst 2 CTer samtidig	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tid mellom kollisjoner</th> <th>Antall</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>≤ 00:30</td><td>188</td></tr> <tr><td>(00:30, 01:00]</td><td>62</td></tr> <tr><td>(01:00, 01:30]</td><td>31</td></tr> <tr><td>(01:30, 02:00]</td><td>15</td></tr> <tr><td>(02:00, 02:30]</td><td>16</td></tr> <tr><td>(02:30, 03:00]</td><td>11</td></tr> <tr><td>(03:00, 03:30]</td><td>6</td></tr> <tr><td>(03:30, 04:00]</td><td>8</td></tr> <tr><td>(04:00, 04:00]</td><td>0</td></tr> <tr><td>&gt; 04:00</td><td>117</td></tr> </tbody> </table>	Tid mellom kollisjoner	Antall	≤ 00:30	188	(00:30, 01:00]	62	(01:00, 01:30]	31	(01:30, 02:00]	15	(02:00, 02:30]	16	(02:30, 03:00]	11	(03:00, 03:30]	6	(03:30, 04:00]	8	(04:00, 04:00]	0	> 04:00	117	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tid mellom kollisjoner</th> <th>Antall</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>≤ 00:30</td><td>59</td></tr> <tr><td>(00:30, 01:00]</td><td>12</td></tr> <tr><td>(01:00, 01:30]</td><td>6</td></tr> <tr><td>(01:30, 02:00]</td><td>0</td></tr> <tr><td>(02:00, 02:30]</td><td>1</td></tr> <tr><td>(02:30, 03:00]</td><td>2</td></tr> <tr><td>(03:00, 03:30]</td><td>2</td></tr> <tr><td>(03:30, 04:00]</td><td>2</td></tr> <tr><td>(04:00, 04:00]</td><td>0</td></tr> <tr><td>&gt; 04:00</td><td>34</td></tr> </tbody> </table>	Tid mellom kollisjoner	Antall	≤ 00:30	59	(00:30, 01:00]	12	(01:00, 01:30]	6	(01:30, 02:00]	0	(02:00, 02:30]	1	(02:30, 03:00]	2	(03:00, 03:30]	2	(03:30, 04:00]	2	(04:00, 04:00]	0	> 04:00	34
Tid mellom kollisjoner	Antall																																													
≤ 00:30	188																																													
(00:30, 01:00]	62																																													
(01:00, 01:30]	31																																													
(01:30, 02:00]	15																																													
(02:00, 02:30]	16																																													
(02:30, 03:00]	11																																													
(03:00, 03:30]	6																																													
(03:30, 04:00]	8																																													
(04:00, 04:00]	0																																													
> 04:00	117																																													
Tid mellom kollisjoner	Antall																																													
≤ 00:30	59																																													
(00:30, 01:00]	12																																													
(01:00, 01:30]	6																																													
(01:30, 02:00]	0																																													
(02:00, 02:30]	1																																													
(02:30, 03:00]	2																																													
(03:00, 03:30]	2																																													
(03:30, 04:00]	2																																													
(04:00, 04:00]	0																																													
> 04:00	34																																													
Minst 3 CTer samtidig	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tid mellom kollisjoner</th> <th>Antall</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>≤ 00:30</td><td>9</td></tr> <tr><td>(00:30, 01:00]</td><td>3</td></tr> <tr><td>(01:00, 01:30]</td><td>0</td></tr> <tr><td>(01:30, 02:00]</td><td>0</td></tr> <tr><td>(02:00, 02:30]</td><td>1</td></tr> <tr><td>(02:30, 03:00]</td><td>2</td></tr> <tr><td>(03:00, 03:30]</td><td>0</td></tr> <tr><td>(03:30, 04:00]</td><td>0</td></tr> <tr><td>(04:00, 04:00]</td><td>0</td></tr> <tr><td>&gt; 04:00</td><td>17</td></tr> </tbody> </table>	Tid mellom kollisjoner	Antall	≤ 00:30	9	(00:30, 01:00]	3	(01:00, 01:30]	0	(01:30, 02:00]	0	(02:00, 02:30]	1	(02:30, 03:00]	2	(03:00, 03:30]	0	(03:30, 04:00]	0	(04:00, 04:00]	0	> 04:00	17	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tid mellom kollisjoner</th> <th>Antall</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>≤ 00:30</td><td>12</td></tr> <tr><td>(00:30, 01:00]</td><td>0</td></tr> <tr><td>(01:00, 01:30]</td><td>1</td></tr> <tr><td>(01:30, 02:00]</td><td>0</td></tr> <tr><td>(02:00, 02:30]</td><td>0</td></tr> <tr><td>(02:30, 03:00]</td><td>0</td></tr> <tr><td>(03:00, 03:30]</td><td>0</td></tr> <tr><td>(03:30, 04:00]</td><td>0</td></tr> <tr><td>(04:00, 04:00]</td><td>0</td></tr> <tr><td>&gt; 04:00</td><td>2</td></tr> </tbody> </table>	Tid mellom kollisjoner	Antall	≤ 00:30	12	(00:30, 01:00]	0	(01:00, 01:30]	1	(01:30, 02:00]	0	(02:00, 02:30]	0	(02:30, 03:00]	0	(03:00, 03:30]	0	(03:30, 04:00]	0	(04:00, 04:00]	0	> 04:00	2
Tid mellom kollisjoner	Antall																																													
≤ 00:30	9																																													
(00:30, 01:00]	3																																													
(01:00, 01:30]	0																																													
(01:30, 02:00]	0																																													
(02:00, 02:30]	1																																													
(02:30, 03:00]	2																																													
(03:00, 03:30]	0																																													
(03:30, 04:00]	0																																													
(04:00, 04:00]	0																																													
> 04:00	17																																													
Tid mellom kollisjoner	Antall																																													
≤ 00:30	12																																													
(00:30, 01:00]	0																																													
(01:00, 01:30]	1																																													
(01:30, 02:00]	0																																													
(02:00, 02:30]	0																																													
(02:30, 03:00]	0																																													
(03:00, 03:30]	0																																													
(03:30, 04:00]	0																																													
(04:00, 04:00]	0																																													
> 04:00	2																																													

**Tabell 34 Tid mellom kollisjoner**

Som vist i tabell 34 skjer de fleste kollisjoner mellom to CTer kort tid etter hverandre. Dette indikerer at en og samme pasient mottar flere separate eksponeringer for røntgenstråling, noe som også stemmer godt overens med teorien for CT-maskinen. I figur 8 fra kapittel 2.2 ble det gitt et bilde av hvordan røntgenstrålingen kunne synkroniserer opp mot hjerterytmen, slik at bildet av hjerte ble uten bevegelse. Mottar en og samme pasient en rekke av slike bestrålinger, samtidig som en annen CT holder på med en langvarig undersøkelse, vil naturlig nok varigheten mellom kollisjonene ikke bli mer enn et hjerteslag.

For kollisjoner mellom 3 CTer er ikke bildet like klart, av samme årsak som i tabell 33.

### 5.4.5 Strømtrekk ved detekterte kollisjoner

For å kunne illustrere en av svakhetene til valgte metode, hvor bruken av CT-maskinene enten er i tilstandene *skann* eller *stand-by*, er resultatene i tabell 35 medtatt. Siden det er strømmålinger som danner grunnlaget for estimert sviktintensitet og reparasjonsrate for en generell CT, kan også de samme strømmålingene benyttes til å se hvor mange ampere som faktisk gikk ut til CT-maskinene ved en kollisjon.

	Sum av alle strømmålinger ved kollisjon, maksverdi, hverdager	Sum av alle strømmålinger ved kollisjon, maksverdi, kveld, natt og helg																																																																						
Kollisjon: Minst 2 CTer samtidig	<table border="1"> <caption>Data for Weekday Collision (Minst 2 CTer)</caption> <thead> <tr> <th>Strømmåling (A)</th> <th>Antall</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>≤ 75 A</td><td>28</td></tr> <tr><td>(75 A, 100 A]</td><td>219</td></tr> <tr><td>(100 A, 125 A]</td><td>72</td></tr> <tr><td>(125 A, 150 A]</td><td>34</td></tr> <tr><td>(150 A, 175 A]</td><td>32</td></tr> <tr><td>(175 A, 200 A]</td><td>27</td></tr> <tr><td>(200 A, 225 A]</td><td>12</td></tr> <tr><td>(225 A, 250 A]</td><td>13</td></tr> <tr><td>(250 A, 275 A]</td><td>9</td></tr> <tr><td>(275 A, 300 A]</td><td>3</td></tr> <tr><td>(300 A, 325 A]</td><td>1</td></tr> <tr><td>(325 A, 350 A]</td><td>3</td></tr> <tr><td>(350 A, 375 A]</td><td>0</td></tr> <tr><td>(375 A, 400 A]</td><td>1</td></tr> <tr><td>(400 A, 425 A]</td><td>0</td></tr> <tr><td>(425 A, 450 A]</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	Strømmåling (A)	Antall	≤ 75 A	28	(75 A, 100 A]	219	(100 A, 125 A]	72	(125 A, 150 A]	34	(150 A, 175 A]	32	(175 A, 200 A]	27	(200 A, 225 A]	12	(225 A, 250 A]	13	(250 A, 275 A]	9	(275 A, 300 A]	3	(300 A, 325 A]	1	(325 A, 350 A]	3	(350 A, 375 A]	0	(375 A, 400 A]	1	(400 A, 425 A]	0	(425 A, 450 A]	1	<table border="1"> <caption>Data for Weekend Collision (Minst 2 CTer)</caption> <thead> <tr> <th>Strømmåling (A)</th> <th>Antall</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>≤ 75 A</td><td>16</td></tr> <tr><td>(75 A, 100 A]</td><td>38</td></tr> <tr><td>(100 A, 125 A]</td><td>24</td></tr> <tr><td>(125 A, 150 A]</td><td>9</td></tr> <tr><td>(150 A, 175 A]</td><td>10</td></tr> <tr><td>(175 A, 200 A]</td><td>6</td></tr> <tr><td>(200 A, 225 A]</td><td>5</td></tr> <tr><td>(225 A, 250 A]</td><td>3</td></tr> <tr><td>(250 A, 275 A]</td><td>2</td></tr> <tr><td>(275 A, 300 A]</td><td>0</td></tr> <tr><td>(300 A, 325 A]</td><td>1</td></tr> <tr><td>(325 A, 350 A]</td><td>1</td></tr> <tr><td>(350 A, 375 A]</td><td>1</td></tr> <tr><td>(375 A, 400 A]</td><td>1</td></tr> <tr><td>(400 A, 425 A]</td><td>0</td></tr> <tr><td>(425 A, 450 A]</td><td>0</td></tr> <tr><td>(450 A, 475 A]</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	Strømmåling (A)	Antall	≤ 75 A	16	(75 A, 100 A]	38	(100 A, 125 A]	24	(125 A, 150 A]	9	(150 A, 175 A]	10	(175 A, 200 A]	6	(200 A, 225 A]	5	(225 A, 250 A]	3	(250 A, 275 A]	2	(275 A, 300 A]	0	(300 A, 325 A]	1	(325 A, 350 A]	1	(350 A, 375 A]	1	(375 A, 400 A]	1	(400 A, 425 A]	0	(425 A, 450 A]	0	(450 A, 475 A]	1
Strømmåling (A)	Antall																																																																							
≤ 75 A	28																																																																							
(75 A, 100 A]	219																																																																							
(100 A, 125 A]	72																																																																							
(125 A, 150 A]	34																																																																							
(150 A, 175 A]	32																																																																							
(175 A, 200 A]	27																																																																							
(200 A, 225 A]	12																																																																							
(225 A, 250 A]	13																																																																							
(250 A, 275 A]	9																																																																							
(275 A, 300 A]	3																																																																							
(300 A, 325 A]	1																																																																							
(325 A, 350 A]	3																																																																							
(350 A, 375 A]	0																																																																							
(375 A, 400 A]	1																																																																							
(400 A, 425 A]	0																																																																							
(425 A, 450 A]	1																																																																							
Strømmåling (A)	Antall																																																																							
≤ 75 A	16																																																																							
(75 A, 100 A]	38																																																																							
(100 A, 125 A]	24																																																																							
(125 A, 150 A]	9																																																																							
(150 A, 175 A]	10																																																																							
(175 A, 200 A]	6																																																																							
(200 A, 225 A]	5																																																																							
(225 A, 250 A]	3																																																																							
(250 A, 275 A]	2																																																																							
(275 A, 300 A]	0																																																																							
(300 A, 325 A]	1																																																																							
(325 A, 350 A]	1																																																																							
(350 A, 375 A]	1																																																																							
(375 A, 400 A]	1																																																																							
(400 A, 425 A]	0																																																																							
(425 A, 450 A]	0																																																																							
(450 A, 475 A]	1																																																																							
Kollisjon: Minst 3 CTer samtidig	<table border="1"> <caption>Data for Weekday Collision (Minst 3 CTer)</caption> <thead> <tr> <th>Strømmåling (A)</th> <th>Antall</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>≤ 75 A</td><td>17</td></tr> <tr><td>(75 A, 100 A]</td><td>7</td></tr> <tr><td>(100 A, 125 A]</td><td>2</td></tr> <tr><td>(125 A, 150 A]</td><td>4</td></tr> <tr><td>(150 A, 175 A]</td><td>2</td></tr> <tr><td>(175 A, 200 A]</td><td>0</td></tr> <tr><td>(200 A, 225 A]</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	Strømmåling (A)	Antall	≤ 75 A	17	(75 A, 100 A]	7	(100 A, 125 A]	2	(125 A, 150 A]	4	(150 A, 175 A]	2	(175 A, 200 A]	0	(200 A, 225 A]	1	<table border="1"> <caption>Data for Weekend Collision (Minst 3 CTer)</caption> <thead> <tr> <th>Strømmåling (A)</th> <th>Antall</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>≤ 75 A</td><td>3</td></tr> <tr><td>(75 A, 100 A]</td><td>4</td></tr> <tr><td>(100 A, 125 A]</td><td>5</td></tr> <tr><td>(125 A, 150 A]</td><td>2</td></tr> <tr><td>(150 A, 175 A]</td><td>0</td></tr> <tr><td>(175 A, 200 A]</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	Strømmåling (A)	Antall	≤ 75 A	3	(75 A, 100 A]	4	(100 A, 125 A]	5	(125 A, 150 A]	2	(150 A, 175 A]	0	(175 A, 200 A]	1																																								
Strømmåling (A)	Antall																																																																							
≤ 75 A	17																																																																							
(75 A, 100 A]	7																																																																							
(100 A, 125 A]	2																																																																							
(125 A, 150 A]	4																																																																							
(150 A, 175 A]	2																																																																							
(175 A, 200 A]	0																																																																							
(200 A, 225 A]	1																																																																							
Strømmåling (A)	Antall																																																																							
≤ 75 A	3																																																																							
(75 A, 100 A]	4																																																																							
(100 A, 125 A]	5																																																																							
(125 A, 150 A]	2																																																																							
(150 A, 175 A]	0																																																																							
(175 A, 200 A]	1																																																																							

**Tabell 35 Totalt strømtrekk ved kollisjoner**

En CT-maskin vil ofte ha en dimensjonerende ytelse på 100 til 200 kVA, slik tilfelle er på St. Olavs hospital. Hvis disse da kolliderte med full styrke mot hverandre ville det vært rimelig å anta at observert total strømstyrke hadde vært i området 288 til 577 A, om to CTer kolliderer med hverandre. Hvis tre maskiner tar bilde samtidig, ville det vært

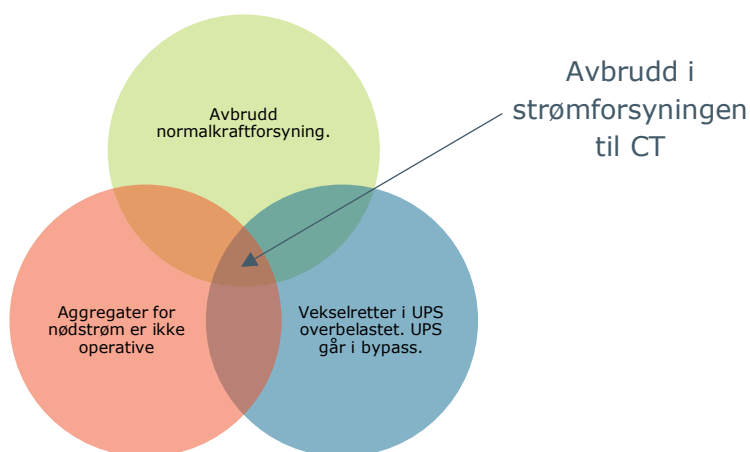
forventet å observere et strømtrekk på mellom 433 til 866 A. Det er ikke dette resultatene i tabell 35 viser.

En utfordring med resultatene for kollisjoner mellom minst to CTer, slik de er presentert i tabell 35, er at de også tar med kollisjoner mellom mer enn to CTer. Derfor finnes også resultatene for kollisjon mellom tre eller flere CTer i den samme grafen. Men det er ikke dette som er det mest interessante med disse grafene. Som histogrammet for kollisjoner mellom minst to CTer viser, vil de aller fleste kollisjonene skje i området 75 til 125 A. Dette betyr at den binære måten som brukes for å beskrive CT-maskinen i denne rapporten, ikke er helt dekkende for de kollisjonene som reelt sett kommer til å oppstå.



## 6 Drøfting

Det fysiske problemet som diskuteres i denne oppgaven er veldig konkret. Forenklet sett må tre forhold inntreffe på samme tid om CT-maskinen skal oppleve et avbrudd i strømforsyningen sin. Disse tre forholdene er illustrert i figur 48.



**Figur 48 Venn diagram for avbrudd strømforsyning CT**

Målet med denne masteroppgaven var å studere om dimensjoneringen av UPS for forsyning av CT kunne gjøres på en mer rasjonell og kostnadseffektiv måte mtp. gjeldende praksis. Med andre ord, hvordan påvirker størrelsen av den blå sirkelen i figur 48 sannsynligheten for et avbrudd i strømforsyningen til CT, og hvor mye sparer prosjektet på å redusere UPSens installerte effekt.

Opgavens problemstilling er:

*Kan investeringskostnadene for avbruddsfri kraftforsyning til CT-maskiner reduseres, uten at strømforsyningens pålitelighet blir merkbart svekket?*

Problemstillingen la en rekke forutsetninger for arbeidet som måtte utføres. I dette arbeidet inngikk forhold som:

- Det var nødvendig å undersøke hvilke investeringskostnader som følger av en UPS, og så avgrense de direkte kostnadene til kun å omfatte utstyr iht. bygningsdelstabellen kapittel 462.
- Sammenhengen mellom UPSens installerte effekt i kVA, og forventet direkte investeringskostnad måtte analyseres basert på COWIs tidligere sykehusprosjekter som ble gjennomført med delt entrepris.
- CT-maskinen som elektrisk last måtte undersøkes, for så å bli redusert til en binær komponent, hvor kun dødtiden mellom *skann* og varigheten til *skann* ble brukt i den videre analysen.
- Det var nødvendig å gjøre egne målinger av tid mellom *skann*, og varigheten av *skann*, ut fra den faktiske strømmen som CT-maskinene trakk. Arbeidet ble utført på St. Olavs hospital sine 5 CT-maskiner. Dette var den mest tidkrevende delen av alt arbeidet som ble utført.

- En representativ modell for forventet strømforsyning ved et norsk sykehus ble konstruert, og tilgjengelige pålitelighetsdata ble brukt for de individuelle komponentene. Bruken av pålitelighetsdata svarer til de brukt i SINTEF sin rapport [34]. Så ble de komponentene som hadde eksepsjonelt høy pålitelighet ekskludert fra modellen, slik at denne kunne løses ved hjelp av klassiske formler for pålitelighetsanalyse.

På tross av at et omfattende arbeid er utført, kan ikke problemstillingen besvares uten først å drøfte hvilken betydning disse resultatene har for strømforsyningen frem til CT. Det er fortsatt gjenstående momenter som må belyses:

- For hvor skal grensen gå for hvilken pålitelighet som er akseptabel?
- Hvem er best egnet til å vurdere om strømforsyninger blir merkbart svekket?
- Har egentlig den direkte investeringskostnaden for selve UPSen noen stor betydning?
- Hvilke konsekvenser har modelleringen og ev. måleavvik for resultatenes gyldighet?

Disse, og flere andre spørsmål vil dette kapittelet ta opp.

## 6.1 Påliteligheten

### 6.1.1 Risikovurdering

En sentral forskrift for prosjekteringen av strømforsyningen frem til CT-maskiner, vil være *Forskrift om Elektriske Lavspenningsanlegg (FEL)*. I forordet til veiledningen for denne forskriften står det følgende [64]:

«Forskriften krever at det ved planlegging av anlegg skal foretas en totalvurdering av alle forhold som vedrører anleggets bruksområde for å sikre at det blir egnet til formålet. Valg av løsning for anlegget skal være basert på vurdering av risiko forbundet med det aktuelle anlegget.»

Spesielt en paragraf i FEL må vies ekstra oppmerksomhet når strømforsyningen til CT prosjekteres. Denne er [64]:

#### § 16. Planlegging og vurdering av risiko

Elektriske anlegg skal planlegges og utføres slik at mennesker, husdyr og eiendom er beskyttet mot fare og skader ved normal bruk og slik at anlegget blir egnet til den forutsatte bruk.

Nå finnes det en rekke ulike definisjoner av risiko. *Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap* (DSB) har brukt denne definisjonen[65]:

Risiko:

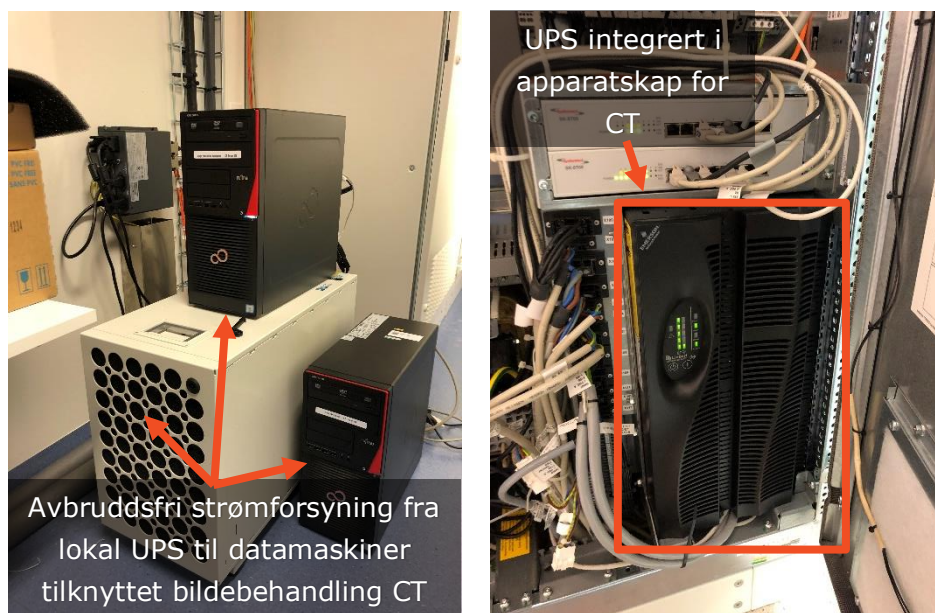
uttrykk for kombinasjonen av sannsynligheten for og konsekvensen av en uønsket hendelse.

I denne rapporten er den uønskede hendelsen primært et avbrudd i strømforsyningen frem til CT-maskinene. Sannsynligheten for at denne hendelsen skal inntreffe er forsøkt kvantifisert i en pålitelighetsanalyse. Konsekvensen av et strømbrudd er derimot ikke like enkle å kvantifisere, men vil kunne bestå av forhold som:

Hendelse:	Konsekvens:
Avbrudd i strømforsyningen mens en pasient blir undersøkt	Avbrutt undersøkelse. Fører sannsynligvis til at skannet ikke ble kjørt ferdig, og undersøkelsen må gjøres på nytt.
	Pasient og radiograf må vente til strømforsyningen kommer tilbake, slik at undersøkelsen kan tas en gang til.
	Fører til forsinkelser for de andre pasientene som skal undersøkes.
	Fører til økt strålingsdose for pasienter som må undersøkes flere ganger.
Avbrudd i strømforsyningen generelt sett	CT-maskinen vil være utilgjengelig så lenge avbruddet varer. I tillegg vil det måtte kjøres en oppstartssekvens før CT-maskinen kan benyttes for å undersøke pasienter igjen. Dette vil øke utilgjengeligheten pr. avbrudd med flere minutter.
	Akutt pasienter blir ikke undersøkt før CT-maskinen har blitt operativ igjen. Dyrebar tid mistes i diagnostiseringen av kritiske pasienter.
	Fører til forsinkelser for de pasientene som er planlagt undersøkt i RIS-systemet. Dette kan medføre overtidsarbeid for radiografene.

**Tabell 36 Mulige konsekvenser av et avbrudd i strømforsyningen til CT**

Her listes ikke tap av bildematerialet fra ferdig utførte skann, eller forstyrrelse av etterbehandlingen av skann (*Recon* i figur 11. kap. 2.3) som mulige konsekvenser. Denne rapporten ser utelukkende på avbruddsfri kraftforsyning til de kraftkrevende hovedkomponentene i en CT, så de datamaskinene som hører til etterbehandlingen holdes utenfor mulige konsekvenser av et avbrudd. Vanlig praksis for disse kan være at de forsynes fra byggets generelle avbruddsfrie kraftforsyning, eller at apparatskapet for CT-maskinen leveres med en egen, liten UPS som kun dekker disse etterbehandlingsenhetene. Ved St. Olavs ble CTene levert med en slik egen UPS som står sammen med apparatskapet for CTen i et lokalt, teknisk rom. Denne løsningen sees i bildene i figur 49, som ble tatt i forbindelse med oppkoblingen av måleinstrumenter.



**Figur 49 Separat UPS for datamaskiner tilhørende CT, St. Olavs hospital**

Som mulige hendelser i tabell 36 viser, er det derfor et begrenset skadepotensiale om, og hvis, det skulle bli et avbrudd i strømforsyningen. Nå stiller FEL følgende krav ved avbrudd [64]:

#### § 31. Avbrudd i strømtilførsel

Anlegg hvor avbrudd i strømtilførselen kan medføre fare for personer, husdyr eller eiendom skal planlegges og utføres slik at vedlikehold, utskiftning m.m. kan skje uten at fare oppstår.

Dersom uventet strømafbrudd vil kunne medføre fare for personer, husdyr eller omgivelser, skal behov for uavhengig strømtilførsel vurderes.

I veiledningen til § 31 spesifiseres det at sykehus er et eksempel på anlegg hvor avbrudd kan medføre fare. Spørsmålet blir da om CT-maskinen har en livsoppretholdende funksjon, eller om denne kun er å anse som et redskap for diagnostisering av pasientene. I normsamlingen NEK 400, beskrives det hvordan sikkerhetskravene i kapittel 5 i FEL, som inkluderer § 31, kan oppfylles [64].

Kapittel 710 i NEK 400 gjelder for medisinske områder. I innledningen til denne kapitlet står det følgende [2]:

«bruk av elektromedisinsk utstyr på pasienter som gjennomgår intensivbehandling krever høy pålitelighet og sikkerhet ved elektriske installasjoner i sykehus. Dette ivaretas ved anvendelse av kravene i NEK 400-7-710. Det kan gjøres avvik fra NEK 400-7-710 såfremt dette medfører tilsvarende eller høyere sikkerhetsnivå enn det som er spesifisert»

For å kunne oppfylle sikkerhetskravene i FEL må anlegget minst ha samme, om ikke bedre, sikkerhetsnivå enn det som NEK 400-7-710 beskriver. For CT-maskinen er det en del definisjoner som vil være gjeldene. Disse er [2]:

- CT-maskinen står i et **medisinsk område**, dvs. et område beregnet til undersøkelse av pasienter (jf. NEK 400-7-710.3.1)
- Den delen av CT-maskinen som kommer i direkte kontakt med pasienten, dvs. bordet hen ligger på, er definert som en **pasientdel** (jf. NEK 400-7-710.3.4)
- En CT-maskin for pasienter vil alltid stå i det normen definerer som **medisinsk område gruppe 1 eller 2**
  - Gruppe 1 gjelder for bl.a. områder hvor det benyttes en pasientdel utvendig (pasient som ligger på bordet) og avbrudd i strømforsyningen ikke medfører fare for pasientens liv og helse (jf. NEK 400-7-710.3.6)
  - Gruppe 2 gjelder for bl.a. områder hvor livsviktig behandling og kirurgiske inngrep utføres, og hvor avbrudd i strømforsyningen kan medføre fare for liv og helse (jf. NEK 400-7-710.3.7)

Selv om CT-maskinen plasseres i et medisinsk område gruppe 2, betyr ikke dette at det er avbrudd i strømforsyningen til CT som representerer fare for liv og helse. NEK 400-7-710.560.6 opererer med to kategorier av strømkilder til forskjellige elektromedisinsk utstyr. Disse klassene er [2]:

- 710.560.6.102 Strømkilder for utstyr som er essensielt for opprettholdelse av liv
  - Krever omkoblingstid på inntil 0,5 sekunder. I praksis må dette utstyret tilkobles en UPS.



- Gjelder for bl.a. elektromedisinsk utstyr hvor avbrudd i strømforsyningen kan medføre fare for liv (for eksempel hjerte- og lungemaskin).
- 710.560.6.103 Strømkilde for annet viktig utstyr [...]
  - Gjelder for annet utstyr enn det som er spesifisert i 710.560.6.102 og som inngår i viktige systemer i medisinske områder gruppe 1 og 2
  - Krever omkoblingstid på inntil 25 sekunder. I praksis svarer dette til aggregatdrift.
  - Vil være gjeldende for bl.a. elektromedisinsk utstyr for bruk i medisinske områder gruppe 2 for kirurgiske eller andre formål av vital betydning. Dette utstyret skal være definert av det medisinske personalet.

Nå er det ingen hendelser i tabell 36 som kan medføre direkte fare for liv og helse på samme måte som et avbrudd i forsyningen til eksempelvis en hjerte- og lungemaskin. Pasienten inne i en CT vil ikke dø eller bli skadet om strømmen forsvinner. Derimot vil et strømbrytning kunne forsinke diagnostiseringen av et medisinsk problem, og dermed være en indirekte fare. Siden avbrudd i strømforsyningen til CT ikke direkte medfører fare for liv, men CTen er av vital betydning for diagnostiseringen av pasientene, blir minstekravet til denne strømforsyningen en omkoblingstid på 25 sekunder, iht. NEK 400:2018 kapittel 710.560.6.103. Skulle det medisintekniske personale være av den oppfatning at hurtigere omkoblingstid eller avbruddsfri kraftforsyning er nødvendig, kan prosjektet tilrettelegge for dette. Både norm og forskrift åpner for at sikkerhetsnivået kan økes om ønskelig. Men CT-maskinen må fortsatt oppfattes som et vitalt elektromedisinsk utstyr, og ikke som elektromedisinsk utstyr for opprettholdelsen av liv. Gitt denne presiseringen vil påliteligheten til strømforsyningen ikke være av den samme avgjørende betydningen som om utstyret var ment for opprettholdelsen av liv.

### 6.1.2 Pålitelighet; egnet for forutsatte bruk

I denne rapporten er det fremsatt en rekke tall for å beskrive hvilken pålitelighet strømforsyningen frem til en gruppe CT-maskiner vil ha. For å gi disse tallene litt kontekst, vil det være fornuftig å sammenligne disse pålitelighetsdataene med data for andre deler av et sykehus.

Det kan argumenteres for at de rommene på et sykehus som bør ha den høyeste påliteligheten, er det som omtales som medisinsk område gruppe 2. Dette er rom som f.eks. operasjonsstuer, og er derfor rom hvor avbrudd i strømtilførselen utvilsomt kan føre til fare for liv og helse. Rapporten *Pålitelighet til nødstrømforsyning* [34] undersøkte en slik strømtilførsel ved et norsk sykehus. Siden både denne rapporten [34] og denne masteroppgaven bruker de samme kildene for pålitelighetsdata, nemlig OREDA [39] og IEEE Std 493 [44], vil det være naturlig å sammenligne resultatene. Her er det viktig å si at mens masteroppgaven har gjort noen forenklinger hva antall komponenter i strømforsyningen gjelder, har [34] tatt med samtlige komponenter fra inntak og frem til stikkontakten på operasjonsstuen. Siden [34] kun har benyttet programmet CARA i sine beregninger, har denne rapporten kunne inkludere langt flere av de komponentene som har ekstremt god pålitelighet uten å få utfordringer med beregningene. Det er derimot ikke dette som er den store forskjellen mellom [34] og denne masteroppgaven. Nå finnes det en god del komponenter i strømforsyningen til gruppe 2 som ved å svikte kan få hele strømforsyningen til å svikte. Dette gjelder bl.a. omkoblingsautomatikken og IT-transformatoren som er plassert i hver fordeling til et slikt gruppe 2 område. Det beste alternativet for strømforsyningen frem til gruppe 2 området ga disse resultatene i [34]:

- MTBF på 249 år
- Årlig utilgjengelighet på 3,77 minutter pr. år (226,2 sekunder pr. år)
- Utilgjengelighet pr. avbrudd på 15,6 timer

Det er en rekke k-av-n konfigurasjoner i denne masteroppgaven som tallmessig vil gi en bedre pålitelighet enn det strømforsyningen frem til gruppe 2 i [34] kan forventes å være. Når det gjelder årlig utilgjengelighet er absolutt alle beregnede verdier i tabell 17 bedre enn tilgjengeligheten til gruppe 2. Dette inkluderer også løsningen hvor det ikke benyttes UPS i det hele tatt. Dette illustrerer svakheten et system får når det er kritiske komponenter i strømforsyningen nærme lasten og som ikke er dubberte. Samtidig har denne masteroppgaven forenklet pålitelighetsnettverket slik at komponenter som svikter meget sjelden, men som det tar flere timer å reparere/ skifte ut, ikke er en del av beregningene. Dette vil kunne gjøre at spesielt utilgjengeligheten for løsningen uten UPS, kan ha blitt litt under det den faktisk ville blitt ellers. Men uansett illustrer forskjellen i utilgjengeligheten mellom [34] og denne masteroppgaven fordelene ved å ha få og pålitelige komponenter i den siste delen frem til lasten, hvor strømforsyningen ikke er dubbert.

I tabell 37 er MTBF for strømforsyningen frem til CT markert grønn om verdien er bedre enn den for gruppe 2 i [34], mens gult markerer at MTBF er lengere enn forventet levetid for bygningskroppen. Forventet levetid for sykehusets bygningskropp er 60 år [47].

n \ k	100% dekning UPS	1	2	3	4	5	Ingen UPS
1	10147,426	0,858					2,537
2		20,072	0,439				
3		598,996	6,847	0,299			
4		6155,189	161,648	3,500	0,230		
5		9537,379	3024,618	66,807	2,146	0,188	

**Tabell 37 Forventet gjennomsnittlig antall år mellom svikt i strømforsyningen til CT opp mot gruppe 2**

Det spesielle med resultatene i tabell 37 er at det ser ut som om en UPS vil gjøre strømforsyningen til CTene mindre pålitelig for noen konfigurasjoner, enn det hadde vært om ingen UPS ble brukt. Det er ikke nødvendigvis tilfelle i praksis. Eksempelvis vil en 5 av 5 konfigurasjon gi en gjennomsnittlig tid mellom svikt på 0,019 år, mens selve strømforsyningen fra hovedfordeling nødkraft vil ha MTBF på ca 2,6 år, hvor hvert avbrudd i snitt forventes å vare 12,53 sekunder. I løpet av disse 12 til 13 sekundene vil vekselretteren kunne bli overbelastet en eller flere ganger, noe som vil trekke ned MTBF for strømforsyningen til CTen betydelig. Flere *skann* vil altså kunne inntreffe ilar disse 12,53 sekundene. Dette vil i sin tur føre til overbelastning av UPSens vekselretter samtidig som det ikke er spenning inn på den statiske switchen. Dette gjør at det som opprinnelig var et avbrudd i strømforsyningen til nettleverandøren, blir til en rekke korte avbrudd ut i strømtilførselen til CT-maskinene, og MTBF trekkes ned. Dette er også poengtert i kapittel 5.1.3.

Hvis CT-maskinen mister strømmen, må denne gjennom en oppstartsprosedyre som tar flere minutter å gjennomføre. Det vil derfor være meget uheldig om MTBF for strømforsyningen skulle bli dårligere med UPS, kontra det å koble CTene direkte til hovedfordeling nødkraft. Nå vil det riktignok i snitt gå 2,6 år mellom hver gang denne problemstillingen kommer opp. Men når det først er et avbrudd hos nettleverandøren, vil

det være tilnærmet umulig for radiografene å vite når de skal begynne å boote opp sin CT igjen. Så lenge ikke nødstrømsaggregatene har startet, kan et *skann* hos en annen CT-lab føre til at samtlige CTer mister spenningen og alle må boote opp på nytt. Selv om det er begrenset hvor mange ganger en slik oppstartsprosedyre kan startes ila. de 12,53 sekundene avbruddet varer, må denne løsningen sies å ikke være *egnet til formålet* (jf. §16 FEL). Et alternativ hvor UPSen kun dekker stand-by-behovet bør ikke anbefales uten videre.

Nå finnes det grunner til å benytte en UPS som bare dekker stand-by behovet, men økt pålitelighet med tanke på avbrudd burde ikke være en av disse. Derimot vil en slik konfigurasjon kunne beskytte CT-maskinene mot en rekke spenningsfenomener som kan oppstå. Eksempelvis vil UPSen kunne beskytte mot underspenninger, overharmoniske spenninger og annen støy. Spesielt om UPSen benyttes i en aktiv eco-modus, hvor effekten i normalsituasjonen går gjennom den statiske switchen, kan lasten beskyttes uavhengig av hvor mange CT-maskiner som skanner samtidig. Dette forutsetter selvfølgelig at den statiske switchen tåler den forventede belastningen. I denne modusen vil UPSens vekselretter fungere mer som et filter, ved å sende ut spenninger i motfase med støyen, slik at denne kanselleres ut. Nå finnes det en rekke dedikerte løsninger på markedet for å håndtere slike fenomener, så om det er denne formen for beskyttelse som ønskes, burde andre og rimeligere alternativer utredes. Denne rapporten vurderer ikke en slik applikasjon av UPSen.

Det vil være en fornuftig antagelse at om strømforsyningen til CT-maskinene har tilsvarende eller lik MTBF som den strømforsyningen til et medisinsk område gruppe 2 har, så vil radiografene i praksis aldri oppleve et avbrudd. Dette gjør at alle cellene i tabell 37 som er markert grønne, vil være helt uproblematisk konfigurasjoner. For  $n$  lik 3 eller 4, har det ingen reell betydning om UPSen bare dekker det dimensjonerende effektbehovet til henholdsvis 2 eller 3 CT-maskiner. Har sykehuset derimot bare en eller to CTer som skal forsynes fra en og samme UPS, bør det vurderes fulldekning av disse.

Siden strømforsyningen frem til CT-maskinen ikke har som oppgave å opprettholde liv og helse, men isteden er elektromedisinsk utstyr av vital betydning for diagnostiseringen av pasientene, burde det tolereres en lavere pålitelighet her enn den til strømforsyningen frem til gruppe 2. Forventet levetid for bygningsmassen er 60 år. Når MTBF er lengere enn forventet levetid for bygningsmassen, betyr dette at CT-maskinene ved sykehuset forventes å oppleve mindre enn et avbrudd i hele byggets levetid. Dette burde være en akseptabel løsning all den tid CT-maskinen ikke har en livsoppretholdene funksjon. Dette gjør at følgende sammenheng kan settes opp basert på resultatene i tabell 37. Et akseptabelt pålitelighetsnivå forventes oppnådd når UPSen er dimensjonert slik at:

$$k \leq n - 2, \quad n \in [1,5], \quad k \in [1,5]$$

Hvor:

- $n$  er antall installerte CT-maskiner forsynt
- $k$  er antall CT-maskiner som ikke kan skanne samtidig (basert på CTens dimensjonerende effekt)

### 6.1.3 Pålitelighet fra pasientens perspektiv

Denne rapporten ser først og fremst på avbrudd i strømforsyningen som den utløsende faktoren for uønskede hendelser, slik definert i tabell 36. Men det er likegyldig for

pasienten om den avbrutte undersøkelsen eller forsinkelsen skyldes et strømbrudd eller svikt i en av CTens egne komponenter.

Eksempelvis vil røntgenrøret (som beskrevet i kapittel 2.1) ved jevne mellomrom måtte byttes. Det er tidligere indikert i en studie at gjennomsnittlig levetid for et slikt rør i en CT vil være 19 til 20 måneder [66]. Hvis dette røret svikter under en undersøkelse, får det de samme konsekvensene for pasienten i denne CTen, som om det var selve strømforsyningen som sviktet. En slik svikt vil derimot skille seg fra konsekvensen av et strømbrudd på to måter:

1. Et skifte av et slikt røntgenrør vil ta betydelig lengere tid enn forventet nedetid for strømforsyningen (for både UPS og nødstrømsaggregater). Det må forventes at det går betydelig lengere tid før aktuelle CT-maskiner vil være operativ, enn om det var strømforsyningen som sviktet.
2. Ved at det sannsynligvis vil det være andre CT-maskiner tilgjengelige ved sykehuset, slik at denne pasienten kan bli undersøkt ved en av disse når de får ledig kapasitet.

Siden svikt i funksjonen til CT-maskinen er noe som vil forekomme, uansett hvor pålitelig strømforsyningen måtte være, er det betimelig å spørre hvor fornuftig det er å bruke fellesskapets ressurser på avbruddsfri strømforsyning til disse. Kan det tenkes at 5 CT-maskiner direkte tilkoblet hovedfordeling nødkraft vil gi et bedre anlegg for pasientene kontra 4 CT-maskiner tilkoblet en UPS? En slik løsning vil kanskje kreve den samme totale ressursbruken, samtidig som det blir økt kapasitet for undersøkelser av pasienter, noe som i sin tur kan redusere helsekøen. Det vil også sørge for en redundans, ved at det er en ekstra CT-maskin tilgjengelig om røntgenrør eller andre komponenter svikter i en av de andre CTene.

## 6.2 Kostnad

Kostnadene til installasjonen av den avbruddsfrie strømforsyningen vil fordele seg på mange ulike komponenter og forskjellige fag. I denne rapporten skilles det mellom de direkte kostnadene til selve UPSen, og de indirekte kostnadene som vil gå til alt annet som trengs for en slik installasjon.

### 6.2.1 Direkte kostnader

I denne rapporten benyttes det kostnadsdata som strekker seg over et helt tiår. Kostnadene tilhørende de postene som går på UPSen ytelse ble summert og indeksjustert iht. *Byggekostnadsindeks for boligblokk*, som er utarbeidet av statistisk sentralbyrå (SSB) [67]. Dette ble gjort slik at alle datapunktene som danner grunnlaget for endelige kostnadsanslag speiler de prisene man kan forvente å oppnå i markedet januar 2022.

SSB utarbeider en rekke forskjellige kostnadsindekser, hvor flere av disse kunne vært aktuelle for bruk her. Dette inkluderer spesifikke indekser for elektromateriell. Skulle en slik indeks vært lagt til grunn, ville prisstigningen for det siste tiåret vært høyere enn det *Byggekostnadsindeks for boligblokk* tilsier. Gjennom diskusjoner med flere av COWIs ble konklusjonen at *Byggekostnadsindeks for boligblokk* er den indeksen som *erfaringsmessig* gir det mest korrekte bilde av forventet kostnad. Men med de raskt økende kostnadene som byggebransjen opplever nå i 2022, må forventet kostnad leses som et estimat med betydelig usikkerhet knyttet til seg.

Med direkte kostnader menes kostnader direkte knyttet til kapittel 462 *Avbruddsfri kraftforsyning* i bygningsdelstabellen [57]. Disse er det i denne rapporten utarbeidet et funksjonsuttrykk for, basert på reelle sykehusprosjekter de 10 siste årene. Her er det viktig å poengtere at akkumulatorbatteriene ikke er medtatt i uttrykket, selv om disse hører til kapittel 462. Det er gode grunner for å holde batteriene utenfor.

En generell UPS som fungerer som nødstrømskilde i et sykehus må kunne oppfylle noen krav, bl.a. skal en slik UPS måtte forsyne *utstyr som er essensielt for opprettholdelse av liv*. Dette gjør at en slik UPS må ha en batterikapasitet på minst 1 time for å oppfylle kravet i NEK 400 7-710.560.102 (forutsatt at denne UPSen i sin tur er forsynt av et nødstrømsaggregat med 3 timer eller 24 timer drift, avhengig av bruken). Siden CT-maskinen ikke er *utstyr som er essensielt for opprettholdelse av liv*, vil det ikke være noen krav til batteritiden (ut over §16 i FEL: *...egnet til den forutsatte bruken*). Sikkerhetsnivået som kreves av strømforsyningen til CT er gitt i NEK 400 7-710.560.103, og betyr i praksis at det er nødstrømsaggregatene i figur 22 som sikrer dette nivået. Oppgaven til UPSen er i dette tilfelle å bygge bro mellom avbruddet i normalkraften og oppstarten av nødkraftaggregatene. For denne jobben kan et betydelig mindre batteri benyttes enn det som kreves for 1 times batteridrift. For kombinasjonen mellom små batterier og UPSer med stor installert effekt mangler det datamaterialet, derfor er batteriene ikke medtatt i denne oppgaven. Det må uansett påregnes betydelige kostnader utover estimatet her, for å dekke innkjøpskostnaden for slike batterier.

Dimensjonerende effekt for en CT-maskin (ekskl. DSCT) kan forventes å være i størrelsesorden 100 til 200 kVA. Disse effektene baseres seg på de gitt i databladene for CT-maskinene ved St. Olavs hospital, og sees i tabell 9. Hvis nå sykehusprosjektet (både prosjekteringsgruppen og de medisinsk sakkyndige) godtar det pålitelighetsnivået som er foreslått i denne oppgaven, kan det forventes besparelser til utstyr tilhørende kapittel 462. Hvis MTBF for strømforsyningen skal være mer enn 60 år, er dette de maksimale besparelsene prosjektet kan forvente:

Antall CTer UPSen dimensjoneres for**:	Antall tilkoblede CTer på UPSen:	Besparelse for CTer med ulik dimensjonerende effekt:		
		100 kVA	150 kVA	200 kVA
1	1	0*	0*	0*
2	2	0*	0*	0*
2	3	96 494 kr	144 741 kr	192 988 kr
2	4	192 988 kr	289 482 kr	385 976 kr
2	5	289 482 kr	434 223 kr	578 964 kr
*Ikke egnet for neddimensjonering av UPS. Gjeldende praksis utfordres ikke.				
** $k \leq n - 2$ , $n \in [1,5]$ , $k \in [1,5]$				

**Tabell 38 Potensielle besparelser ved neddimensjonering av UPS**

Som tabell 38 viser, er det en begrenset økonomisk besparelse ved å neddimensjonere UPSen i forhold til gjeldende praksis med fulldimensjonering. Investeringskonstandene for den avbruddsfrie kraftforsyningen til CT-maskiner kan utvilsomt reduseres ved å neddimensjonere UPSen. Neddimensjoneres UPSen slik skissert over, vil MTBF være lengere enn 60 år. Det betyr at det forventes at det vil være radiografer som i løpet av hele sin yrkesaktive karriere aldri vil oppleve et strømbrudd. Men en besparelse på i beste fall 600 000 kr er ikke all verden for et sykehus som forventes koste 10 eller 12

milliarder kroner. Det er altså ikke her i kapittel 462 i bygningsdelstabellen de store potensielle besparelsene ligger.

### 6.2.2 Indirekte kostnader

Det vil være en rekke kostnader forbundet med en UPS- installasjon som ikke går direkte på kapittel 462 *Avbruddsfri kraftforsyning* i bygningsdelstabellen [57]. For prosjektet vil dette være kostnader i forbindelse med:

- Økt arealbehov, siden UPS og tilhørende fordeling og batterianlegg trenger et dedikert areal. Erfaringer blant elektroingeniørene i COWI, tilsiter at en UPS (ytelse over 100kVA) krever ca. 35 kvadratmeter [68].
- Økt kjølebehov, siden UPSen avgir varme. Tap i UPSen grunnet dens virkningsgrad. I en UPS med ytelse på 400 – 800 kVA vil selv et tap på 2% ved fullast bety at kjøleanlegget må dimensjoneres for 8 til 16 kW ekstra varme. Slike varmeavgivelser i et lite rom på 35 kvadratmeter vil normalt være for krevende å løse med utskifting av luften, slik at egne kjølere med isvann må installeres. Dette er en betydelig ekstrakostnad.
- Økt omfang av øvrig lavspenningstallasjon.

I tillegg vil det påløpe sykehuset ekstra driftskostnader. Vedlikehold av UPSen og utskifting av batteriene vil være betydelige ekstrakostnader som må dekkes av sykehusets driftsbudsjett. I tillegg vil eventuelle tap i UPSen (dårligere systemvirkningsgrad) føre til marginalt høyere strømregning.

For de overnevnte økte kostnadene for prosjektet har det ikke blitt samlet inn data fra COWIs tidligere sykehusprosjekter. Derimot kan norsk prisbok benyttes for å få en viss ide om hvilken størrelsesorden disse indirekte kostnadene representerer. Norsk prisbok inneholder ikke data for sykehus, men har isteden data for den enklere bygningstypen sykehjem. Forventet kvadratmeterkost for et sykehus vil være høyere enn anslaget her. I følge norsk prisbok vil et sykehjem ha en byggekostnad (konto 1 til 8, ekskl. mva) på 33 008 kr pr. kvadratmeter [60]. Hvis dette blir kvadratmeterprisen for arealet en UPS til CTer legger beslag på, blir indirekte kostnad for UPSen på omtrent 1,15 millioner kroner. Sammenlignes dette med forventet investeringskostnad for bare UPSen, som er plottet i figur 33, sees det at prosjektet sannsynligvis vil havne i en situasjon hvor de indirekte kostnadene langt overskrider de direkte kostnadene.

I diskusjoner med senioringeniørene hos COWI har det kommet frem at en kvadratmeterpris på bare 33 008 kr vil være lavt for et sykehus i 2022, og at det *erfaringsmessig* fort kan koste 2 til 3 ganger så mye pr. kvadrat for et sykehus som for et sykehjem. Om så er tilfelle, vil fort arealet en UPS beslaglegger koste opp mot 3,5 millioner kroner. I denne sammenhengen vil en besparelse på noen hundre tusen, som følge av neddimensjonering av UPSen, virke noe smått.

### 6.2.3 Rasjonell bruk av tilgjengelige midler

I veiledningen til NEK 400:2018 7-710.560.103 står det at: «*ved prosjektering av strømforsyningen [til elektromedisinsk utstyr] skal omkoblingstiden vurderes i samarbeid med medisinsk sakkyndig*». Dette er en fornuftig fremgangsmåte all den tid prosjekterende elektroingeniør ikke sitter med inngående kunnskap om bruken av det elektromedisinske utstyret. Samtidig vil det være uheldig om det eneste som vurderes er omkoblingstiden.

Som vist i denne rapporten, vil en UPS medføre at CT-maskinen opplever færre avbrudd, noe som i sin tur reduserer risikoen forbundet med uønskede hendelser som kan oppstå (jf. tabell 36). Dette vil øke påliteligheten og dermed kvaliteten på de tjenestene som sykehusets bildediagnostikk leverer. Men det samme kan sies om andre alternative tiltak som kan gjennomføres. Som tidligere nevnt må det forventes at røntgenrør i CT-maskinene svikter, noe som medfører betydelig nedetid for denne maskinen. For pasientbehandlingen sin del vil det kanskje gi større gevinst om sykehuset disponerte en ekstra CT, kontra at planlagte CT-park ble forsynt med avbruddsfri kraft. Derfor burde det være mulig for medisinsk sakkyndig og øvrig brukermiljø å selv få prioritere hvordan de ønsker å disponere de midlene som er tiltenkt installasjonene for sin radiologiske avdeling.

For at medisinsk sakkyndig skal kunne få gjøre denne vurderingen mellom forskjellige tekniske løsninger, bør midlene som skal gå til ev. avbruddsfri kraft og elektromedisinsk utstyr komme fra det samme budsjettet. På den måten sikres det at det gjøres en reell kost/nytte vurdering av de forskjellige tekniske løsningene opp mot hverandre. Hvis derimot kostnadene for en slik UPS flyttes over på budsjettene for sykehuset elektriske lavspentinstallasjon, vil medisinsk sakkyndig/ brukerne mangle et insentiv for å velge den mest rasjonelle løsningen. Da vil dette kun bli en vurdering av ønsket/nødvendig omkoblingstid, en vurdering denne rapporten ikke går inn på.

Det er verd å merke seg at ved St. Olavs, hvor de praktiske målingene for denne rapporten er gjennomført, har alle sine CT-maskiner direkte tilknyttet til hovedfordeling nødkraft. Så det er ingen automatikk i at CT-maskiner alltid tilkobles en UPS. Her er det risikovurderingene som utføres sammen med medisintekniske sakkyndige i de enkelte prosjektene som avgjør om en UPS bør benyttes.

Hvis de 3 til 4 millionene kronene som en UPS koster (direkte og indirekte kostnader) overføres budsjettet for Medisintekniske utstyr (MTU) står medisinsk sakkyndig/ brukerne fritt til å gjøre sine egne disponeringer. Hvis de både disponerer disse pengene og betaler for det nødvendige arealet kan det forventes en optimalisert pasientbehandling ut fra tilgjengelige midler. Nå må det forventes at en komplett CT-lab vil koste mer enn en slik UPS-installasjon. Kostnaden forbundet med en CT i 2021 var anslått til ca. 8 til 12 millioner kronene ekskl. mva. [69], så valget er ikke så enkelt som mellom en CT-lab eller en UPS. Men dette er et valg som burde bli gitt de som faktisk har forutsetninger for å gjøre en slik vurdering. Det er de medisintekniske sakkyndige brukerne av anlegget som har forutsetningene for å treffe den mest rasjonelle beslutningen.

### 6.3 Bruken av CT-maskiner

Ut fra målingene som ble utført ved St. Olavs hospital er det blitt laget en bruksprofil for en *universell* CT, som representerer alle de bruksmønstrene som forskjellige CTER ved ulike sykehusavdelinger vil ha. Gjennom målingene ved St. Olavs har det vist seg at CT-maskiner som brukes av ulike avdelinger, vil ha en viss variasjon i bruksmønsteret sitt. Allikevel er det en fornuftig løsning å slå sammen alle disse ulike bruksmønstrene til en universell representasjon av en CT. Tanken bak dette er som følger:

Alle sykehus kan forventes å ha et visst geografisk dekningsområde. Innenfor de ulike dekningsområdene kan antall pasienter variere, men den demografiske sammensetningen i disse må kunne forventes å være relativ lik. Fra dette er det fornuftig å forvente at andelen kreftpasienter, hjertepasienter og pasienter med nevrologiske plager vil være relativ lik pr. sykehus. Videre må det kunne forventes at antallet CT-

maskiner ved et sykehus er tilpasset det forventede antall pasienter som de vil motta. Dette gjør at mindre sykehus med bare 2 eller 3 CT-maskiner må påregnes å utføre de samme undersøkelsene som et stort sykehus med 5 maskiner. Og i motsetning til et stort sykehus, kan ikke et lite et sette av en egen CT til et bestemt formål, slik St. Olavs til en viss grad har gjort. Det er heller ikke standard at CT-maskinene skal fordeles på de ulike avdelingene. Eksempelvis vil alle CT-maskinene utenom en (akutt- CTen) ved nye Stavanger Universitetssykehus bli plassert i et og samme bygg, hvorav de fleste blir plassert på en og samme fløy og etasje. Dette gjør at selv om en slik modellering av en *universell* CT ikke er helt beskrivende for de enkelte CTene ved alle sykehus, vil den representere et forventet gjennomsnittlig bruksmønster i en maskinpark av CTER ved et sykehus. Derfor kan de beregnede sviktintensitetene og reparasjonsratene for CTen (som elektrisk belastning) benyttes til dimensjoneringsformål av en eventuell UPS.

Målingene ved St. Olav hospital tåler sammenligning med annen forskning på området. Artikkelen *The Energy Consumption of Radiology: Energy- and Cost-saving Opportunities for CT and MRI Operation* [20] og rapporten *Self-Regulatory Initiative for Medical Imaging Equipment SRI Status Report 2017* [22] så riktignok først og fremst på energibruken til CT, og hvordan denne kunne reduseres. Men siden begge disse har publisert timeantall for de ulike systemtilstandene for CT-maskinene sine, kan disse brukes som sammenligningsgrunnlag. En sammenstilling er satt opp i tabell 39, hvor tilgjengeligheten til CTen (slik definert i tabell 7) er regnet ut for rapportene [20] og [22]. I sammenstillingen er tiden CT-maskinene i artiklene er helt avslått trukket fra.

kilde:	Timer i systemtilstanden <i>skann</i>	Aktive timer utenfor systemtilstanden <i>skann</i>	Antall <i>skann</i>	$A_{AV}$	<i>MTBF</i> [min]	<i>MDT</i> [s]
Artikkel [20], sum alle CTER.	746,23 [ <i>net scan</i> ]	17460,72 [ <i>on – net scan</i> ]	N/A	~0,959014	N/A	N/A
Rapport [22]	1,2	10,8	20	0,9	36	216
Denne rapporten. [Tabell 21 og 22, hverdager kl.7 til 15]	10,19	212,27	4578	~0,954182	5,03	13,83

**Tabell 39 Sammenligning bruken av CT med tidligere forskning**

Som vist i tabellen fungerer modellen til COCIR [22], slik vist i figur 12, dårlig som representasjon for CTens reelle tidsbruk i tilstanden *skann*. Som figur 13 viste, regner [22] med all aktivitet fra pasienten kjøres inn i gantyen, til hen kommer ut, som et *skann*. Hadde [22] derimot benyttet de samme definisjonene for *skann* som de som er brukt i denne masteroppgaven, ville resultatene blitt annerledes. I figur 13 er det to effektkrevende hendelser. Disse er topogrammet og selve spiral skannet. Hadde forfatterne av [22] heller brukt en grenseverdi på effekt eller strøm, er det rimelig å tro at deres resultater for varighet av *skann* hadde vært mer likt de i denne masteroppgaven og de i artikkel [20].



Derimot er beregnet tilgjengelighet for en *universell* CT på hverdager, og beregnet tilgjengelighet basert på dataene fra artikkel [20], ganske like. Siden metodene som er brukt i artikkel [20] og denne masteroppgaven er svært like, er det også positivt at resultatene her kommer såpass tett opptil hverandre. Dette indikerer at selve innsamlingen av datamaterialet i denne masteroppgaven har blitt utført korrekt. Dessverre står det ikke hvor mange *skann* [20] har detektert i sin måleperiode, så det er ikke mulig å gjøre noen sammenligning på varighet av, og tid mellom, *skann*.

Det som skiller fremgangsmåten i denne masteroppgaven fra de to rapportene [20] og [22] er at den teoretiske og *universelle* CT-maskinen aldri slås av. Studeres resultatene fra St. Olavs hospital nøye, vil det vise seg at dette er en sannhet med modifikasjoner. Både akutt CTen og CT 2 i gastrobygget brukes til alle døgnets timer, bortsett fra mellom kl 4 og 5 nattestid. For de øvrige CT maskinene ved St. Olavs ser det derimot ut som om bruken er av en litt mer planlagt karakter. Fra figur 43 og 44 vises det at de tidligst starter opp mellom kl 6 og 7 på morgenen, for så å bli driftet med høy intensitet frem til kl 15. Etter dette klokkeslettet benyttes ikke CT-maskinen i Nevrosenteret i det hele tatt, mens de andre driftes videre med moderat til lav intensitet på antall *skann* frem til ca kl. 21. Etter dette og utover natten er det en mer sporadisk bruk av CTene.

Om dette overtidsarbeidet, som tydeligvis pågår frem til kl 9, er typisk for CT-laboratorier ved sykehus i Norge er noe usikkert. Når disse målingene ble utført hadde sykehusene i Norge, inkl. St. Olavs, ganske så nylig gått vekk fra drift i gul beredskap grunnet koronapandemien [70]. Det kan derfor tenkes at dette kveldsarbeidet som er målt her, skyldes et unormalt etterslep på de planlagte CT- undersøkelsene. Siden det ikke finnes bedre data for CT- bruken før koronapandemien, må disse målingene legges til grunn i beregningene for en *universell* CT.

## 6.4 Kvalitetssikring og kritikk

### 6.4.1 Utforming av pålitelighetsanalysen

I utarbeidelsen av pålitelighetsanalysen ble det truffet en del valg som påvirker resultatene, og derfor bør drøftes.

I pålitelighetsanalysen kan en CT-maskin bare befinne seg i to tilstander; enten står den i stand-by eller så utfører den et *skann* med full effekt. I modelleringen av bruken av CT-maskinene sees det helt bort fra at ulike undersøkelser av forskjellige pasienter og forskjellige kroppsdeler vil trekke forskjellig effekt fra UPSen. Som tidligere arbeider og forskning viser (kap. 2.3), og som også egne målinger i vedlegg 5 viser, er det stor variasjon i strømtrekken til CTene mellom de forskjellige undersøkelsene. Det kan derfor ikke utelukkes at det i realiteten vil inntreffe kollisjoner mellom to eller flere *skann*, hvor den totale effekten er mindre enn den dimensjonerende effekten til en av CT-maskinene. Dette gjør at de beregnede sannsynlighetene for at vekselretteren overbelastes, sannsynligvis er høyere enn de reelt sett er. Dette gjør at sannsynligheten for overbelastning i denne rapporten vil representere en øvre grense for hva som kan forventes.

Det finnes gode grunner for å ikke blande inn den faktiske effekten CT-maskinene trekker, inn i pålitelighetsanalysen. En fordel med valgte metode er at disse beregningene vil være gyldige uavhengig om CT-maskinene primært benyttes til undersøkelser med lite eller stort effektbehov. Forskjellige helseinstitusjoner kan benytte CT-maskinene sine til helt forskjellige typer undersøkelser, men samtlige vil kunne

forholde seg til resultatene her, siden de representerer den laveste forventede påliteligheten med tanke på overbelastning av vekselretteren. Ulempen med denne fremgangsmåten er at det er en risiko for at denne rapporten vil anbefale en mer kostbar løsning, med høyere pålitelighet, enn det som strengt tatt er nødvendig. Men siden valgte problemstilling tar utgangspunkt i gjeldende praksis med full UPS- dekning av CTene, vil en slik metode uansett være god nok for å vise at investeringskostnadene kan reduseres fra dagens nivå.

En annen grunn til å forenkle CT-maskinen til en binær komponent, som enten er i *skann* eller stand-by, er det faktum at røntgenbildene som produseres er et resultat av korrekt spenning (kV), strøm (mA) og eksponeringstid i forhold til pasienten som undersøkes, og for det aller meste ikke avhenger av maskinens dimensjonerende effekt (jf. kap. 2.1). Det aller meste av effekten som maskinen konsumerer går med i prosessen med å generere de rette fotonene i forhold til pasienten. Derfor kan det forventes at når dimensjonerende effekt på CT-maskinene øker, så vil ikke den gjennomsnittlige effekten maskinen trekker ved reelle skann øke i like stor grad. Gjennomsnittlig effekt vil sannsynligvis variere i større grad med forhold som gjenspeiler massen fotonene trenger gjennom. Dette kan være forhold slik som gjennomsnittlig vekt, kjønn og alder på de pasientene som undersøkes. For å kunne fristille modelleringen i denne rapporten fra slike forhold, benyttes en modell hvor *skann* tilsvarer maskinens dimensjonerende effektbehov. Denne fremgangsmåten kan derfor resultere i at påliteligheten til strømforsyningen, spesielt til større CT-maskiner, undervurderes.

Et forhold som derimot gjør at påliteligheten til strømforsyningen overvurderes noe, er det faktum at både Markov-modellen i figur 27 og pålitelighetsnettverket i figur 28 er forenklet ift. strømforsyningen som det er tatt utgangspunkt i (figur 22). Helt sentrale komponenter er tatt ut av modellene slik at de skal være oversiktlige og håndterlige. Også dette grepet kan begrunnes. Samtlige komponenter som er utelatt har en svært lang gjennomsnittlig tid mellom svikt, noe som gjør at de forventes å ha en mikroskopisk innvirkning på sluttresultatet. Felles for alle komponentene som er utelatt er at de har en MTBF på over 600 år. Det er derfor ikke rimelig å anta at disse komponentene vil kunne påvike valget av størrelse på UPS- løsningen.

#### 6.4.2 Selektering av feildata

I arbeidet med denne rapporten ble det samlet inn en rekke feildata fra forskjellige kilder. En rekke av komponentene som inngår i Markov-modellen (figur 27) og pålitelighetsnettverket (figur 28) finnes det flere uavhengige kilder til feildata for, hvor feilratene avviker fra hverandre.

I denne rapporten benyttes som hovedregel de minst gunstige feilratene for komponentene med noen helt bestemte unntak. Siden målet med rapporten er å belyse noen av de teoretisk mindre pålitelige alternativer til dagens fulle UPS- dekning, benyttes minste gunstige verdi, slik at beregningene for tilgjengelighet og frekvens blir på den konservative siden.

For en komponent er det et betydelig forskjell mellom dataene benyttet i rapport [34] og de benyttet her. Denne komponenten er selve batteriet i UPSen. I [34] har batteriet en MTBF på bare 2 år, mens det i denne masteroppgaven benyttes data fra OREDA som tilsvarer en MTBF på 134 år. Etter korrespondanse med involvert personell hos SINTEF har det kommet frem at de har benyttet en seriestruktur bestående av 46 individuelle batterier for å få en MTBF på 2 år. Dette er en metode som ikke benyttes her. Siden

OREDA inneholder feildata for reelle batteribanker, hvor disse har fått tilstrekkelig vedlikehold og ettersyn, kan det argumenteres for at denne kilden gir et mer realistisk bilde av påliteligheten til UPSens batteri. Hverken OREDA [39] eller IEEE Std 493 [45] inneholder data for den statiske switchen. For denne er det brukt verdiene fra SINTEF sin rapport, slik disse er presentert i [34] (Vedlegg 4). Dette er den eneste kilden som er funnet som har data for statisk switch til en UPS.

Kilder, slik som bl.a. OREDA [39] og IEEE Std 493 [45] oppgir ikke bare feil- og reparasjonsrater, men også totalt antall akkumulerte timer/år og antall registrerte feil pr. komponent. Derfor ville det vært enkelt å kombinere flere kilder for en komponent til en felles feilrate som baserer seg på et større datagrunnlag. Rent intuitivt kan det argumenteres for at et større datagrunnlag vil gi et bedre estimat for feilraten. Dette er ikke gjort i denne rapporten av to grunner: (1) Det er usikkert om data omtalt i ulike kilder beskriver identiske driftstilfeller og komponenter. (2) Det er ønskelig at datagrunnlaget for beregningene i denne rapporten skal være gjenkjennbare med andre arbeider innenfor pålitelighet i lavspente sykehusinstallasjoner, slik som [34]. For å få til dette etterbehandles ikke dataene, men benyttes slik de er gitt fra sine respektive kilder.

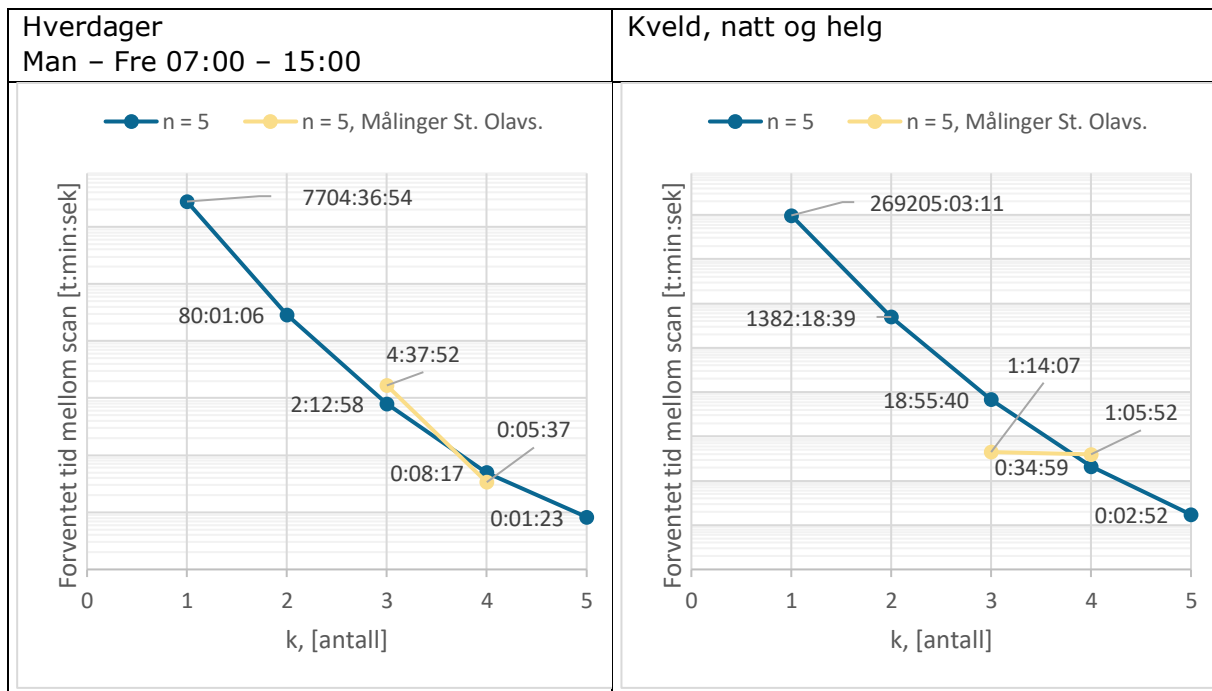
Kundegruppe 31 *Helse og sosialtjenester* ble valgt som datagrunnlag for forventede avbrudd i sykehusets normalkrafttilførsel fra nettleverandøren. Dette er historiske data, og påliteligheten i morgendagens nett trenger ikke å være lik det den til nå har vært. I perioden hvor denne masteroppgaven har elektrisitetsforsyningen i Norge vært under press. Grunnet krigen i Ukraina, og andre forhold i Europa, er det en viss risiko for rasjonering av strøm til enkelte forbrukergrupper. Det er også slik at på nåværende tidspunkt har Statnett reservert nettkapasitet til 1150 MW med nytt forbruk i områdeplanarbeidet for Nord, en økning på hele 80%. Dette område dekker Nordland, Troms og Finnmark. I den forbindelse skrev Statnett [71]: «Vi skal legge til rette for at vanlig forbruk kan knyttes til, og vi skal også håndtere elektrifisering av transportsektoren. Det gjør vi gjennom å drifte strømmettet med lavere sikkerhetsmarginer». Poenget som kan trekkes fra dette er at det ikke finnes noen garanti for at fremtidens nett vil ha den samme påliteligheten som det nåværende nettet har.

#### 6.4.3 Overbelastning av UPSens vekselretter, reell og teoretisk

Den *universelle* CT-maskinen utfører i gjennomsnitt ca. et *skann*, med varighet på 14 sekunder, hvert 6 minutt på hverdager mellom kl. 7 og 15. På kveld og nattetid, og i helgene, vil det i gjennomsnitt utføres ca et *skann* med varighet på 16 sekunder hvert 13 minutt. Men som diskutert tidligere, benyttes ikke alle maskinene ved St. Olavs likt, derfor blir heller ikke den reelle påliteligheten til hver maskin helt identisk. Da vil heller ikke den beregnede tilgjengeligheten for en k-av-n struktur, slik metoden er beskrevet i kapittel 4.3.4, være helt presis. En sammenligning av reelle og teoretiske kollisjoner mellom *skann* vil derfor være nyttig. Det var av akkurat denne grunnen det ble besluttet å analysere innsamlet datamaterialet, med tanke på reelle kollisjoner mellom *skann*.

Ved St. Olavs er det totalt 5 CT-maskiner, altså må det sammenlignes mot beregningene gjort for  $n = 5$ . Er  $k$  lik 4, vil det si at 1 CT kan være i *skann* uten at vekselretteren blir overbelastet. Er  $k$  lik 3, kan to CTer være i tilstanden *skann* samtidig. Dette gjør at  $k$  lik 4 sammenlignes med detekterte kollisjoner mellom minst 2 CTer, mens  $k$  lik 3 må sammenlignes med kollisjon mellom minst 3 CTer. Totalt er det detektert 572 kollisjoner mellom 2 CTer, mens det bare er detektert 48 kollisjoner mellom 3 CTer, hvorav kun 15 var utenom normal arbeidstid. 14 av disse 15 kollisjonene ble detektert på torsdag 16.

juni i tidsrommet 06:50 til 07:00. Kollisjoner mellom 4 eller flere CT-maskiner ble ikke observert i måleperioden.



**Tabell 40 Gjennomsnittlig tid mellom skann, reel og teoretisk overbelastning vekselretter.**

Som tabell 40 viser, er ikke modellen helt samstemt med reelle målinger for kollisjoner ved St. Olavs hospital. Hverdager mellom 7 og 15 er det forventet av tid mellom kollisjoner for 2 eller flere CT-maskiner i *skann*, vil være 8 minutter og 17 sekunder. Det som derimot er observert ved St. Olav er en gjennomsnittlig tid på 5 minutter og 37 sekunder. For kollisjoner mellom 3 eller flere CT-maskiner forventes det at gjennomsnittlig tid blir 2 timer og 13 minutter, mens reelle målinger viser at gjennomsnittet tid er over dobbelt så lang. Når datasettet inneholder relativt mange registrerte kollisjoner mellom 2 eller flere CT-maskiner, kan ikke dette avviket bare avfeies. Det er mulig at modellen underestimerer intensiteten til kollisjonen mellom 2 eller flere CT-maskiner, for hverdager mellom 7 og 15. Utenfor normal arbeidstid ser det derimot ut til at modellen forventer mange flere kollisjoner enn det som er registrert for 2 eller flere CTer. Samtidig er resultatet for kollisjoner mellom 3 eller flere CT-maskiner utenfor normal arbeidstid, langt under den tiden som forventes. En modell hvor hver av de  $n$  CTene er identiske og binomisk fordelt, beskriver altså ikke helt nøyaktig sannsynligheten for overbelastning i en  $k$  av  $n$  konfigurasjon, om det var ved St. Olavs en UPS skulle installeres.

En mulig forklaring på disse avvikene er at alle CT-maskinene gjennomgår en kalibreringsprosedyre hver morgen. Denne prosessen ble demonstrert av det medisintekniske personalet ved St. Olavs hospital, i anledning oppkoblingen av måleapparatene for denne masteroppgaven. En slik kalibreringsprosess består av en hurtig serie av korte skann, med ulik spenning inn på røntgenrøret. Så vil maskinen registrere mottatt stråling ved detektoren, og kompensere for evt. avvik mot referansenivået for strålingen som ønskes. Hvis denne kalibreringen gjøres på omtrent samme tid for alle maskinene, eksempelvis på morgenen rundt kl 7, risikeres det at det kommer en rekke kollisjoner innenfor det samme, korte tidsvinduet. Ved å studere samtlige plottede målinger i vedlegg 5, kan det se ut til at det er en slik aktivitet på

morgenen for samtlige maskiner. Og som også bemerket i kommentaren til tabell 15 tidligere, inntraff 14 av 15 registrerte *skann* mellom 3 eller flere CTer på torsdagen mellom kl 6:50 og 7:00. Derfor er det grunn til å tro at en slik fellehendelse for CT-maskinene farger målte kollisjoner fra St. Olavs noe. En modell hvor hver av de  $n$  CTene er identiske og binomisk fordelt, beskriver altså ikke helt nøyaktig sannsynligheten for overbelastning i en  $k$ -av- $n$  konfigurasjon, om det var ved St. Olavs en UPS skulle installeres.

Nå er det ingen pasient inne i CT-maskinen når disse kalibreres. Det betyr at det er redusert konsekvens ved et spenningsbortfall under denne prosessen. Hvis det er denne kalibreringsprosessen som gjør at modellen ikke stemmer helt med de faktisk målte kollisjonene ved St. Olavs, så er det et avvik med noe begrenset betydning for pasientbehandlingen.

Gitt resultatene for målte kollisjoner ved St. Olavs hospital bør påliteligheten til de konfigurasjonene hvor UPSen ikke tåler at 2 CT-maskiner skanner samtidig, leses med forsiktighet. Nå vil gjennomsnittet av hverdager 7 til 15 og kveld, natt og helg jevne seg noe ut. Siden modellen underestimerer kollisjoner mellom 2 maskiner for hverdager 7 til 15, og overestimerer kollisjoner for kveld, natt og helg, vil gjennomsnittet bli noe mer nyansert. Det spørres om ikke modellen hadde stemt bedre med virkeligheten om personalet ved St. Olavs utførte kalibreringen sin før kl 7, og ikke etter. For kollisjoner mellom 3 eller flere maskiner er det derimot for få datapunkter til å trekke noen slutninger.

Siden størrelsesordenen på varigheten mellom kollisjonene er lik den som modellen predikterer, festes det lit til at en slik fremgangsmåte som valgt her i oppgave er god nok til å kunne undersøke om UPSen kan nedskaleres. Men det vil kanskje være mulig å nedskalere UPSen mer enn det en slik modell vil tilsi. UPSens vekselretter tar skade om kraftelektronikken i den må lede mer strøm enn det IGBTene er dimensjonert for over tid. En for stor strøm vil, over tid, føre til overoppheting av kraftelektronikken i bl.a. vekselretteren. Dette faktum betyr at en vekselretter i en UPS, for en kortere periode, kan levere mer strøm/ effekt til lasten enn det den er dimensjonert for. I en tidligere masteroppgave ved NTNU ble dette delvis undersøkt [72]. Masterstudenten her hadde korrespondanse med ulike leverandører av UPS. Her fremkom det at flere av deres UPSen vil tåle en overbelastning på 150% i en periode på 60 sekunder. Sammenlignes dette med gjennomsnittlig varighet på et *skann*, som er på mellom 14 og 16 sekunder (tabell 21) sees det at UPSen får en sikkerhetsmargin å jobbe med før den må gå i bypass. Og som vist i histogrammene i figur 38 vil nesten alle *skann* ha en varighet på mindre enn 60 sekunder. Dette gjør at det i en reell UPS-installasjon som forsyner CT kan forventes at UPSen sjeldnere må gå i bypass som følge av overbelastning enn det som er beskrevet i denne rapporten.

En interessant observasjon som dukket opp i gjennomføringen av denne masteroppgaven var den faktiske utnyttelsen av de to røntgenrørene i CT 2. Dette er en DSCT fra Siemens, og som har en dimensjonerende effekt på hele 283 kVA ( $t < 2$  sekunder). Det spørres hvor rasjonelt det er å dimensjonere UPSen for å takle både rør A og B når rør B kanskje bare benyttes sammen med rør A hvert 10 eller 11 *skann* denne maskinen tar. Det er dette som er indikert i resultatene fra CT 2 som sees i kapittel 5.4.3. Nå er dette målinger på en spesifikk maskin, så andre DSCTer kan ha en annen utnyttelse. Men disse målingene åpner for muligheten til å dimensjonere UPSen ut fra bare dimensjonerende effekt for rør A. Konsekvensen av dette valget blir sannsynligvis en liten, men marginal,

økning i hvor ofte UPSen må over i bypass. Dette blir enda mer aktuelt om det er en DSCT sammen med mange vanlige CT-maskiner, tilkoblet en og samme UPS.

I denne rapporten er det satt som en forutsetning at den statiske switchen ikke blir overbelastet. I de tilfellene hvor den statiske switchen er en integrert del av UPSen, må det forventes at produsenten av UPSen har avstemt forholdet mellom vekselretter og statisk switch, slik at begge disse er dimensjonert mtp. UPSens ytelse. Nå vil den statiske switchen ha et litt bredere arbeidsområde enn vekselretteren. Ved en ev. nedstrøms kortslutning er det denne komponenten som primært<sup>2</sup> fører kostslutningsstrømmen frem til et vern kobler feilen ut. Derfor er det grunn til å forvente at denne komponenten kan føre en større strøm enn UPSens vekselretter, i alle fall for en kortere periode. Benyttes derimot en sentralisert statisk switch, kan denne spesifiseres og dimensjoneres slik at den tåler alle strømmer som normalt vil kunne oppstå. Spesielt en løsning med en kontaktor i parallell med den statiske switchen kan være interessant i så måte. Uansett må det sikres at den statiske switchen ikke blir overbelastet for at resultatene i denne rapporten skal være gyldig.

#### 6.4.4 Avsluttende bemerkninger kvalitetssikring

Metodene som er benyttet her er ikke egnet for å beskrive nøyaktig hvilken sannsynlighet det er for at UPSens vekselretter blir overbelastet. Men dette var heller aldri målet. Spørsmålet var om dagens løsning med fulldimensjonering av UPSen, ut fra dimensjonerende effekt for samtlige tilkoblede CTer, kunne utfordres. Til denne jobben er valgte metode og fremgangsmåte tilstrekkelig.

Gjennom kvalitetssikringen er det vist at bl.a.:

- Forventet strømtrekk ved kollisjoner er mindre enn det som legges til grunn i modellen.
- UPSens vekselretter tåler en viss overbelastning, og vil derfor ikke behøve å gå i bypass like ofte.

De usikkerhetene som finnes i modell og metode taler til fordel for påliteligheten til strømforsyningen. Sannsynligvis vil påliteligheten være bedre enn det som er beskrevet i denne rapporten, men den vil ikke kunne være vesentlig dårligere. Resultatene her representerer derfor et nedre gulv for hvor upålitelig strømforsyningen blir ved å neddimensjonere UPSen.

---

<sup>2</sup> For nødstrømskilder gjelder krav om at avbruddsfri strømforsyning skal kunne koble ut vern i hovedkurser når vekselretteren er forsynt fra batteriene, jf. NEK 400:2018 5-560.6.12

## 7 Konklusjon

*UPSens installerte effekt, og dermed investeringskostnadene direkte knyttet til denne, kan reduseres uten at det får noen praktisk betydning for påliteligheten til CT-maskinenes strømforsyning.*

Ut fra resultatene, analysen og diskusjonen som er utført i denne rapporten kan følgende slutninger trekkes:

### **Pålitelighet strømforsyning frem til CT**

- UPSens installerte effekt kan reduseres slik at MTBF for strømforsyningen forventes å være lengere enn byggets levetid. Dette gjelder bare om visse betingelser er oppfylt:
  - Antall tilkoblede CT-maskiner må være 3 eller flere.
  - Hvis 3 til 5 CT-maskiner er tilkoblet en UPS, kan denne dimensjoneres for å dekke det dimensjonerende effektbehovet for 2 av disse.
  - Beregningene er bare gyldige om alle CT-maskinene har det samme dimensjonerende effektbehovet.

### **Kostnader anskaffelse UPS**

- Godtar medisinteknisk sakkyndig og prosjektet en MTBF for strømforsyningen på 60 år eller mer, kan investeringskostnadene for UPSen reduseres med mellom 97 000 kr til 580 000 kr. Dette gjelder for 3 eller flere CTer, med en dimensjonerende effekt på mellom 100 kVA og 200 kVA.
- Indirekte kostnader, som ikke vil bli direkte påvirket av UPSens installerte effekt, vil sannsynligvis være mye høyere enn investeringskostnadene for selve UPSen.
- Totalt sett er det en begrenset økonomisk oppside ved å neddimensjonere UPSen.

### **Buken av CT-maskinen**

- Kan modelleres ved hjelp av klassisk pålitelighetsanalyse, og som en binær komponent som kan befinne seg i to tilstander; *skann* eller *stand-by*.
- Resultatene fra slik modellering vil med stor sannsynlighet representere et nedre gulv for hvor upålitelig strømforsyningen fra en UPS vil være.

### **Anbefalinger til fremtidige sykehusprosjekter**

- Det er viktig at nødvendig pålitelighet for strømforsyningen til CT-maskinen diskuteres med medisinteknisk sakkyndig.
- Flere parameter enn bare omkoblingstiden til strømforsyningen for CT bør diskuteres, med fokus på kvaliteten til pasientbehandlingen.
- Ev. avbruddsfri kraftforsyning til CT-maskiner bør ikke tas av budsjettet til den generelle elektroinstallasjonen, men isteden være en del av MTU-budsjettet.





## 8 Avslutning

### 8.1 Praktiske erfaringer

Det praktiske arbeidet som ble utført i forbindelse med denne rapporten la beslag på en uforholdsmessig stor del av den disponible tiden. Siden det ikke var mulig å oppdrive gode data for lengden mellom og varigheten av *skann* som CT-maskinen utfører, måtte den tunge jobben med datainnsamling gjennomføres. Lenge ble det vurdert å benytte en kombinasjon av resultatene til rapportene [20] og [22] for å kunne modellere overbelastning av UPSens vekselretter. Men siden disse rapportene ikke har tatt høyde for at en CT-undersøkelse fort kan bestå av en rekke *skann* på en og samme pasient, slik illustrert med billedtakingen av hjertet i figur 8, ble det til slutt besluttet å gjennomføre målinger på reell bruk ved St. Olavs. Denne beslutningen burde vært tatt tidligere i prosessen, slik at enda mer tid var tilgjengelig for etterbehandling av data og utarbeidelsen av selve rapporten.

Selve etterbehandlingen av måledataene fra St. Olavs ble utført i Excel. Selv på en PC med 64 Gb minne ble etterbehandlingen av over 2,5 millioner måleverdier svært krevende. Det kan godt tenkes at andre og mer egnede programmer burde vært benyttet, men det ble her prioritert å benytte disponibel tid til det faktiske arbeidet med rapporten. Derfor ble det ikke investert tid og energi i å lære seg nye verktøy. Dette var en vurdering som kanskje ikke var den rette.

### 8.2 Veien videre

Denne rapporten har demonstrert en metode for å vurdere om UPSer som forsyner CT-maskiner kan neddimensjoneres fra fulldekning av lastene. Men samme fremgangsmåte vil kunne være gyldig for andre modaliteter ved et sykehus. Samme tilnærming kan benyttes for alt utstyr som veksler mellom to distinkte effektnivåer. Det bør undersøkes om UPS for intervensjonsstuer, angiografi, PET-CT, MR og annet utstyr også kan neddimensjoneres. Til forarbeidet for slike undersøkelser kan denne rapporten [73] fra SINTEF, som inneholder plott for energibruken til disse maskinene anbefales.

Det finnes andre gode grunner enn beskyttelse mot avbrudd for å ville benytte en UPS foran CTene. En dobbelkonverterende UPS beskytter bl.a. mot over- og underspenningen, overharmoniske spenninger og variasjoner i frekvensen for å nevne noe. Dette er trusler som ikke er modellert eller hensyntatt i modellene i denne rapporten. Arbeidet med å logge spenningskvaliteten inn på CTene ved St. Olavs hospital ble påbegynt sammen med de øvrige målinger i denne rapporten. Men for å holde omfanget av denne masteroppgaven på et håndterlig nivå, ble aldri disse dataene bearbeidet. En spennende vinkling for fremtidige prosjekter vil kanskje være å undersøke hvilken risiko (sannsynlighet og konsekvens) det er ved å tilkoble følsomt elektromedisinsk utstyr direkte til hovedfordeling normal- eller nødkraft ved norske sykehus. Er spenningskvaliteten så dårlig at det forsvarer bruken av en UPS eller andre tiltak?

Det er mulig at mange av de vurderingene som er diskutert i denne rapporten vil være foreldet om noen år. Andre konsepter for avbruddsfri kraftforsyning kan bli aktuelle for

fremtidige sykehus, og det er ikke sikkert at tradisjonelle statiske UPSer, som omhandlet i denne rapporten, vil være bransjestandarden fremover.

En mulig fremtidig løsning kan være å kutte ut skillet mellom normal-, nød- og avbruddsfri kraft ved norske sykehus. Tre separate kraftsystemer er krevende å drifte og krever betydelig større omfang av den lavspente forsyningen. Hva om det isteden bare ble distribuert en krafttype på hele sykehuset, nemlig avbruddsfri kraft?

Et slikt konsept, hvor tilnærmet hele sykehuset kan forsynes av avbruddsfri kraft, et til vurdering for Nye Rikshospitalet som skal stå ferdig i 2030. Et slikt konsept er aldri før blitt brukt i norske sykehus, men *Karolinska Universitetssjukhuset* i Stockholm har prøvd en slik løsning [25]. Hjertet i dette konseptet er en Diesel Roterende UPS (DRUPS), en UPS som kan erstatte funksjonen til en statisk UPS og nødstrømsaggregatene. Avbruddsfri strømforsyning sikres av mekanisk svinghjulenergi som driver generatoren inntil dieselmotorene starter [25]. Hvis disse DRUPSene dimensjoneres for å dekke effektbehovet til tilnærmet hele sykehuset, eliminerer dette behovet for egne statiske UPSer for CTer og annet elektromedisinsk utstyr. Dette er et spennende konsept som kan endre fremtidig prosjektering av strømforsyningen i sykehus. Kanskje dette er et konsept som er spennende for andre elkraftstudenter å undersøke?

## Referanser

- [1] J. Seehusen, «Bygger sykehus over hele Norge for mer enn 80 milliarder kroner», *Tu.no*, 18. februar 2021. <https://www.tu.no/artikler/bygger-sykehus-over-hele-norge/507002> (åpnet 19. august 2022).
- [2] NEK/NK64, *NEK 400:2018 Elektriske lavspenningsinstallasjoner*, 2. utg. 2018.
- [3] V. Solberg, «Statisk UPS i strømtilførselen til CT- Vurderinger av ulike UPS-topologier inn i en sykehusinstallasjon». 21. desember 2021.
- [4] M. Brekke, A. Kolbenstvedt, og A. Borthne, «CT», *Store medisinske leksikon*. 17. januar 2018. Åpnet: 28. september 2021. [Online]. Tilgjengelig på: <http://sml.snl.no/CT>
- [5] T. Holtebekk og J. Linder, «røntgenstråler», *Store norske leksikon*. 4. juni 2019. Åpnet: 26. september 2021. [Online]. Tilgjengelig på: <http://snl.no/r%C3%B8ntgenstr%C3%A5ler>
- [6] Direktoratet for strålevern og atomtryggleik, «Røntgenundersøkelser», *DSA*. <https://dsa.no/medisinsk-stralebruk/rontgenundersokelser> (åpnet 26. september 2021).
- [7] K. Thayalan, «Chapter-04 Generation and Control of X-rays». <https://d45jl3w9libvn.cloudfront.net/jaypee/static/books/9789351521716/Chapters/images/95-1.jpg> (åpnet 21. desember 2021).
- [8] R. B. Engelstad, *Stråleterapi: lærebok i røntgen- og radiumbehandling*. Oslo: Grundt Tanum, 1946. Åpnet: 26. september 2021. [Online]. Tilgjengelig på: [https://urn.nb.no/URN:NBN:no-nb\\_digibok\\_2011062706194](https://urn.nb.no/URN:NBN:no-nb_digibok_2011062706194)
- [9] M. Brekke, «røntgenrør», *Store medisinske leksikon*. 19. mars 2020. Åpnet: 26. september 2021. [Online]. Tilgjengelig på: <http://sml.snl.no/r%C3%B8ntgenr%C3%B8r>
- [10] Clover Learning, *Understanding kVp & mAs (X-Ray Exposure Factors)*, (2019). Åpnet: 27. september 2021. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.youtube.com/watch?v=C6SXd31LmDo>
- [11] L. Bateman og J. Sil, «Optimal Utilization of Imaging Parameters in CT Scanning: Uses of CT in Radionuclide Imaging – Different Manufacturer Approaches», i *Practical SPECT/CT in Nuclear Medicine*, D. W. Jones, P. Hogg, og E. Seeram, Red. London: Springer London, 2013, s. 239–267. doi: 10.1007/978-1-4471-4703-9\_10.
- [12] J. Seibert, «X-ray imaging physics for nuclear medicine technologists. Part 1: Basic principles of x-ray production», *J. Nucl. Med. Technol.*, bd. 32, s. 139–47, okt. 2004.
- [13] V. I. Mikla og V. V. Mikla, «2 - Computed Tomography», i *Medical Imaging Technology*, V. I. Mikla og V. V. Mikla, Red. Oxford: Elsevier, 2014, s. 23–38. doi: 10.1016/B978-0-12-417021-6.00002-2.
- [14] J. Sil og E. Seeram, «Practical Radiation Dose and Practical Radiation Protection Considerations», i *Practical SPECT/CT in Nuclear Medicine*, D. W. Jones, P. Hogg, og E. Seeram, Red. London: Springer London, 2013, s. 229–238. doi: 10.1007/978-1-4471-4703-9\_9.
- [15] M. Brekke og A. Borthne, «gantry», *Store medisinske leksikon*. 16. mars 2021. Åpnet: 14. november 2021. [Online]. Tilgjengelig på: <http://sml.snl.no/gantry>
- [16] Norsk Helsenett, «CT-undersøkelse», *CT-undersøkelse*, 5. mars 2019. <https://www.helsenorge.no/undersokelse-og-behandling/ct-undersokelse/> (åpnet 14. november 2021).
- [17] L. W. Goldman, «Principles of CT and CT Technology», *J. Nucl. Med. Technol.*, bd. 35, nr. 3, s. 115–128, sep. 2007, doi: 10.2967/jnmt.107.042978.
- [18] Jerrold T. Bushberg, J. Anthony Seibert, Edwin M. Leidholdt, og John M. Boone, *The Essential Physics of Medical Imaging*, bd. 3rd edition. Philadelphia: LWW, 2012. [Online]. Tilgjengelig på:

- <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=2017793&site=ehost-live>
- [19] «Back to the Future: 10 Years of Dual Source CT». <https://www.siemens-healthineers.com/no/computed-tomography/news/mso-back-to-the-future.html> (åpnet 4. august 2022).
- [20] T. Heye *mfl.*, «The Energy Consumption of Radiology: Energy- and Cost-saving Opportunities for CT and MRI Operation», *Radiology*, bd. 295, nr. 3, s. 593–605, jun. 2020, doi: 10.1148/radiol.2020192084.
- [21] «What is Radiology Information System (RIS)? - Definition from WhatIs.com», *SearchHealthIT*. <https://www.techtarget.com/searchhealthit/definition/Radiology-Information-System-RIS> (åpnet 27. august 2022).
- [22] «COCIR\_SRI\_Status\_Report\_-\_July\_2017\_-\_Final\_.pdf». Åpnet: 14. mars 2022. [Online]. Tilgjengelig på: [https://www.cocir.org/fileadmin/6\\_Initiatives\\_SRI/SRI\\_Status\\_Report/COCIR\\_SRI\\_Status\\_Report\\_-\\_July\\_2017\\_-\\_Final\\_.pdf](https://www.cocir.org/fileadmin/6_Initiatives_SRI/SRI_Status_Report/COCIR_SRI_Status_Report_-_July_2017_-_Final_.pdf)
- [23] K. Green og J. Mike, *The UPS handbook - The definitive guide to specifying and implementing secure power systems*, 4. utg. Uninterruptible Power Supplies Limited, 2013.
- [24] J. M. Guerrero, L. Garcia De Vicuna, og J. Uceda, «Uninterruptible power supply systems provide protection», *IEEE Ind. Electron. Mag.*, bd. 1, nr. 1, s. 28–38, 2007, doi: 10.1109/MIE.2007.357184.
- [25] PG Nye Rikshospitalet, «Nye Rikshospitalet: Roterende UPS - Utredning». Helse SØR-ØST, 16. april 2021.
- [26] IEC, «NEK IEC 62040-3:2021 Uninterruptible power systems (UPS) - Part 3: Method of specifying the performance and test requirements». 21. april 2021. Åpnet: 20. november 2021. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1352400>
- [27] M. Ton og B. Fortenbury, «High Performance Buildings: Data Centers Uninterruptible Power Supplies (UPS)», *Uninterruptible Power Supplies*.
- [28] B. Wei, A. Marzàbal, J. Perez, R. Pinyol, J. M. Guerrero, og J. C. Vásquez, «Overload and Short-Circuit Protection Strategy for Voltage Source Inverter-Based UPS», *IEEE Trans. Power Electron.*, bd. 34, nr. 11, s. 11371–11382, 2019, doi: 10.1109/TPEL.2019.2898165.
- [29] T. Wildi, *Electrical machines, drives and power systems*, 6., ed. Pearson New International Edition. Harlow: Pearson Education Limited, 2014.
- [30] J. Spitaels, L. Zhang, og P. Lin, «The different types of UPS systems». Schneider Electric. Åpnet: 20. november 2021. [Online]. Tilgjengelig på: [https://www.se.com/no/no/download/document/SPD\\_SADE-5TNM3Y\\_EN/](https://www.se.com/no/no/download/document/SPD_SADE-5TNM3Y_EN/)
- [31] «What Are The Differences Between Transformer-Based And Transformerless UPS?» <https://www.constantpowerservices.com/questions/8-what-are-the-differences-between-transformer-based-and-transformerless-ups> (åpnet 13. august 2022).
- [32] M. K. Rahmat, S. Jovanovic, og K. L. Lo, «Reliability and Availability modelling of Uninterruptible Power Supply (UPS) systems using Monte-Carlo simulation», i *2011 5th International Power Engineering and Optimization Conference*, jun. 2011, s. 267–272. doi: 10.1109/PEOCO.2011.5970403.
- [33] Mohd. K. Rahmat, A. Z. A. Karim, og Mohd. N. Mohd. Salleh, «Sensitivity analysis of the AC uninterruptible power supply (UPS) reliability», i *2017 International Conference on Engineering Technology and Technopreneurship (ICE2T)*, sep. 2017, s. 1–6. doi: 10.1109/ICE2T.2017.8215976.
- [34] J. Foros, «Pålitelighet til nødstrømforsyning», SINTEF Energi AS, Trondheim, TR F7471, mai 2015.
- [35] M. Rausand og A. Høyland, *System reliability theory: models, statistical methods, and applications*, 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2004.
- [36] T. Aven, «pålitelighet», *Store norske leksikon*. 16. mars 2016. Åpnet: 1. mars 2022. [Online]. Tilgjengelig på: <http://snl.no/p%C3%A5litelighet>

- [37] A. T. Holen, M. Rausand, og A. Høyland, *Pålitelighetsanalyse*, 2. utg., 2. oppl. Trondheim: Tapir, 1993.
- [38] J. Vatn, «TPK4120- Lecture summary; Chapter 5- Component Importance». 20. august 2019.
- [39] Oreda, Selskapet for Industriell og Teknisk Forskning, og Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Red., *Offshore and onshore reliability data handbook. Volume 1: Topside equipment*, 6th edition. Norway: OREDA Participants, 2015.
- [40] A. T. Holen, «Nødstrøm - 100% pålitelig i nøden?», presentert på Nødstrømforsyning/ Reservekraft, okt. 2022.
- [41] J. Vatn, «TPK4120- Lecture summary; Chapter 8- Markov processes».
- [42] E. Gaustad og R. A. Borgersen, «Nødkraftanlegg». COWI, 18. august 2016.
- [43] «OREDA». <https://www.oreda.com/> (åpnet 8. mars 2022).
- [44] IEEE Industry Applications Society, Power Systems Reliability Subcommittee, Institute of Electrical and Electronics Engineers, og IEEE-SA Standards Board, *IEEE recommended practice for the design of reliable industrial and commercial power systems*. New York, N.Y.: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007. Åpnet: 8. mars 2022. [Online]. Tilgjengelig på: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=4264698>
- [45] «IEEE SA - IEEE 493-2007», *SA Main Site*. <https://standards.ieee.org/ieee/493/3402/> (åpnet 8. mars 2022).
- [46] «Avbruddsstatistikk - NVE». <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten/publikasjoner-og-data/statistikk/avbruddsstatistikk/> (åpnet 7. mars 2022).
- [47] S. Bjørberg, A. Larsen, og H. Øiseth, «Livssyklus kostnader for bygninger», s. 41.
- [48] «Automatic transfer switches (ATS) fundamentals», *Eaton*. <https://www.eaton.com/us/en-us/products/low-voltage-power-distribution-control-systems/automatic-transfer-switches/automatic-transfer-switch-fundamentals.html> (åpnet 20. august 2022).
- [49] «What Is the Best Start-time Delay For A Standby Generator In A Data Center?», *Facilitiesnet*. <https://www.facilitiesnet.com/powercommunication/article/What-Is-the-Best-Start-time-Delay-For-A-Standby-Generator-In-A-Data-Center--14154> (åpnet 8. juli 2022).
- [50] «Dieselaggregater», *Makker AS Safe Power Systems*. <http://www.makker.no> (åpnet 8. juli 2022).
- [51] «OREDA», nr. 2nd ed. OREDA : distributed by Det Norske Veritas Industri Norge, DNV Technica, no#, s. XVIII, 614 s. fig., 1992. [Online]. Tilgjengelig på: [https://urn.nb.no/URN:NBN:no-nb\\_digibok\\_2007102400041](https://urn.nb.no/URN:NBN:no-nb_digibok_2007102400041)
- [52] «Site Planning - Support». <https://www.gehealthcare.com/support/site-planning> (åpnet 24. august 2022).
- [53] «Computed Tomography Implementation and Site Planning». <https://www.siemens-healthineers.com/en-us/equipment-services/implementation-and-site-planning/ct> (åpnet 24. august 2022).
- [54] Keysight, «Product Discontinued Exemplar», *Keysight*. <https://www.keysight.com/us/en/product/34972A/lxi-data-acquisition-data-logger-switch-unit.html> (åpnet 14. juni 2022).
- [55] «i1000s AC-strømprøbe». <https://www.fluke.com/no-no/produkt/tilbehør/prober/fluke-i1000s> (åpnet 14. juni 2022).
- [56] «Byggordboka - Entreprisereformer». <https://www.byggordboka.no/artikkel/les/entreprisereformer> (åpnet 27. august 2022).
- [57] komité SN/K 403, «NS 3451:2022». Standard Norge, 18. mars 2022.
- [58] «Byggordboka - Bygningsdeler». <https://www.byggordboka.no/artikkel/les/bygningsdeler> (åpnet 17. mai 2022).
- [59] «Beskrivelsessystem bygg og anlegg - NS 3420 | standard.no». <https://www.standard.no/fagomrader/bygg-anlegg-og-eiendom/ns-3420/> (åpnet 18. mai 2022).
- [60] «Norsk prisbok». <https://www.norskprisbok.no/WhatIsNP.aspx> (åpnet 13. august 2022).

- [61] E. Skovlund, «Enkel lineær regresjon», *Tidsskr. Den Nor. Legeforening*, okt. 2020, doi: 10.4045/tidsskr.20.0494.
- [62] «Priser og prisindekser», *ssb.no*. <https://www.ssb.no/priser-og-prisindekser> (åpnet 21. august 2022).
- [63] «5. Indeksregulering», *www.finansnorge.no*. <https://www.finansnorge.no/takstogindeks/takstindeks/5-indeksregulering/> (åpnet 21. august 2022).
- [64] «Forskrift om sikkerhet ved arbeid i og drift av lavspenningsanlegg : med veiledning». Produkt- og elektrisitetstilsynet, Oslo, 1998.
- [65] «Veiledning til storulykkeforskriften | Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap». <https://www.dsb.no/lover/farlige-stoffer/veiledning-til-forskrift/veiledning-til-storulykkeforskriften/#-3-definisjoner> (åpnet 28. august 2022).
- [66] Y. E. Erdi, «Computed tomography x-ray tube life analysis: a multiyear study.», *Radiol. Technol.*, bd. 84, nr. 6, s. 567–570, aug. 2013.
- [67] «Byggekostnadsindekser», *SSB*. <https://www.ssb.no/priser-og-prisindekser/byggekostnadsindekser> (åpnet 29. august 2022).
- [68] R. A. Borgersen og Ø. Gullvåg, «SUS 2023, UPS for billediagnostikk, Dimensjoneringsforutsetninger».
- [69] «Hovedprogram utstyr SNR.pdf». Åpnet: 18. august 2022. [Online]. Tilgjengelig på: <https://helse-mr.no/Documents/SNR/Delutgreiingar%20til%20koseptfaserapporten%20SNR/Hovedprogram%20utstyr%20SNR.pdf>
- [70] «Smitteverntiltak ved St. Olavs hospital», *St. Olavs hospital*. <https://stolav.no/koronavirus> (åpnet 15. august 2022).
- [71] «Omfattende forbruksplaner fyller opp kapasiteten i strømmettet i nord», *Statnett*. <https://www.statnett.no/om-statnett/nyheter-og-pressemedlinger/nyhetsarkiv-2022/omfattende-forbruksplaner-fyller-opp-kapasiteten-i-stromnettet-i-nord/> (åpnet 29. august 2022).
- [72] G. Garnes Andreas Husevåg, «Prosjekteringskriterier for UPS-anlegg». NTNU, 17. desember 2015. [Online]. Tilgjengelig på: <http://hdl.handle.net/11250/2368203>
- [73] R. Martinez *mfl.*, «Rapport – Fase 1, Energibruk i sykehus, status over energikrevende funksjonskrav og faktisk forbruk knyttet til bygg og utstyr og muligheter for energieffektivisering», SINTEF, nov. 2011. Åpnet: 5. juni 2021. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.sintef.no/globalassets/sintef-teknologi-og-samfunn/rapporter-sintef-ts/lavenergisykehus-dok-f1-1-n-fase-1-sluttrapport-samlet-12.pdf>

# Vedlegg

## Vedlegg 1 Beregninger for forventet pålitelighet strømforsyning fra nettleverandør

Dataene er hentet fra årsrapportene for avbruddsstatistikk som NVE har publisert for perioden 2015 til 2020 [46].

År	Samlet tall sluttbrukere		påvirka sluttbrukere		sluttbrukeravbrudd		Varighet [min]							
	Kort	Langvarig	Kort	Langvarig	Kort	Langvarig	Kort	Langvarig						
			Varslet	Ikke varslet	Varslet	Ikke varslet	Varslet	Ikke varslet	Varslet	Ikke varslet	Varslet	Ikke varslet	Varslet	Ikke varslet
2015	13 912	13 912	301	4 778	1656	7163	502	17 848	2 278	17 496	481	13 664	307 248	955 303
2016	14 000	14 000	305	4 758	1 811	6 362	544	15 980	2 405	15 421	431	11 415	308 572	666 911
2017	13 383	13 383	257	4 494	2 024	6 151	459	13 880	2 792	13 722	398	10 719	356 533	571 064
2018	13 372	13 371	267	4 531	1 872	6 450	434	19 726	2 602	18 591	397	14 899	362 110	963 584
2019	13 296	13 296	na	na	na	na	331	15 279	2 091	13 610	243,15	11 034	310 881	568 139
2020	13 154	13 154	na	na	na	na	456	16 540	2 485	16 261	384,78	12 923	390 122	695 702
Gjennomsnitt	13 520	13 519	283	4 640	1 841	6 532	454	16 542	2 442	15 850	389	12 442	339 244	736 784
Sum 2015 - 2020	81 117	81 116	1 130	18 561	7 363	26 126	2 726	99 253	14 653	95 101	2 335	74 654	2 035 466	4 420 703
Sum kortvarig og langvarig, varslet og ikke varslet	81 117		53 180				211 733				6 533 157			

$$\hat{\lambda} = \frac{n}{\tau} = \frac{211\,733 \text{ avbrudd}}{81\,117 \text{ år}} = 0,38310986 \text{ år}^{-1}$$

$$\hat{\mu} = \frac{n}{\tau} = \frac{211\,733 \text{ avbrudd}}{6\,533\,157 \text{ min}} = 0,032408986 \text{ min}^{-1}$$



## Vedlegg 2 Feidata, IEEE Std. 493 [44, s. 226–275].

Grønne felt benyttet i pålitelighetsnettverk.

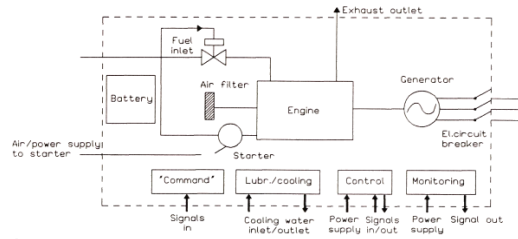
Kode:	Komponent	Enhet-år	Antall feil	Sviktintensitet pr. år	MTTR [h]	MTBF [år]	Kommentar
	Batteri	10543,8	74	0.00702	12.11	142,484	Samlepost for alle typer batterier
E2-120	Bly-batteri	3215,3	24	0.00746	32.13	133,971	
	Kabel, over bakken, pr. 1000ft	588927,8	289	0.00049	8.44	2037,812	Samlepost for alle typer og forlegningsmåter kabler over bakken
E11-000	Batterilader	270	2	0.00741	0.5	135,019	
	Effektbryter, fastmontert	147880	5	0	-	2899,607	Samlepost for alle typer
	Effektbryter, uttrekkbar	7217.8	8	0.00111	3.13	902,219	Samlepost for alle typer
	Effektbryter, vakuum	1943.2	39	0.02007	10.74	49,825	Samlepost for alle typer
C4-100	Styringsenhet, nettforsyning/generatorer	1710.4	19	0.01111	2.11	90,019	
C4-300	Kontrollpanel, omkoblings-automatikk	560.6	11	0.01962	1.27	50,962	
	Dieselmotor, generator	1354.1	715	0.52802	24.22	1,894	Samlepost for alle typer
E25-000	Vekselretter	414.8	2	0.00482	26	207,422	
E27-110	Motor, generatorsett	232.9	10	0.04295	7.4	23,285	3 fase, 60 Hz
E32-000	Likeretter	447.5	2	0.00447	16	223,748	Samlepost for alle typer
	Kontrollsystem	551	244	0.44282	2.88	2,258	Samlepost for alle typer
	Bryter	9720.8	61	0.00628	4.2	159,357	Samlepost for alle typer
	Bryter, skillebryter	3330.5	1	0.00015	-	6530,353	Samlepost for alle typer
	Koblingsutstyr/switchgear	4558.7	37	0.00812	27.56	123,207	Samlepost for alle typer
	Transformator, olje	8819.2	46	0.00522	82.74	191,721	Samlepost for alle underkategorier
E39-200	UPS, liten og statisk	426.4	4	0.00938	2	106,588	

**Tabell 41 Feidata for utvalgte komponenter i det elektriske anlegget [44, s. 226–275].**

### Vedlegg 3 Feildata, OREDA 1992 [51]

Røde felt benyttet i Markov-modell. Grønne felt benyttet i pålitelighetsnettverk.

Direkte fra OREDA:

Komponent	Antall oppstarters	Kalender-tid [1E6 h]	Operasjonstid [1E6 h]	Feilmodus	Antall feil	Feilfrekvens [1/1E6 h]		Arbeids-timer [h]	Kommentar
						Pr kalender-tid	Pr operasjonstid		
Generator inkl. dieselmotor, nødstrøm (4.1.4)	759	0,4169	0,0125	Alle feil	85	180	8500	14	<p>Gjelder alle feil.                      Inkluderer startmotor og batterier, selve motoren og generatoren inkl. vern, smøre- og kjølesystem og lokalt styre- og overvåkingssystem.                      Inkluderer alt innenfor stiplede linje:</p>  <p>Sannsynlighet for svikt ved oppstart: 1,3/1000</p>

Data fra OREDA 92 [51] slik de er presentert i [34]:

Komponent	Kalender- tid [1E6 h]	Operasjonstid [1E6 h]	Feilmodus	Antall feil	Feilfrekvens [1/1E6 h] Pr kalendertid	Feilfrekvens [1/1E6 h] Pr operasjonstid	Arbeids- timer [h]
Vekselretter (4.2.2)	1,2264	1,2664	Alle kritiske feiltilstander	7	12	12	12
			Ingen spenning ut	5	10	10	19
			omkoblingsfeil	1	0,78	0,78	4
			Ukjent	1	0,78	0,78	12
Likeretter (4.2.3)	2,7435	2,7435	Ingen spenning ut	1	0,31	0,31	14
Batterilader (4.2.4)	5,5631	5,55631	Alle kritiske feiltilstander	39	9,0	9,0	10
			Ingen spenning ut	35	5,5	5,5	10
			ukjent	4	3,5	3,5	-
Batterier (4.2.5)	5,8887	5,8887	Alle kritiske feiltilstander	5	0,85	0,85	18
			Utilstrekkelig spenning ut i batteridrift	2	0,34	0,34	9
			Ingen spenning ut i batteridrift	2	0,34	0,34	17
			Ukjent	1	0,17	0,17	36

Data fra OREDA 92 [51] slik de er etterbehandlet og brukt i [34]:

Komponent	MTBF (år)	MTTR (time)
Vekselretter (4.2.2)	10	12
Likeretter (4.2.3)	368	14
Batterilader (4.2.4)	13	10
Batterier (4.2.5)	134	18

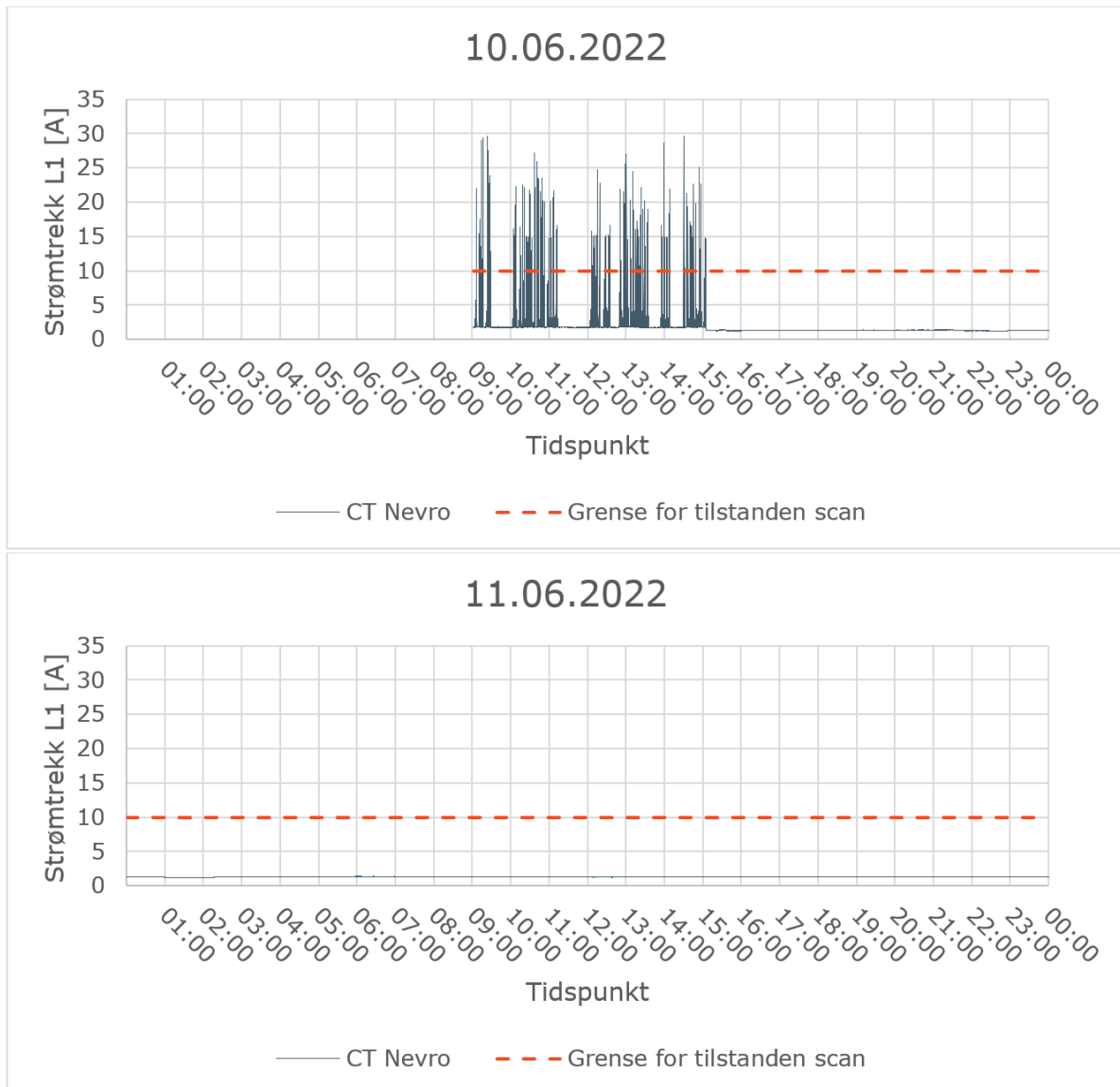
## Vedlegg 4 Feildata, SINTEF [34]

Grønne felt benyttet i pålitelighetsnettverk.

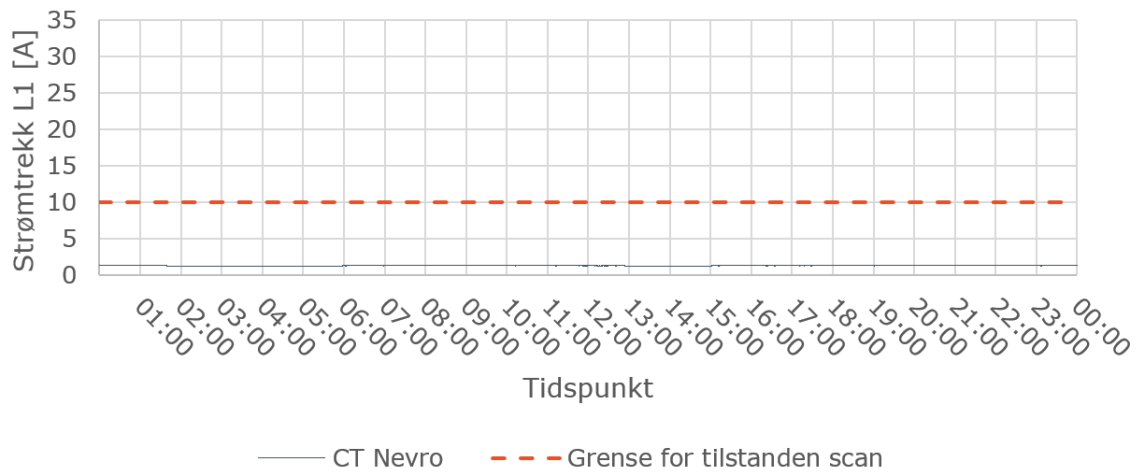
Komponent	Feilfrekvens (per år)	Feilfrekvens (per 1E6 time)	MDT (time)
Likeretter	0,0088	1,0	24
Batteri- grensesnitt/ lader	0,060	6,4	24
Batteri	0,44	50	24
Vekselretter	0,11	13	24
Bypass (statisk switch)	0,0082	0,93	24

## Vedlegg 5, Måleresultater St. Olavs hospital

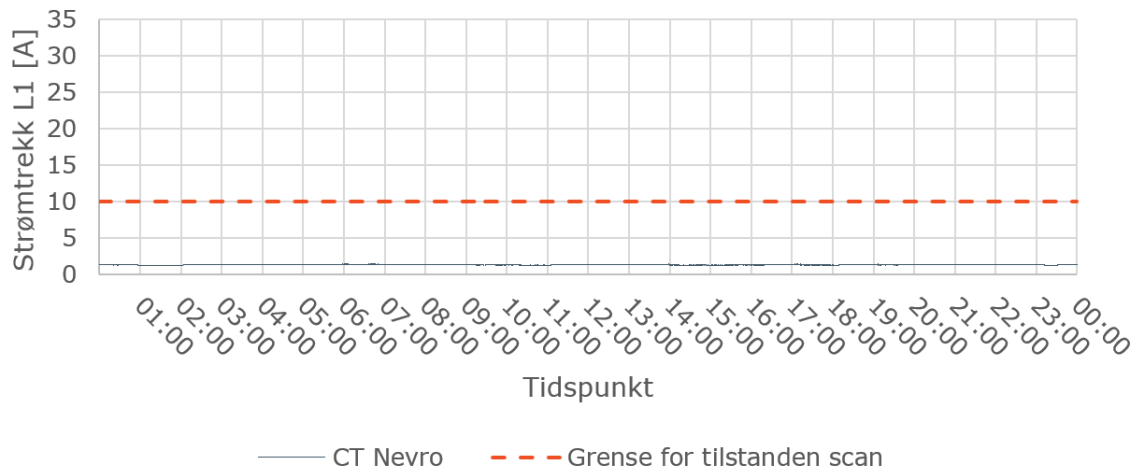
Nevro- senteret, målinger hovedfordeling nødkraft



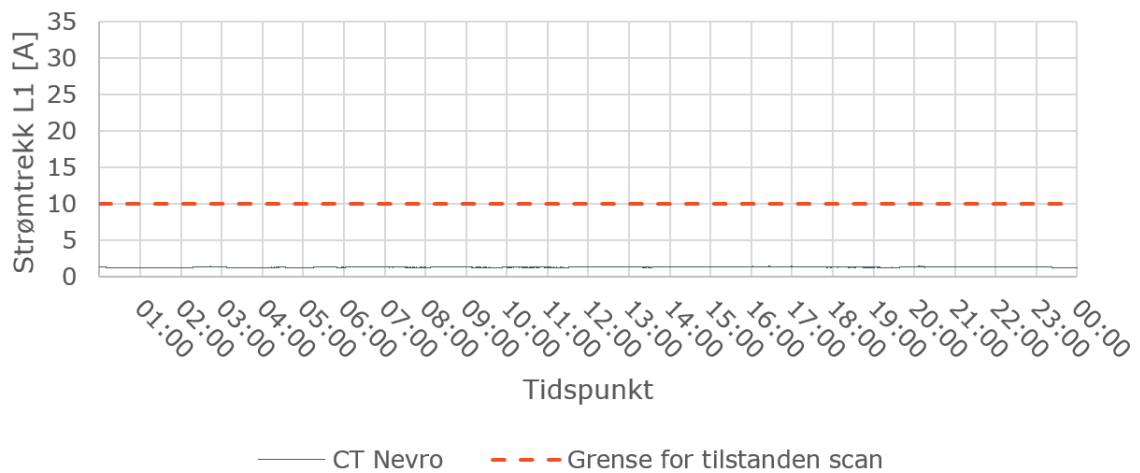
12.06.2022



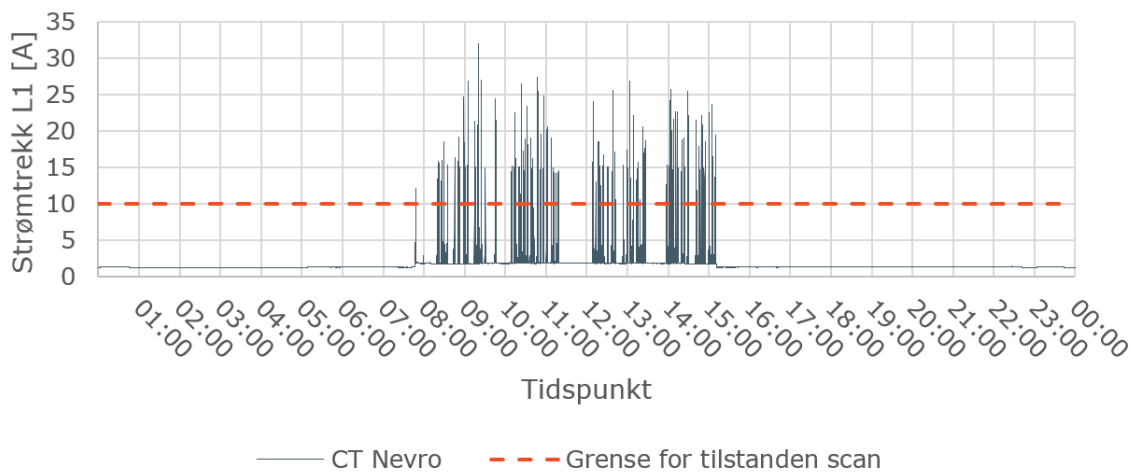
13.06.2022



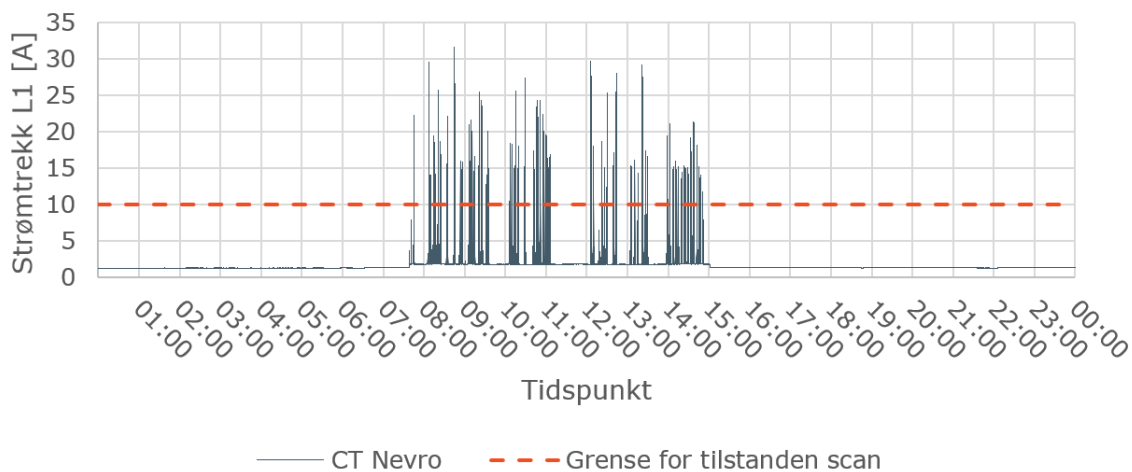
14.06.2022



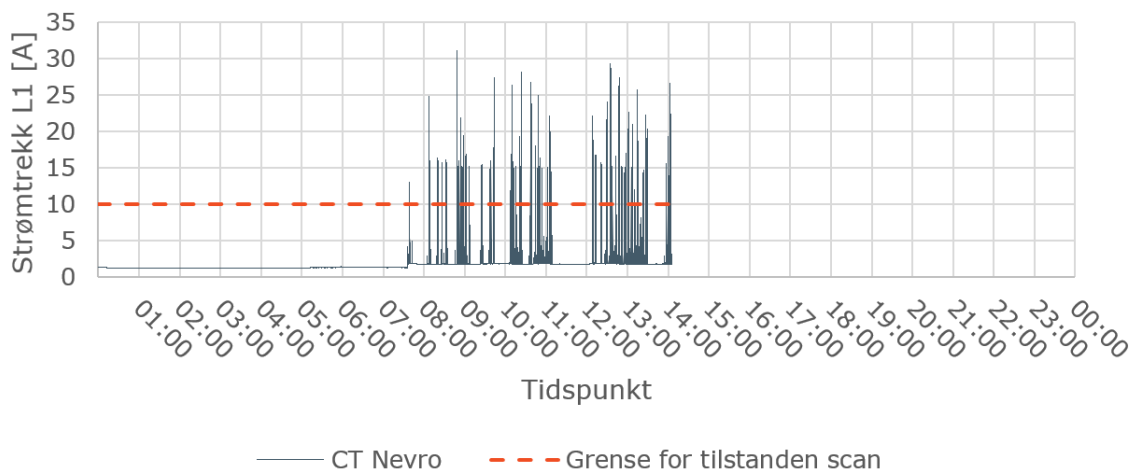
15.06.2022



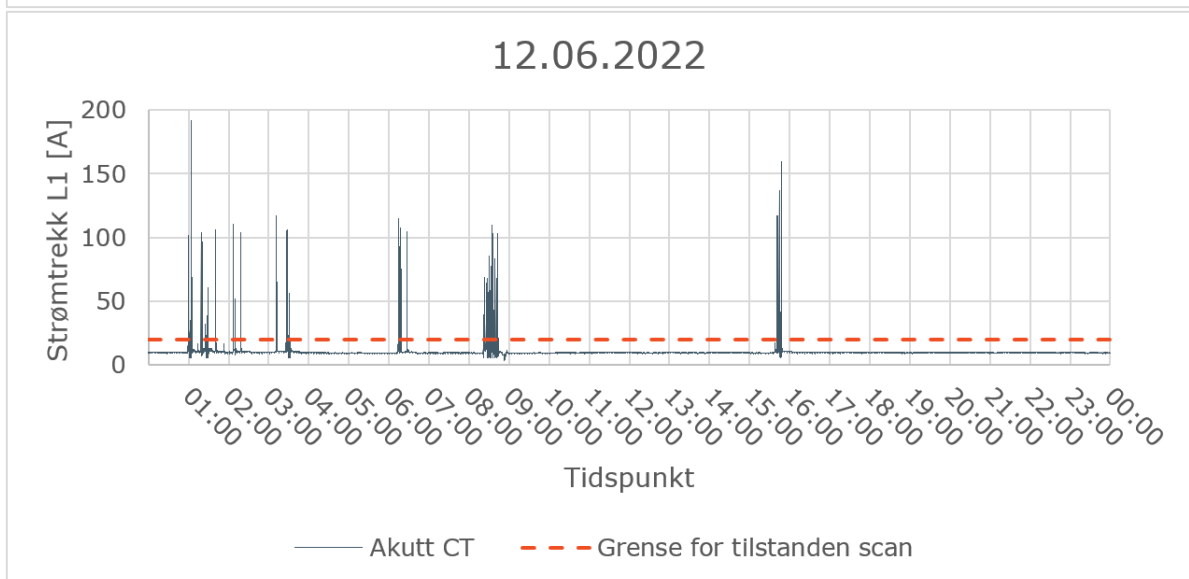
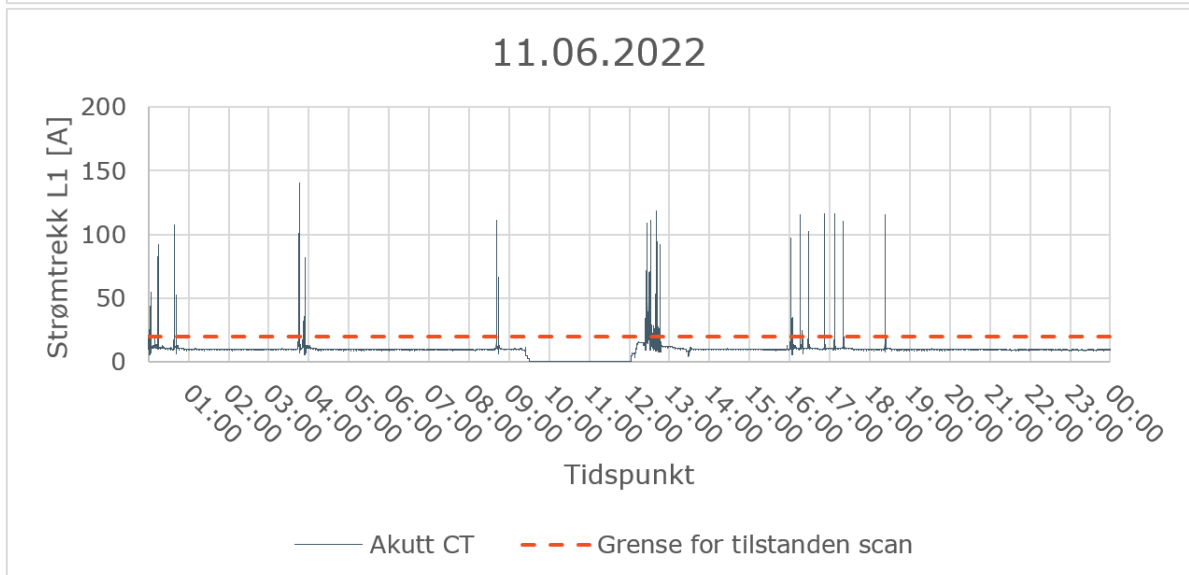
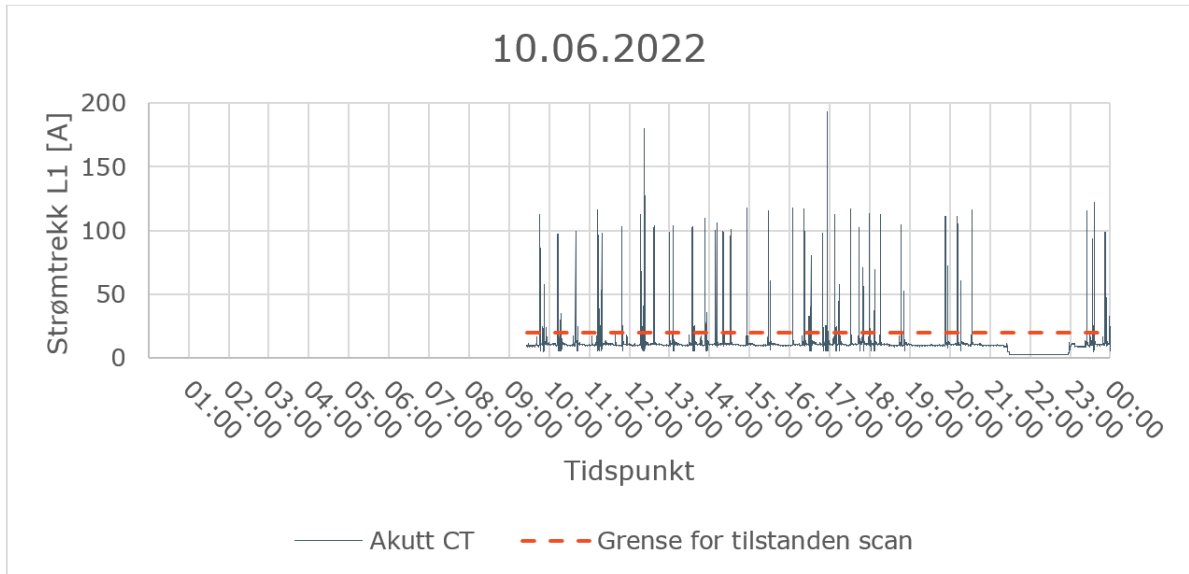
16.06.2022



17.06.2022

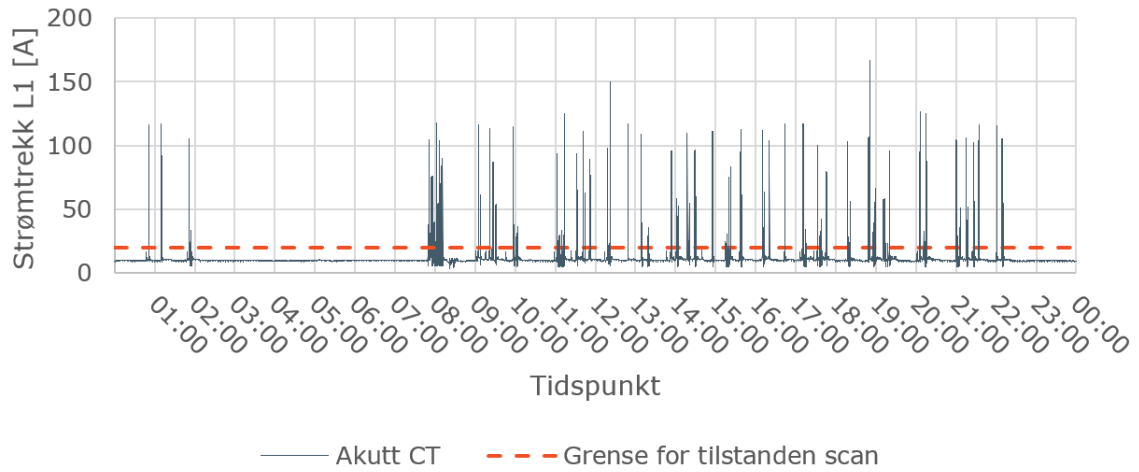


## Akutt- senteret, målinger hovedfordeling nødkraft

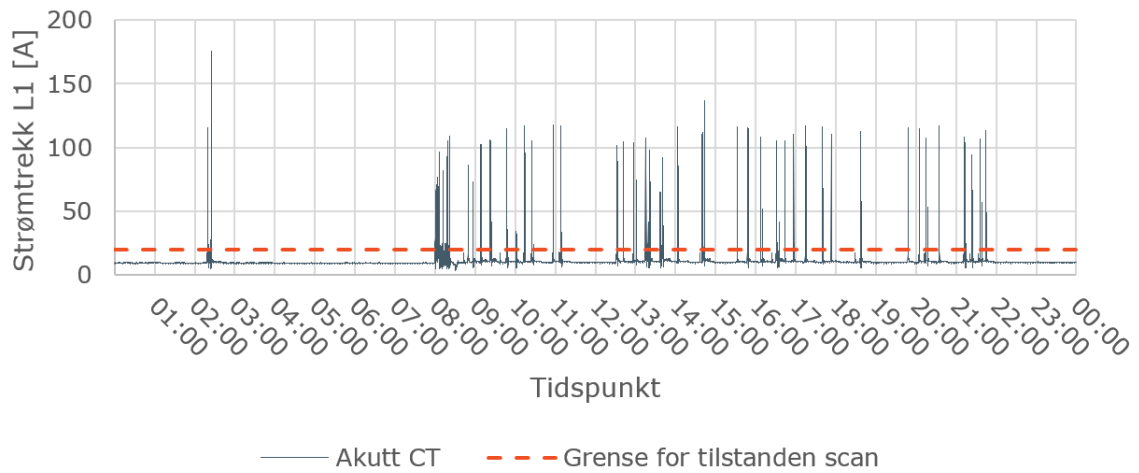




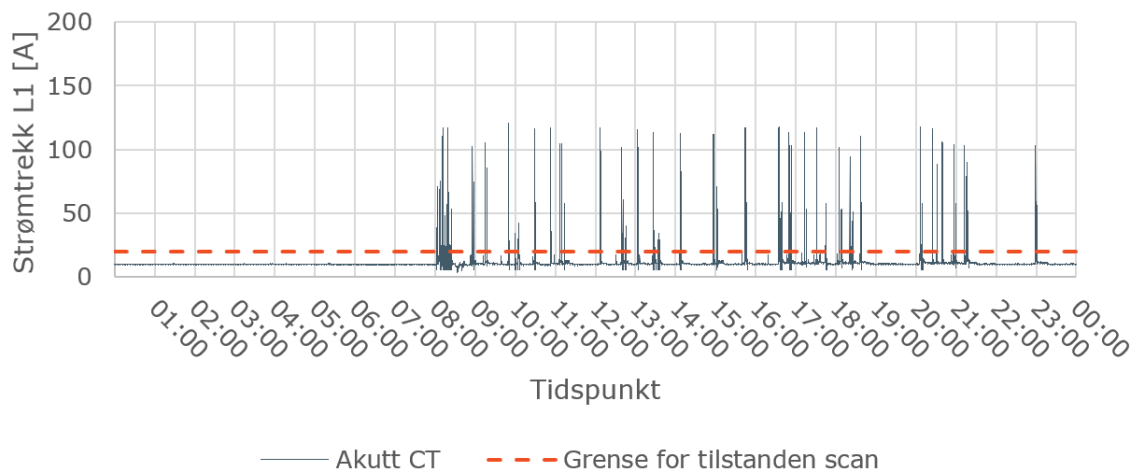
13.06.2022



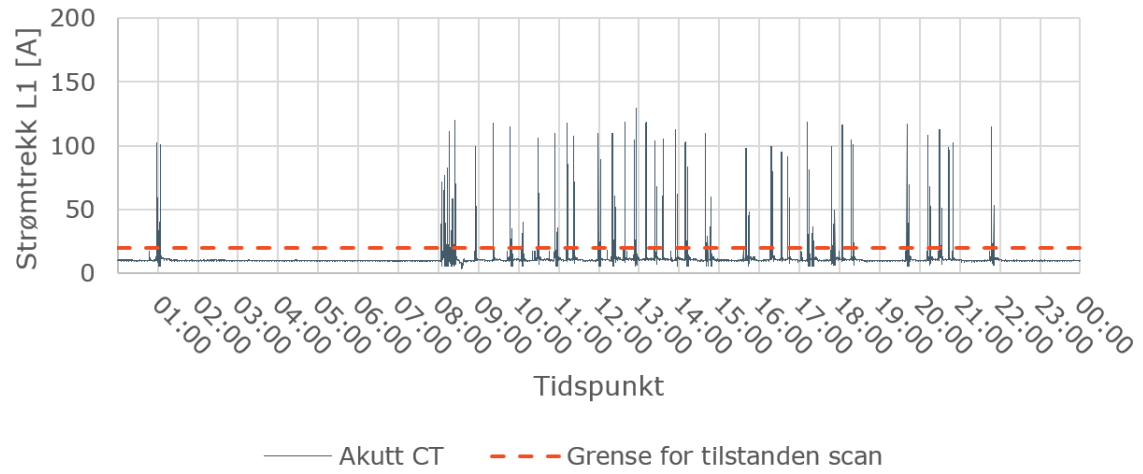
14.06.2022



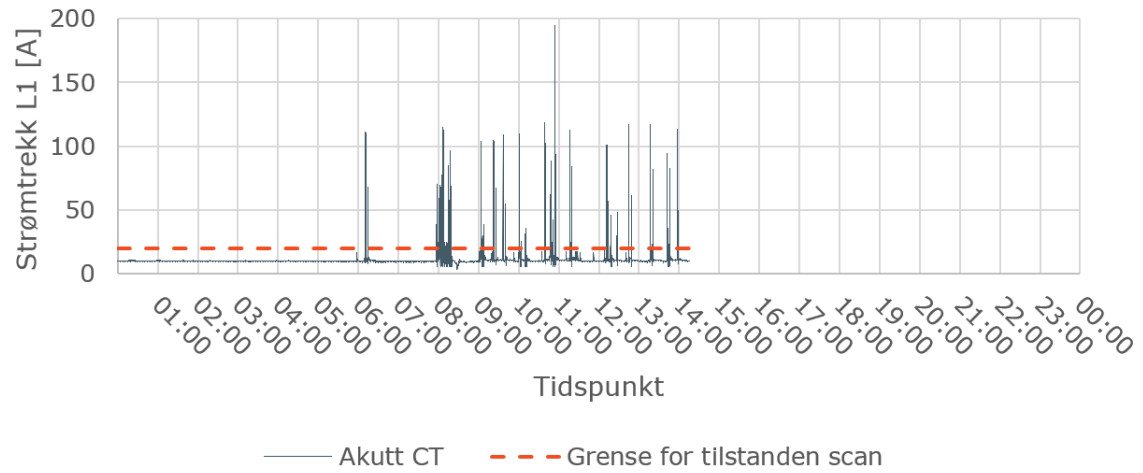
15.06.2022



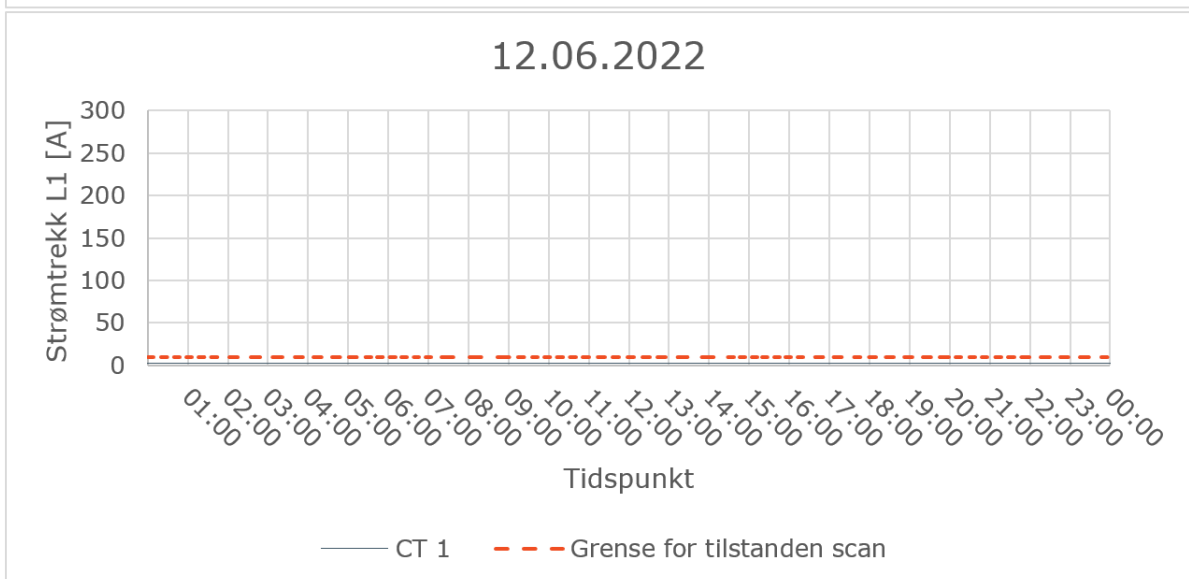
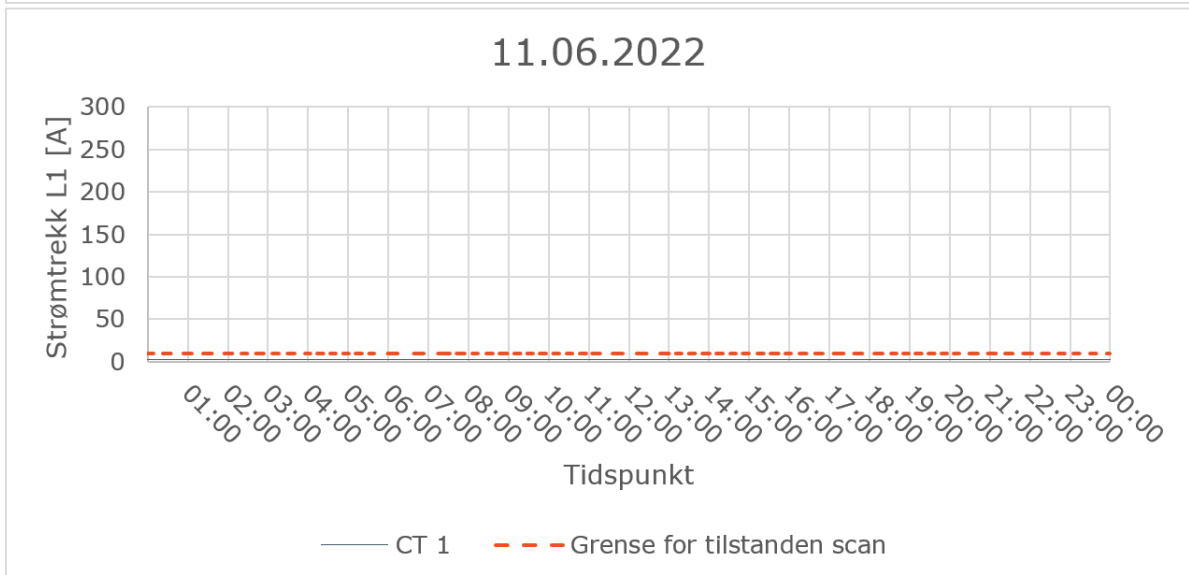
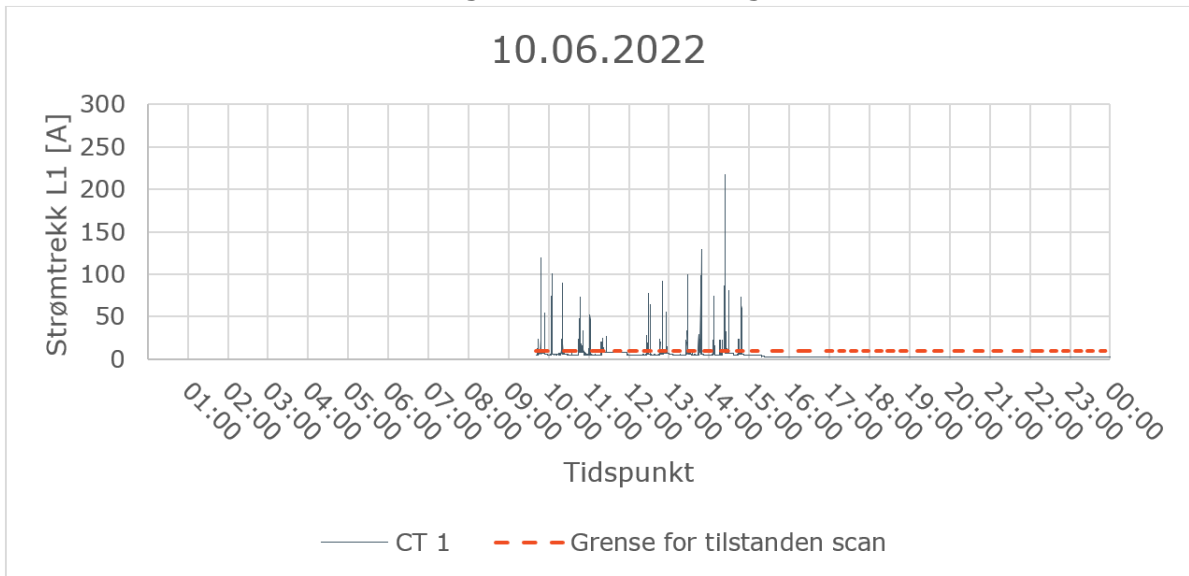
16.06.2022



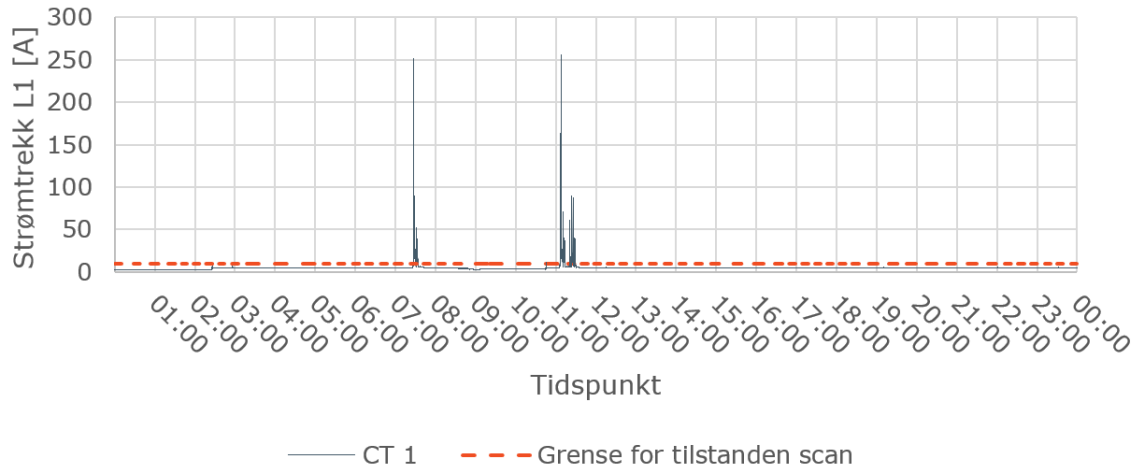
17.06.2022



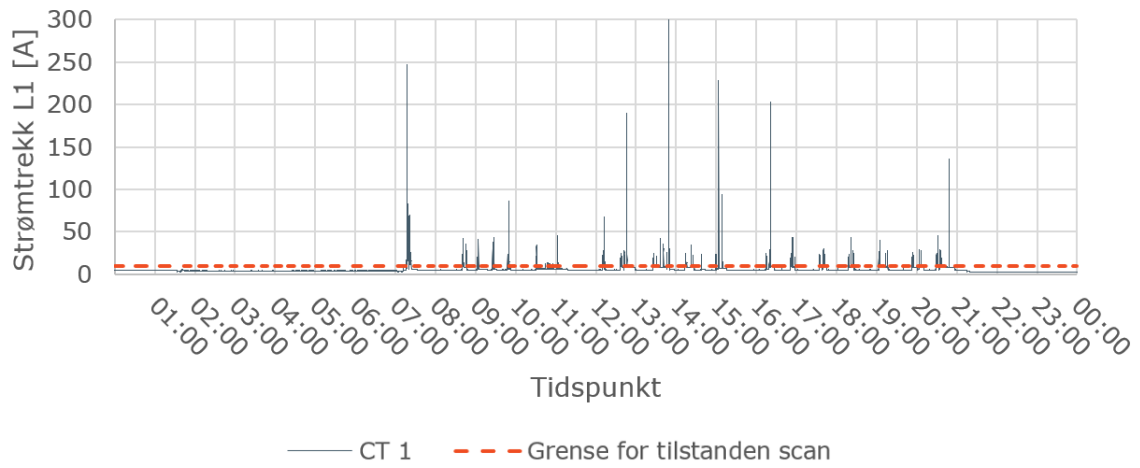
## Gastro- senteret, målinger hovedfordeling nødkraft, CT 1



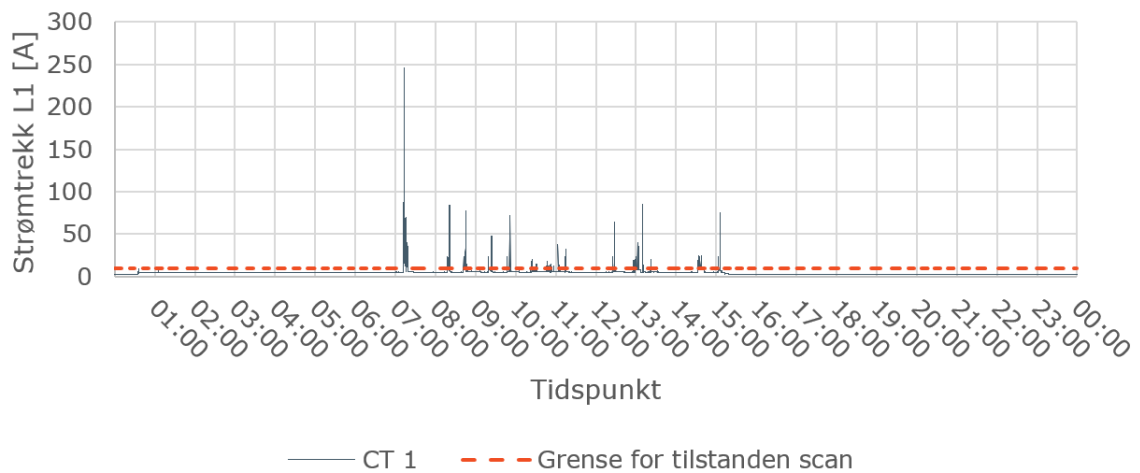
13.06.2022



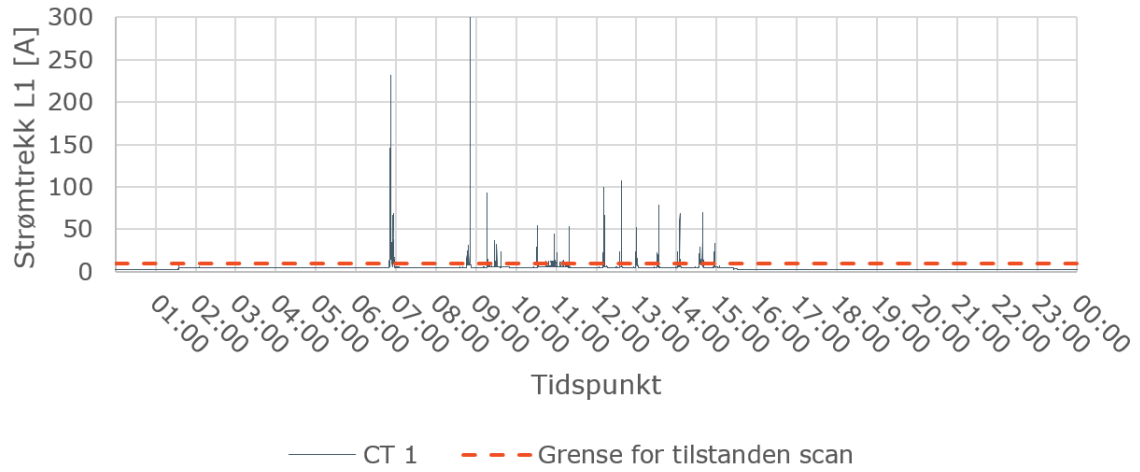
14.06.2022



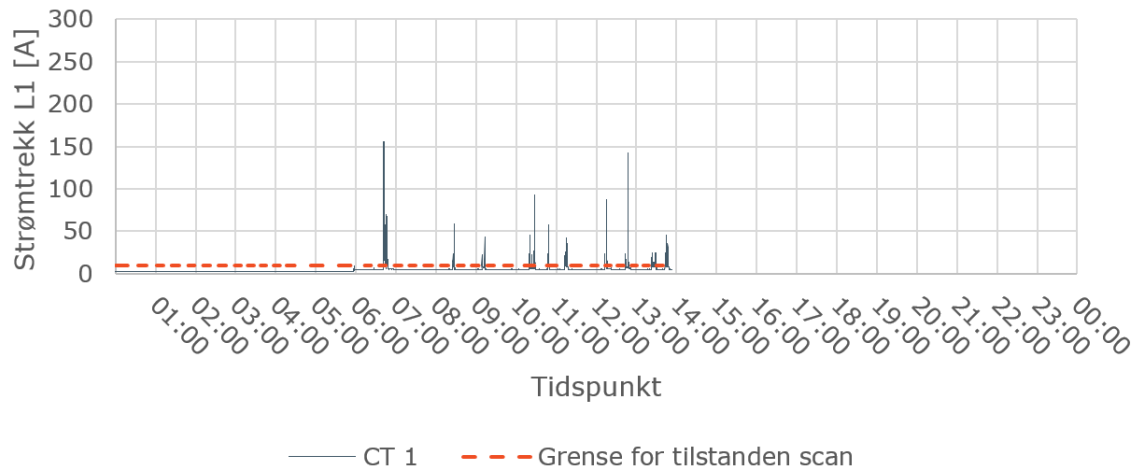
15.06.2022



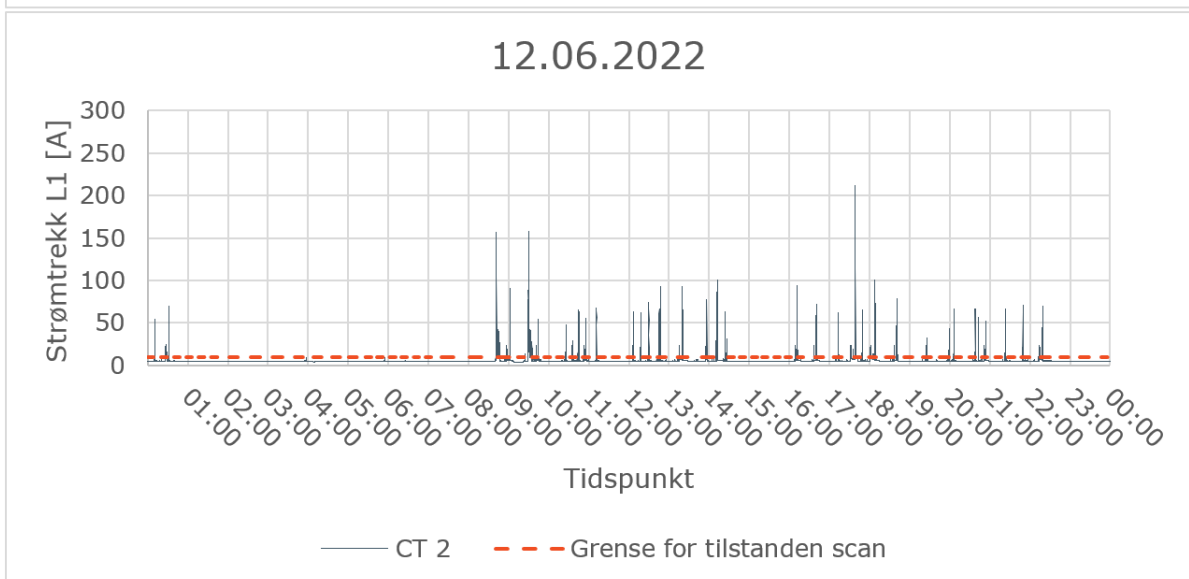
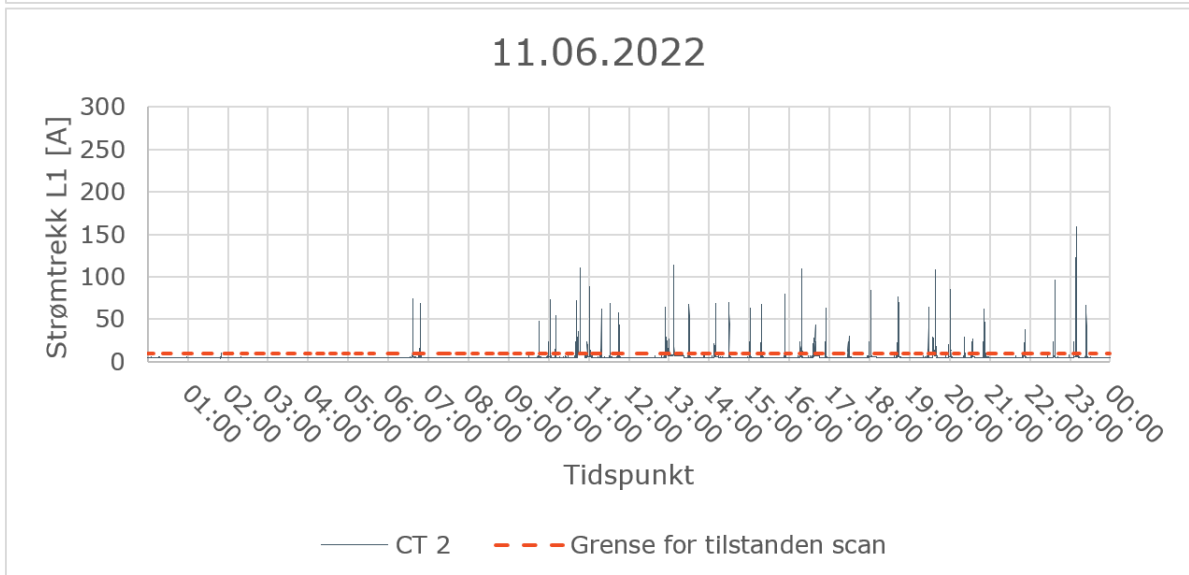
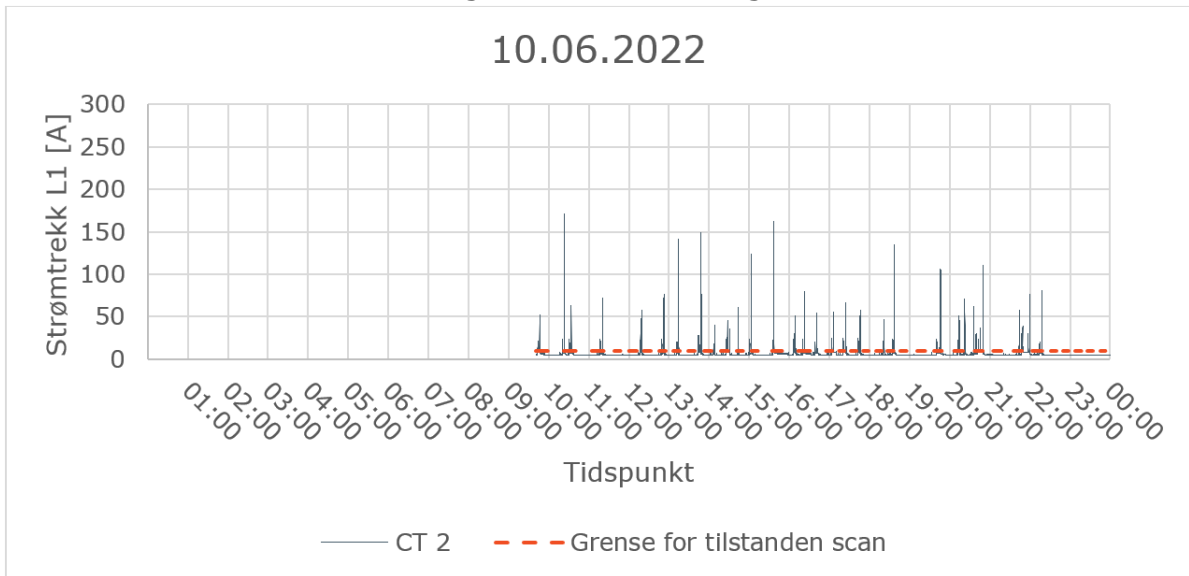
16.06.2022



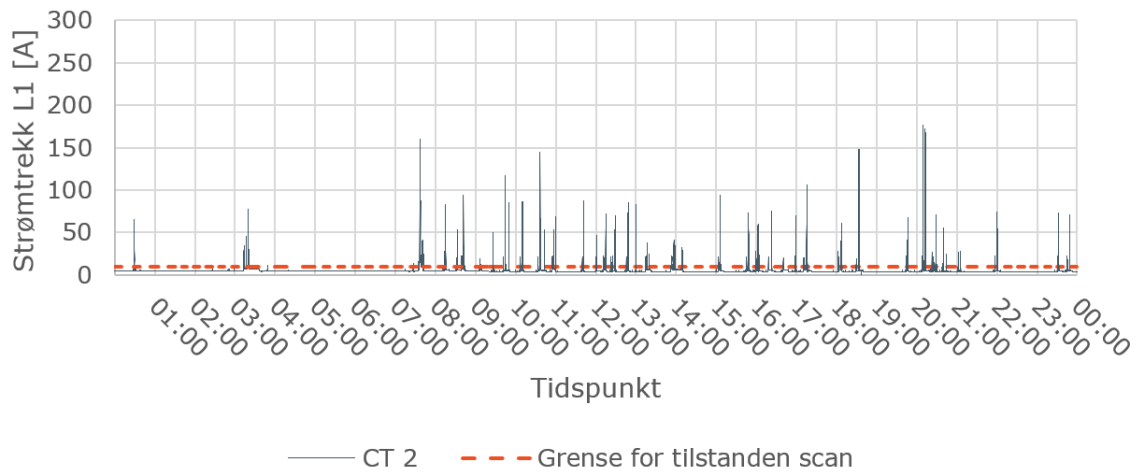
17.06.2022



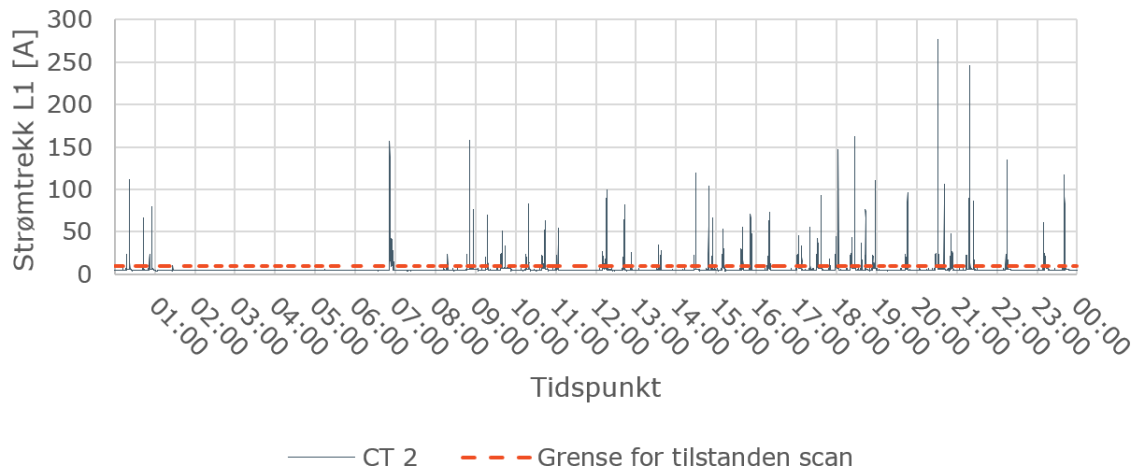
## Gastro- senteret, målinger hovedfordeling nødkraft, CT 2



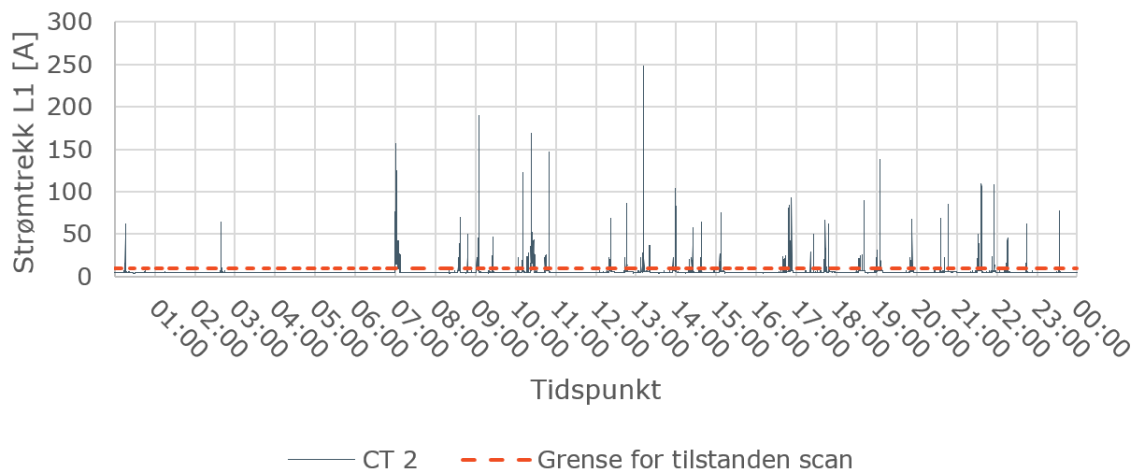
13.06.2022



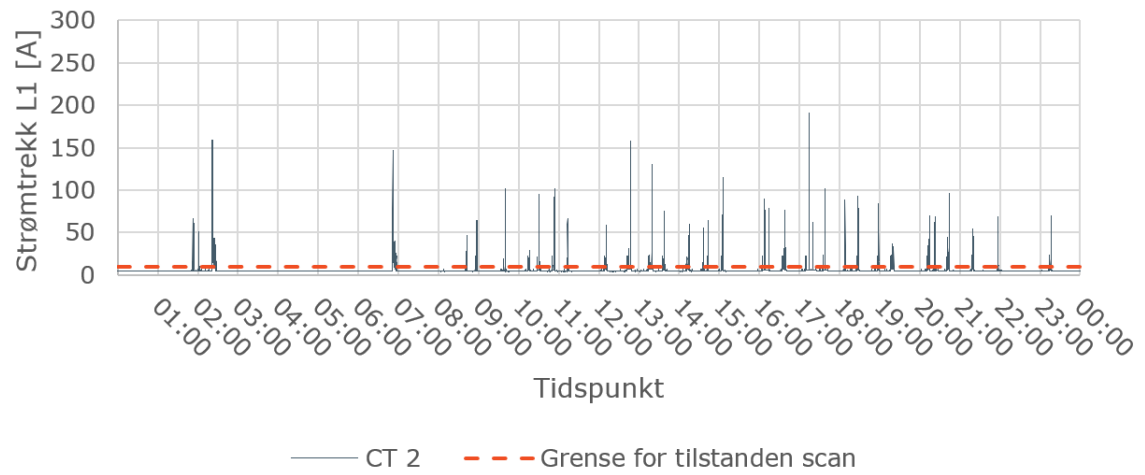
14.06.2022



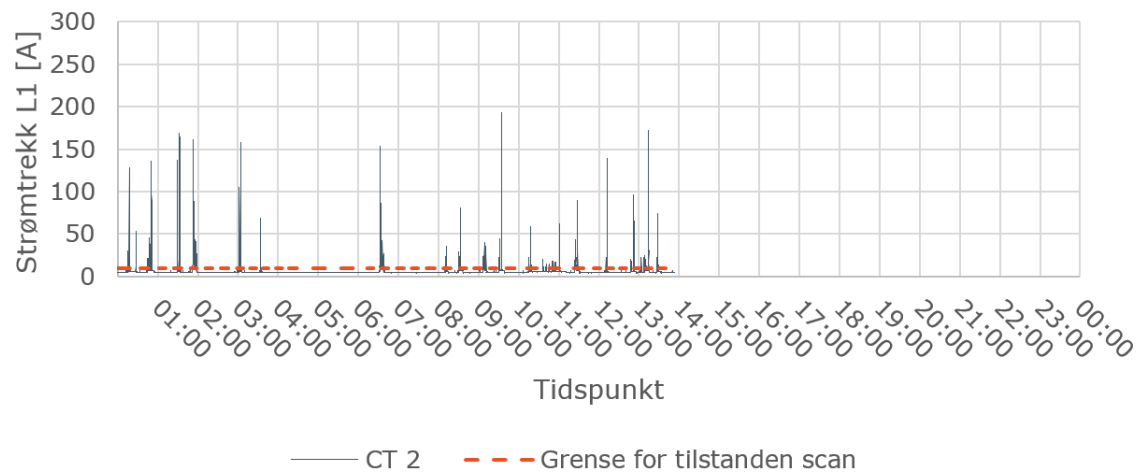
15.06.2022



16.06.2022

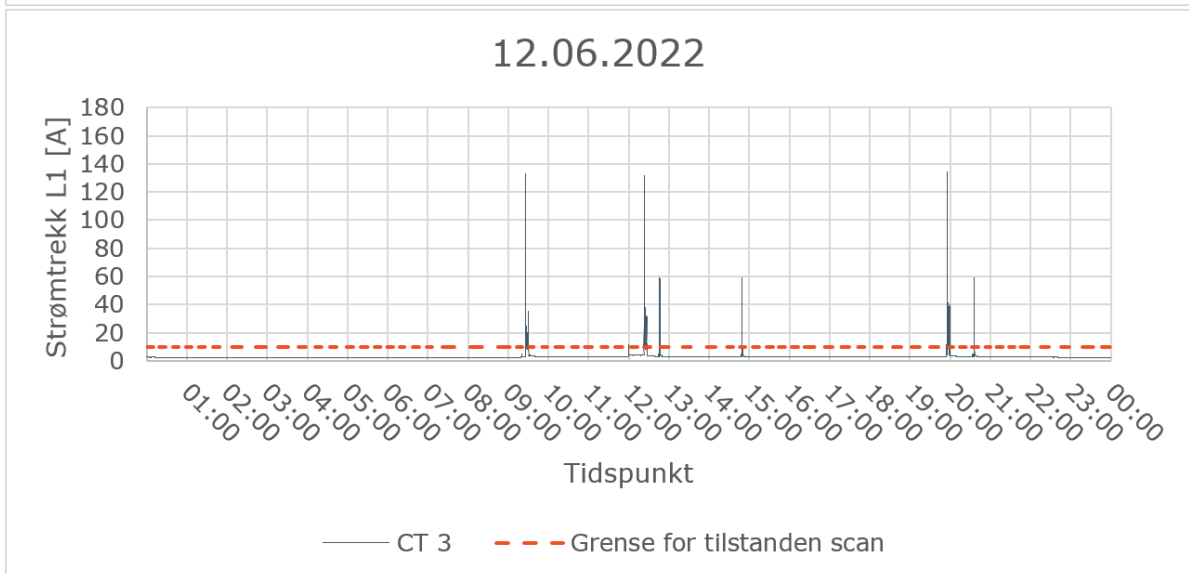
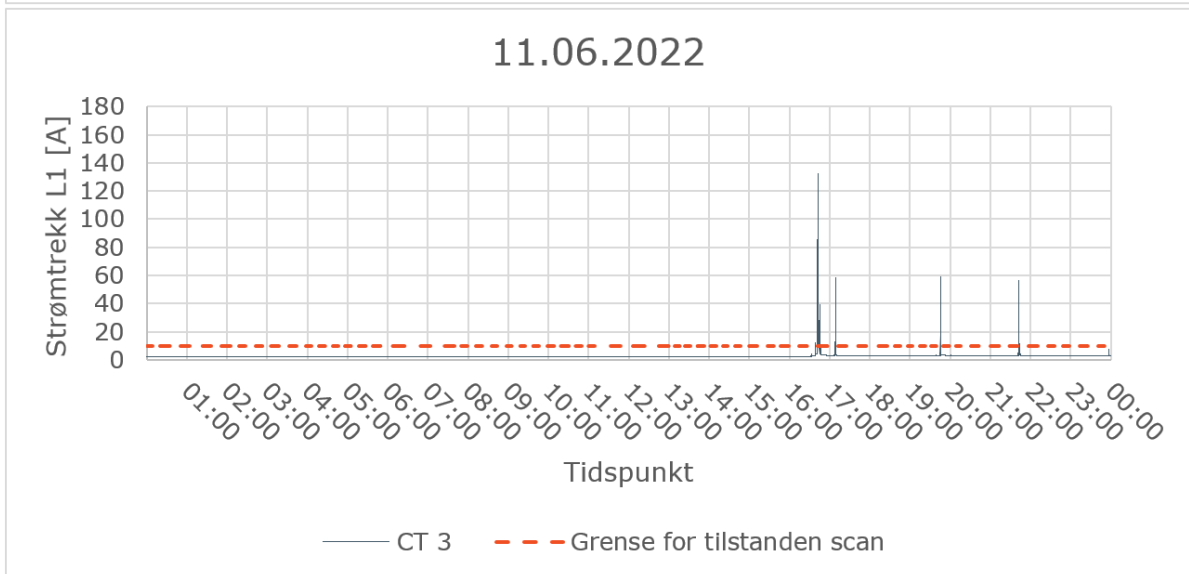
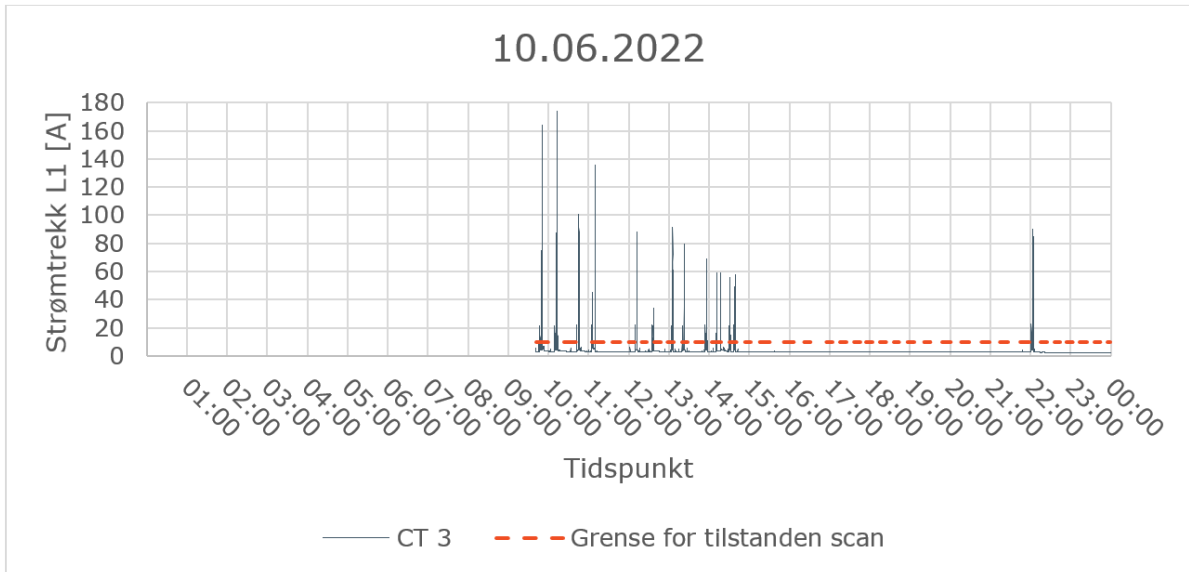


17.06.2022

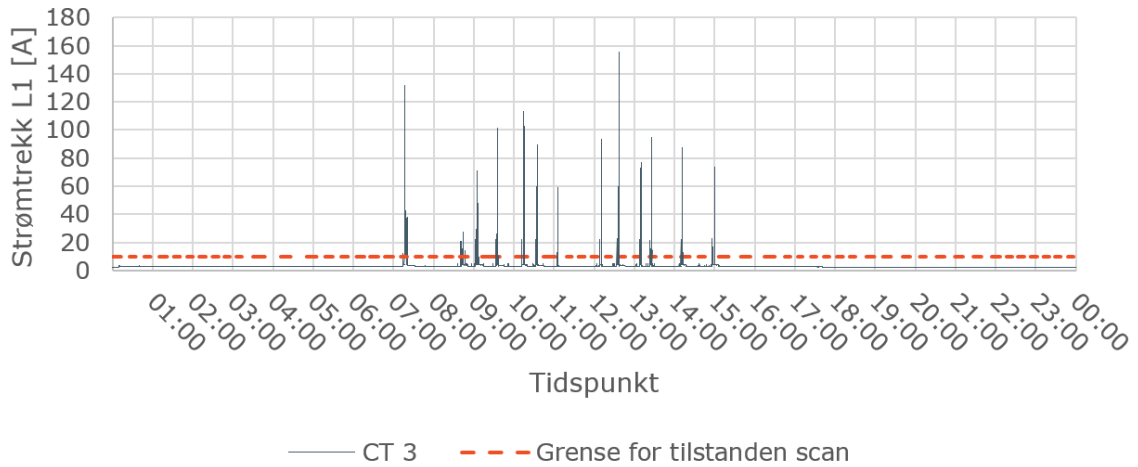




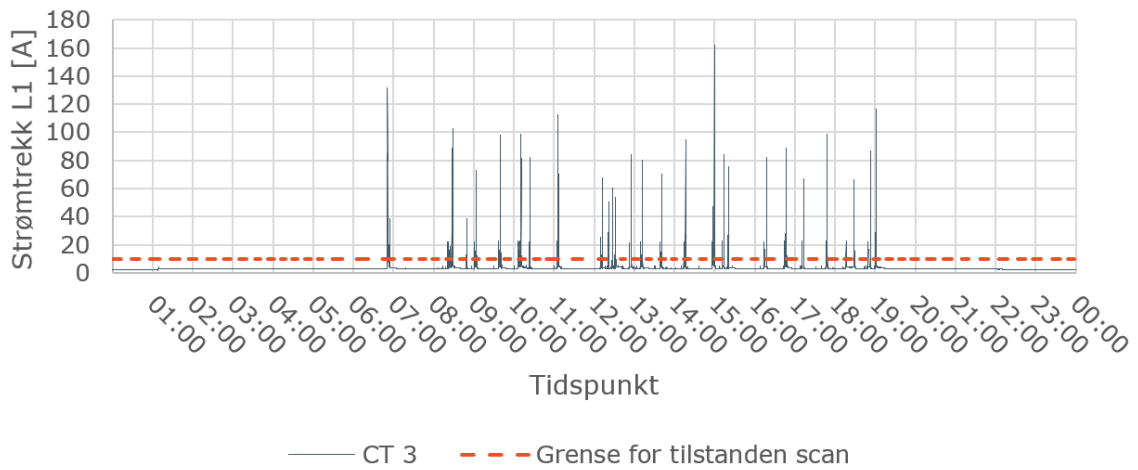
## Gastro- senteret, målinger hovedfordeling nødkraft, CT 3



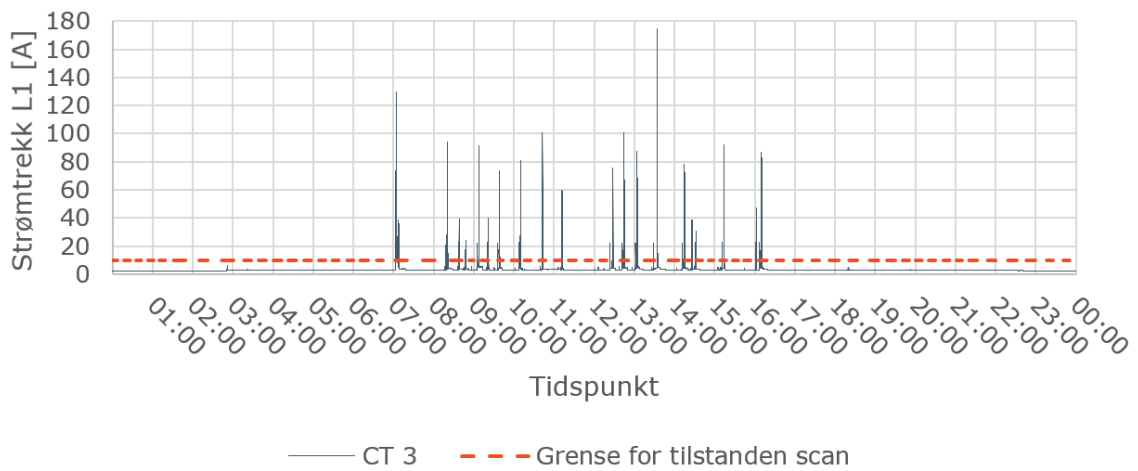
13.06.2022



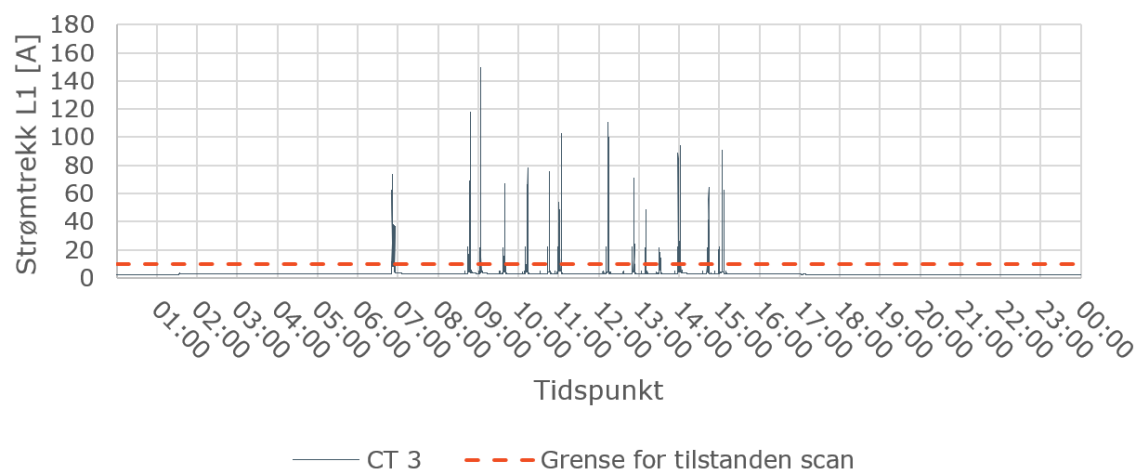
14.06.2022



15.06.2022



16.06.2022



17.06.2022

