



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

**Masteroppgave 2023 30 stp.**

Fakultet for realfag og teknologi

# **Simulering av styringsalgoritmer for lastflytting av industrielle varmtvannsberedere på Oslo Lufthavn Gardermoen**

Simulation of management algorithms for load shifting of industrial water heaters at Oslo Airport Gardermoen

**Njål Kolberg Olsen**

Miljøfysikk og fornybar energi

# Sammendrag

Energiomstilling i det norske kraftsystemet har økt behovet for fleksibilitet i strømmettet. Det er nødvendig å utnytte alternative ressurser på forbrukersiden som kan bidra til mer fleksibilitet. Av den norske topplasten består av omtrent 25 til 30 % av varmelaster. Varmtvannsberedere er en type varmelast med iboende lagringskapasitet for termisk energi, som gjør at den egner seg spesielt godt til å flytte strømforbruk over tid. Denne masteroppgaven modellerer hvordan egenskapene til varmtvannsberedere bestemmer potensialet for lastflytting, ved å benytte systemer integrert på Oslo Lufthavn Gardermoen som et case-scenario.

Oppgaven detaljerer to ulike styringsalgoritmer for flytting av strømforbruket til et spesifikt beredersystem, utviklet med individuelle formål. Den første styringsalgoritmen har formål om maksimal lastflytting av strømforbruk tilknyttet varmtvannsberedere til de daglige timene med lavest totalt strømforbruk på flyplassanlegget. Den andre styringsalgoritmen har formål om unngåelse av strømforbruk tilknyttet varmtvannsberedere ved de høyeste daglige effekttoppene internt på anlegget. Algoritmene simuleres med hensyn til systemets fysiske begrensinger ved hjelp av historiske data. Resultatene fra dette systemet ekstrapoleres til å gjelde for alle aktuelle beredersystemer på Gardermoen. Simuleringene demonstrerte at begge styringsalgoritmene oppnådde sine primærformål.

I preliminæranalysen ble det oppdaget at beredere var over halvfulle med varmtvann i 99,97 % av den vurderte perioden. I 69,06 % av den vurderte perioden var lagret varmtvann over 75 % av den tilgjengelige lagringskapasiteten til tankene. Oppgaven fastslår at et betydelig potensial for å tappe varmtvann, uten umiddelbar påfølgende oppvarming eksisterer i varmtvannsberederene på Gardermoen. Dette potensialet resulterte i en samlet flyttet energimengde på 182,3 MWh for den første algoritmen, og 175,2 MWh for den andre.

Simulert lastflytting har hovedsakelig blitt vurdert med et implisitt perspektiv, ved å direkte beregne økonomisk lønnsomhet. Metoden med formål om unngåelse av effekttopper resulterte i høyere lønnsomhet på grunn av høyere kutt av effektledet i nettleiemodellen. Total besparelse viste seg å være 42 843,90 kroner. Ulempen med denne styringsalgoritmen er at den krever nøyaktige prediksjonsmodeller for strøm- og varmtvannsforbruk som ikke eksisterer på nåværende tidspunkt. Total besparelse for styringsalgoritmen med formål om maksimal lastflytting ble beregnet til 37 369,27 kroner. Fordelen med denne styringsalgoritmen er at den er svært implementerbar under nåværende forutsetninger.

Resultatene ga også innsikt for utnyttelse i et eksplisitt perspektiv. Utkobling av strømforbruk trygt kan forkomme i 6 timer hvert døgn. Responstiden er i tillegg svært rask. Dette tillater deltagelse i alle nåværende reservemarkeder om ressursene aggregeres til et tilstrekkelig nivå. Dette kan gjøres av Avinor direkte eller gjennom en ekstern aggregator. I fremtiden kan det også være mulig å by disse ressursene direkte inn på lokale fleksibilitetsmarkeder. Installerer mer omfattende målepunkter vil denne kapasiteten kunne benyttes mer optimalt, og muliggjøre bud i begge reguleringsretninger.

# Abstract

The energy transition in the Norwegian power system has increased the need for flexibility in the electricity grid. It is necessary to utilize alternative resources on the consumer side that can contribute to increased flexibility. About 25 to 30 % of the Norwegian peak load consists of heating loads. Water heaters are a type of heating load with inherent storage capacity for thermal energy, which makes them particularly well-suited to shifting electricity consumption over time. This master's thesis models how the characteristics of water heaters determine the potential for load shifting, by using systems integrated at Oslo Airport Gardermoen as a case scenario.

The thesis details two distinct management algorithms for shifting the electricity consumption of a specific heater system, for different purposes. The first management algorithm aims to shift the maximum amount of electricity consumption associated with water heaters to the hours with the lowest total electricity consumption at the airport facility. The second control algorithm aims to avoid electricity consumption associated with water heaters during the highest daily peak loads of total consumption at the facility. The algorithms are simulated with regard to the system's physical limitations using historical data. The results from this system are extrapolated to apply to all relevant water heater systems at Gardermoen. The simulations demonstrated that both control algorithms achieved their primary objectives.

In the preliminary analysis, it was discovered that the heaters were more than half full of hot water in 99.97 % of the assessed period. In 69.06 % of the assessed period, the stored hot water was over 75 % of the tanks' available storage capacity. The thesis concludes that there is significant potential for using hot water, without immediate subsequent heating, in the water heaters at Gardermoen. This potential resulted in a total shifted energy amount of 182.3 MWh for the first algorithm, and 175.2 MWh for the second.

Simulated load shifting has primarily been assessed from an implicit perspective, by directly calculating economic profitability. The method aimed at avoiding peak loads resulted in higher profitability due to higher saving in the related net tariff model. The total savings turned out to be 42,843.90 NOK. The downside of this management algorithm is that it requires accurate prediction models for electricity and hot water consumption that do not exist at the present moment. The total savings for the management algorithm aimed at maximum load shifting were calculated to be 37,369.27 NOK. The advantage of this algorithm is that it is highly implementable under current conditions.

The results also provided insights for utilization from an explicit perspective. The disconnection of electricity consumption can safely occur for 6 hours each day. Additionally, the response time is very rapid. This allows for participation in all current reserve markets if the resources are aggregated to a sufficient level. This can be done by Avinor directly or through an external aggregator. In the future, it may also be possible to bid these resources directly into local flexibility markets. With the installation of more measurement tools, this capacity could be used more optimally, enabling regulation of frequency in both directions.

# Forord

Semesteret hvor denne masteroppgaven ble skrevet sammenfalt med en svært turbulent tid i mitt personlige liv. Det er derfor viktig for meg å rekke tilstrekkelig oppmerksomhet til de personene som betyr aller mest.

Først og fremst vil jeg takke min mor for hennes enestående åpenhet, varme og mot. Disse kvalitetene vil jeg for alltid se opp til og sette pris på. Jeg vil også takke henne for å være den mest stødige og pålitelige støttespilleren i alle livets aspekter. Jeg ønsker å takke min far for hans endeløse styrke, sjenerøsitet og pågangsvilje. Jeg vil også takke han for å ha lært meg verdien av hardt arbeid. Mine foreldre er to av mine aller største forbilder. For meg er det ingen tvil hvor jeg har fått viljestyrken, arbeidsmoralen og tålmodigheten det har tatt for å fullføre denne oppgaven. Jeg vil også takke min bror for å være en gledespreder uten sidestykke, og en lojal og omtenkssom venn. Til slutt vil jeg takke min kjære samboer for hennes unike evne til å se gleden i de hverdagslige tingene, og for å være en strålende kilde av positivitet og omsorg selv i de mørkeste tider. Takk for at du holder ut med meg og støtter meg hver eneste dag.

Av personene på NMBU må jeg først og fremst takke min hovedveileder, Heidi S. Nygård. En times diskusjon med henne resulterte alltid med mange gode ideer og mulige løsninger på problemer. Jeg vil også takke de resterende medlemmene av NeX2G-gruppen for innsikt og inspirasjon. En stor takk må også rettes til de øvrige studentene jeg har hatt gleden av å dele mastersal med. De har gjort opplevelsen utrolig hyggelig og morsom. Til slutt vil jeg takke alle de fantastiske vennene jeg har fått i min tid på NMBU. Jeg har blitt kjent med utrolig mange flotte personer i studenttilværelsen, som jeg håper og tror vil være livslange venner.

---

Denne masteroppgaven er dedikert til  
**Hilde Kolberg Olsen**

---

# Innhold

<b>Sammendrag</b>	<b>i</b>
<b>Forord</b>	<b>iii</b>
<b>1 Introduksjon</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn . . . . .	1
1.2 Motivasjon . . . . .	2
1.3 Problemstilling og forskningsspørsmål . . . . .	3
1.4 Avgrensninger . . . . .	3
<b>2 Teori</b>	<b>4</b>
2.1 Energiomstilling i det norske kraftsystemet . . . . .	4
2.1.1 Det norske kraftsystemet . . . . .	4
2.1.2 Utfordringer tilknyttet omstillingen . . . . .	7
2.2 Fleksibilitet . . . . .	8
2.2.1 Reserver . . . . .	8
2.2.2 Forbrukerfleksibilitet . . . . .	10
2.2.3 Implisitt fleksibilitet . . . . .	12
2.2.4 Ekspisitt fleksibilitet . . . . .	13
2.2.5 Fleksibilitetsteknologier . . . . .	15
2.3 Berederteknologi . . . . .	17
2.3.1 Virkemåte . . . . .	17
2.3.2 Varmetap og virkningsgrad . . . . .	20
2.3.3 Lastflyttingspotensiale . . . . .	21
<b>3 Case: Oslo lufthavn Gardermoen</b>	<b>23</b>
3.1 NeX2G . . . . .	23
3.2 Beredersystemene på Gardermoen . . . . .	24
3.3 Data . . . . .	25
<b>4 Metode</b>	<b>27</b>
4.1 Estimering av massestrøm . . . . .	27
4.2 Styringsalgoritme for maksimal lastflytting . . . . .	29
4.3 Styringsalgoritme for unngåelse av effekttopper . . . . .	32
4.4 Ekstrapolering for totalt berederforbruk . . . . .	34
4.4.1 Beregning av totalt forbruk for beredersystemene . . . . .	34
4.4.2 Økonomiske beregninger . . . . .	35

<b>5</b>	<b>Resultater og diskusjon</b>	<b>37</b>
5.1	Preliminæranalyse og ekstrapoleringsfaktor . . . . .	37
5.1.1	Feilmålinger . . . . .	37
5.1.2	Forbruksanalyse . . . . .	38
5.1.3	Varmetap og termokliner . . . . .	38
5.1.4	Vurdering av ekstrapoleringsfaktorer . . . . .	39
5.2	Maksimal lastflytting . . . . .	40
5.2.1	Endring for beredersystem 1 . . . . .	41
5.2.2	Endring av totalforbruk . . . . .	43
5.3	Unngåelse av effekttopper . . . . .	45
5.3.1	Endring for beredersystem 1 . . . . .	46
5.3.2	Endring for totalt forbruk . . . . .	48
5.4	Sammenlikning av simulerte styringsalgoritmer . . . . .	51
5.4.1	Implisitt perspektiv . . . . .	52
5.4.2	Eksplisitt perspektiv . . . . .	53
5.4.3	Generell sammenlikning av algoritmene . . . . .	54
5.5	Generell diskusjon . . . . .	55
5.5.1	Evaluering av simuleringsfunksjonene . . . . .	55
5.5.2	Legionella . . . . .	56
5.5.3	Varmtvannsberedere i strømmettet . . . . .	57
<b>6</b>	<b>Konklusjon og videre arbeid</b>	<b>58</b>
6.1	Konklusjon . . . . .	58
6.2	Videre arbeid . . . . .	59
<b>A</b>	<b>Sikkerhetstiltaket</b>	<b>61</b>
<b>B</b>	<b>Python programmer</b>	<b>62</b>
	<b>Bibliografi</b>	<b>63</b>

# Figurer

2.1	Utvikling av norsk energibruk 1990 - 2021 . . . . .	4
2.2	Fordelt normalårsproduksjon . . . . .	5
2.3	Kraftregioner og utenlandsforbindelser . . . . .	6
2.4	Aktivering av reserver . . . . .	9
2.5	Strategier for utjevning av effekttopper . . . . .	10
2.6	Estimerte utfallsrom for forbrukerfleksibilitet . . . . .	11
2.7	Fordeling av estimert forbrukerfleksibilitet basert på kraftregioner . . . . .	11
2.8	Andeler varmelaster på en typisk vinterdag . . . . .	16
2.9	Enkel skisse av varmtvannsbereder med tverrsnitt . . . . .	18
2.10	Av- og påskrudde varmtvannsberede . . . . .	19
3.1	Berdermodell 17RED 1000l 15kW+15kW . . . . .	24
3.2	Oversiktsskjema for forvarming av tappevann og varmtvannsberedere . . . . .	25
3.3	Totalt strømforbruk og tradisjonelt berederforbruk uke 26 . . . . .	26
4.1	Tilstander i system 1 ved spesifikke forbruksverdier . . . . .	28
4.2	Illustrering av styringsalgoritme for maksimal lastflytting . . . . .	29
4.3	Pseudokode for simulering av maksimal lastflytting . . . . .	31
4.4	Illustrering av styringsalgoritme for unngåelse av effekttopper . . . . .	33
4.5	Pseudokode for simulering av effekttoppunngåelse . . . . .	34
5.1	Endret forbruksmønster for maksimal lastflytting . . . . .	41
5.2	Endring av varmtvannsnivå ved maksimal lastflytting . . . . .	42
5.3	Flyttet berederforbruk og totalt strømforbruk . . . . .	43
5.4	Endring av totalforbruk . . . . .	44
5.5	Total forbruksdifferanse med maksimal lastflytting . . . . .	44
5.6	Timesfordeling av forbruksnekt . . . . .	46
5.7	Endret forbruksmønster for unngåelse av effekttopper . . . . .	47
5.8	Endring av varmtvannsnivå ved unngåelse av effekttopper . . . . .	48
5.9	Flyttet berederforbruk og totalt strømforbruk . . . . .	49
5.10	Endring av totalforbruk ved unngåelse av effekttopper . . . . .	49
5.11	Total forbruksdifferanse med unngåelse av effekttopper . . . . .	50

# Tabeller

2.1	Nettleiemodell for bedriftkunder Elvia . . . . .	13
2.2	Reservemarkedene . . . . .	14
3.1	Beredersystemene på Gardermoen . . . . .	24
5.1	Preliminær forbruksanalyse . . . . .	38
5.2	Vurderte ekstrapoleringsfaktorer . . . . .	39
5.3	Dimensjoneringstest . . . . .	40
5.4	Forbruksendring av firetimersintervaller basert på prioritetsverdi . . . . .	40
5.5	Flyttet energi med maksimal lastfytting . . . . .	45
5.6	Endring i månedlige effekttopper . . . . .	51
5.7	Flyttet energi med unngåelse av effekttopper . . . . .	51
5.8	Kostnad ved ulike forbruksmønstre . . . . .	52
5.9	Forslåtte tilbud for reservemarkeder . . . . .	53
A.1	Tabell av verdier beregnet av sikkerhetstiltaket . . . . .	61
B.1	Linker til Python filer . . . . .	62



# Kapittel 1

## Introduksjon

### 1.1 Bakgrunn

Verdenssamfunnet har i flere tiår stått ovenfor en omfattende energiomstilling for å unngå irreversibel skade på det globale miljøet som resultat av klimaendringer [1]. Siden Kyoto-protokollen i 1997 har det gjennom internasjonalt samarbeid blitt satt konkrete mål for å minimere påvirkningen det moderne samfunn har på naturen [2]. Over lang tid har arbeidet for å nå disse målene blitt utsatt eller oversett. En forsamling av FNs medlemsnasjoner ratifiserte Parisavtalen i 2015. Avtalen representerer en enighet om at global gjennomsnittlig temperaturøkning ikke skal overstige 2°C [3]. For å oppnå dette målet er tiden inne for et skippertak i energiomstillingen. Omstillingen vil være en lang og omfattende overgang til mer bærekraftige energiteknologier [4]. Økende antall elbiler, hustak med solceller og medieoppslag om upopulære vindturbiner kan oppfattes som tegn på at denne prosessen er i en tidlig fase. Energiomstillingen vil innebære en økning i både produksjon og forbruk av elektrisitet, ettersom flere essensielle sektorer i dagens samfunn må elektrifiseres [4]. Dette vil kreve store utbygginger av produksjonskapasitet og endringer av forbruk. Økt behov for overføringskapasitet vil være en konsekvens av disse endringene [5].

Innføring av nye teknologier og energikilder i sammenheng med økende behov for elektrisitet har store konsekvenser for strømmettet [5]. I nærstående fremtid vil det bli mer krevende å opprettholde kraftbalanse og stabil frekvens. Elektrifisering av kraftintensive sektorer vil kreve større kapasitet for overføring av elektrisk effekt [4]. Gamle kraftlinjer som ikke tåler høy effektoverføring kan begrense store deler av nettet til kritiske tidspunkt. En vesentlig kostnad tilknyttet overgangen til et fornybart samfunn er investeringer for utbygging av det elektriske kraftnettet [5]. Det må sørges for tilstrekkelig overføringskapasitet for å håndtere elektrifisering av ikke-fornybar energibruk og eventuell økning av fremtidig strømnettspress. Forventet vekst av strømforbruk i Norge er estimert til å være mellom 21 og 35 TWh innen 2030 [4]. Det nåværende norske strømnettet har ikke tilstrekkelig kapasitet for denne veksten, forbedringer vil være kostbart og tiden er knapp [5].

Mer optimal utnyttelse av tilgjengelige ressurser kan fungere som et alternativ til nettutbygging [5, 6]. Alternative løsninger for å unngå utbygginger, utsette prosjekter eller håndtere flaskehalser i kraftnettet må derfor utarbeides [5]. Utvikling i dagens tempo er ikke håndterbar med nåværende nettkapasitet. Implementering av alternative løsninger er nødvendig før større forbedringer er ferdigstilt. Slike løsninger har inntil nylig vært relativt ukonvensjonelle, men nå finnes det mange ideer som behøver mer praktisk utprøving [7]. Dette vil vil bety økt interagering mellom flere aktører i nettet, som ofte refereres til som smarte kraftnett. For å gjøre riktige investeringer for utvikling av brukbare ressurser er det viktig å kartlegge hvor mye kapasitet slike muligheter kan

tilgjengeliggjøre.

Det er flere teknologier som potensielt kan levere tjenester som er nødvendige for et smartere kraftnett. Konseptene fleksibilitet og energilagring er sentrale for disse tjenestene [8]. Fleksibilitet og energilagring sees ofte i sammenheng med hverandre, siden lagret energi kan benyttes på andre tidspunkt enn når produksjonen foregår. Hvilken teknologi som fungerer best avhenger av hvilken tidsskala det er ønskelig å flytte energien over [9]. Som et resultat av energiomstillingen er det mulig at teknologier som hydrogen eller batterier vil installeres kun for å yte netjtjenester [5, 4]. Dette kan potensielt være billigere enn utbygging av nye kraftlinjer. Et enda billigere alternativ er å utnytte teknologier som allerede benyttes til andre formål. Teknologier med potensial for fleksibilitet og energilagring eksisterer allerede i bygg, industri og transportsektoren [7].

Aktører med mulighet til å utnytte sine ressurser i et fleksibilitetsperspektiv kan gjøre dette på forskjellige måter. Innenfor sektorene nevnt ovenfor vil dette hovedsakelig oppnås ved å flytte forbruk til ulike tidspunkter. I den norske byggmassen er en stor del av energiforbruket knyttet til oppvarming. Av den totale norske makslasten kan over en fjerdedel knyttes til varmelaster [7]. En essensiell varmelast i det moderne samfunn er varmtvannsberederen. For å varme opp vann til lovpålagte temperaturer i varmtvannstanker kreves det mye elektrisk effekt. Vanligvis varmes dette vannet opp samtidig som det tappes [10]. Ved tidspunkter med dyr strøm er det derfor svært uøkonomisk å bruke varmtvann. Disse tidspunktene representerer ofte forbrukstopper i strømmettet. I forgående tiår har ikke strømforbruk til varmtvannsberedere vært ansett som et problem. En fremtid med mer usikker tilgang og større prissvingninger på strøm krever at gamle tankesett må revurderes. I de siste par årene har det derfor vært økt fokus på å bruke beredere som en kilde til fleksibilitet. Med smartere forbruksmønstre av varmtvannsberedere kan denne gamle teknologien brukes som en ressurs i strømmettet istedenfor en byrde.

## 1.2 Motivasjon

Denne masteroppgaven vurderer fleksibilitetspotensialet til varmtvannsberedere på Oslo Lufthavn Gardermoen. Den er skrevet i sammenheng med forskningsprosjektet Nettbalansering fra store parkeringsanlegg og næringsbygg - NeX2G. Dette er et samarbeidsprosjekt mellom Norges miljø- og biovitenskapelige Universitet (NMBU) og Avinor, støttet av Norges Forskningsråd (prosjektnummer 320825). Prosjektet omhandler utredning og kartlegging av behov og potensielle ressurser av fleksibilitet på flyplassanlegget [11]. Utredning av eksisterende og potensiell fleksibilitetskapasitet er et sentralt aspekt av forskningen. Den største potensielle kapasiteten er å benytte langtidsparkerte el-biler med toveis ladepunkter. For at dette skal fungere i praksis må det installeres slike ladepunkter. Varmtvannsberederene kan ansees som en eksisterende kapasitet, ettersom lite installering av nye komponenter kreves for å utnytte kapasiteten. Implementering av denne kapasiteten kan forekomme relativt raskt, kun begrenset av laststyringssystemer.

Slike styringssystemer er avhengige av styringsalgoritmer, som er et sentralt aspekt av denne oppgavens problemstilling. For at varmtvannsberedere skal utnyttes som fleksibilitetsressurser er det nødvendig å vurdere hvor mye elektrisk effekt som kan flyttes til ønskelige tidspunkter. På et så travelt og viktig næringsanlegg som Gardermoen er det viktig at dette ikke påvirker den daglige driften på en negativ måte. Dette kan potensielt resultere i tap av komfort for både reisende og ansatte. Det er mange bruksområder som krever varmtvann, som for eksempel renhold og restauranter. Kartlegging av forbruksmønstre av varmtvann vil være nødvendig for å bestemme

lagringskapasiteten berederne kan tilby. Dette vil være essensielt for utvikling av styringsalgoritmene. En simulering av hvordan disse algoritmene ville fungert på historiske data kan gi innsikt i lønnsomheten til en eventuell implementering.

### 1.3 Problemstilling og forskningsspørsmål

Sikker operasjonell drift av varmtvannsberedere krever en vurdering av hva som er en forsvarlig mengde varmtvann som kan tappes uten umiddelbar påfølgende oppvarming. Vurderingen vil bestemme hvor lenge de elektriske lastene tilknyttet varmtvannsberederene kan forbli avskrudd. Estimering av denne tiden vil være relevant for å vurdere potensialet lagringskapasiteten kan tilby i ulike fleksibilitetsperspektiv. Oppgaven vil hovedsakelig vurdere funnene i et implisitt perspektiv, siden dette kan implementeres enklere. Dette vil innebære å direkte vurdere endret kostand ved lastflytting til og fra ulike tidspunkt. Resultatene kan også gi innsikt i hvordan berederteknologi kan benyttes i et eksplisitt perspektiv, på en mer generell måte. Målet med oppgaven er dermed å utvikle og simulere styringsalgoritmer for lastflytting av tilgjengelig kapasitet tilknyttet varmtvannsberedere, basert på begrensninger til teknologien og ønsket formål. I den sammenheng formuleres følgende forskningsspørsmål basert på døgnvariasjon:

1. Til hvilken grad kan elektrisk forbruk tilknyttet varmtvannsberedere flyttes til timene med minst totalt strømforbruk på Gardermoen?
2. Bør det heller prioriteres at dette forbruket alltid har mulighet til å flyttes vekk fra timene med totalforbrukstopper?

For å besvare forskningsspørsmålene over må det forekomme en estimering av varmtvannsforbruk. Dette er essensielt, ettersom dette forbruket vil danne rammebetingelsene for lastflyttingspotensialet. Denne estimeringen vil deretter utnyttes for å teste to styringsalgoritmer basert på ønsket formål i henhold til forskningsspørsmålene. Disse algoritmene må sørge for at det ikke forekommer tap av komfort. De ulike lastflyttingene må ikke resultere i at det blir tomt for varmtvann. Forsvarlig mengde varmtvannsforbruk uten påfølgende oppvarming bestemmes ved å sette en grense på hvor mye varmtvann det er ønskelig å beholde i tankene til enhver tid.

### 1.4 Avgrensninger

Simulering og utvikling av lastflyttingsalgoritmer baseres på målinger av et spesifikt beredersystem på Gardermoen. Dette er et av totalt fem systemer, som hver betjener forskjellige deler av flyplassen. Målingene av systemet er timeeffekter [kWh/h] for elektrisk forbruk. For å bestemme total tilgjengelig kapasitet vurderes lastflytting opp mot varmtvannsforbruk, som innebærer flere grove estimeringer og antagelser. Varmtvannsforbruk og totalt elektrisk forbruk av alle beredersystemene er dermed ikke reelle.

## Kapittel 2

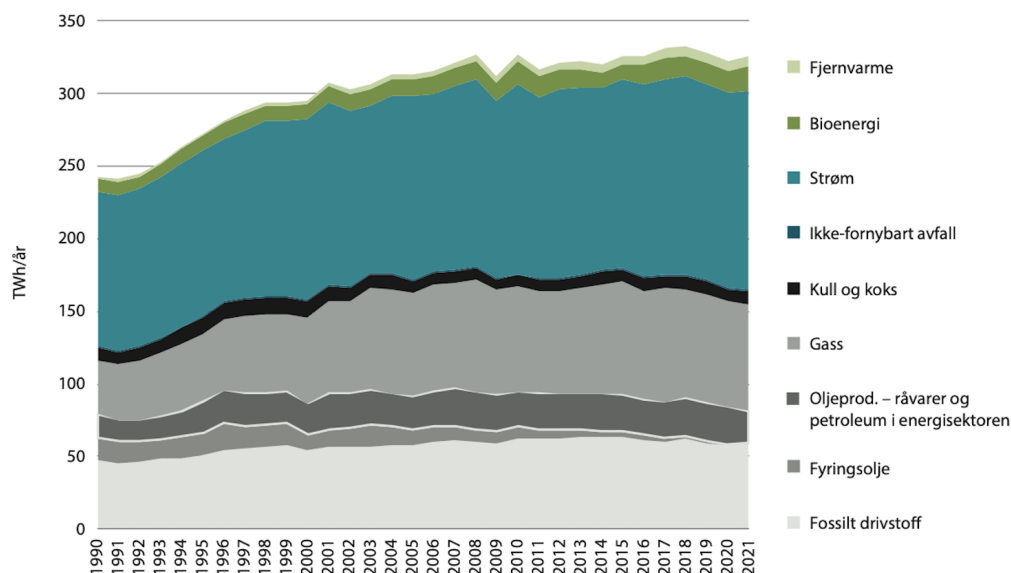
# Teori

### 2.1 Energiomstilling i det norske kraftsystemet

Energiomstillingen innebærer en rask overgang til mer miljøvennlige energikilder [4]. Dette krever omfattende endringer for kraftsystemer over hele verden. Hvert energisystem har en relativ unik oppbygging, basert på tilgjengelige ressurser og energietterspørsel [12]. Utfordringene knyttet til omstillingsprosesser har likevel generelle likhetstrekk på global basis [13]. Et økende behov for fornybar strømproduksjon fører til at ulike energiporteføljer i større grad består av uregulerbare ressurser [12]. Disse ressursene må bidra til å forsyne et økende behov for elektrisitet. Innføring av flere energikrevende teknologier og elektrifisering av ulike sektorer vil resultere i høyere etterspørsel [4]. Tilstrekkelig kapasitet av energioverføring vil være essensielt for å opprettholde forsyningsikkerheten til dette forbruket [5]. Disse utfordringene må takles av det norske kraftsystemet under energiomstillingen.

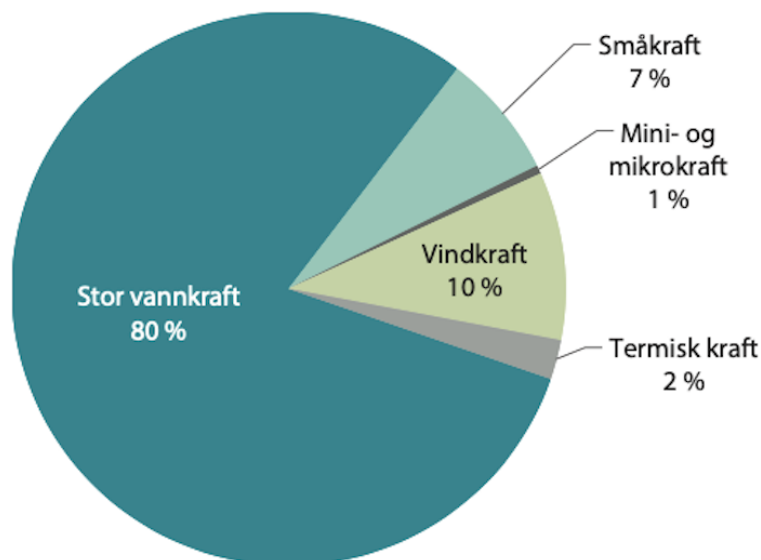
#### 2.1.1 Det norske kraftsystemet

Det norske kraftsystemet er unikt på verdensbasis [4, 12]. Utviklingen av energibrukfordelingen i Norge frem til 2021 er illustrert i figur 2.1 [4].



FIGUR 2.1: Figuren viser utviklingen av samlet energibruk i Norge fra 1990 til 2021. Grafen deles opp etter ulike forbrukskilder, hvor flere av de er fossile. Hentet fra [4].

Figur 2.1 er basert på data fra Statistisk sentralbyrå. Figuren illustrerer strøm som den største energibæreren i Norge [4]. Fossile brennstoff som en samlet kategori er i realiteten større. Av energibruken på 326 TWh i 2021 stod elektrisitet for 138 TWh, mens fossile kilder stod samlet for 165 TWh [4]. Bruk av fossile energikilder er i stor grad knyttet til norsk sokkelvirksomhet. På fastlandet benyttes fossile energiprodukter primært av transportsektoren og industri [4]. En svært liten andel av fossile brennstoffer forbrukes til strømproduksjon. Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) fremstiller fordelingen av elektriske produksjonskilder i et normalår som anvist i figur 2.2 [4].



FIGUR 2.2: Figuren viser andelen av forbruksmetoder for norsk strømproduksjon i et normalår. Produsert av NVE, hentet fra [4].

Figuren er en effektiv illustrering av hvor avhengig det norske kraftsystemet er av vannkraftressurser. Norge har en svært fordelaktig geografisk oppbygging for vesentlig vannkraftutnyttelse [14]. I et normalår er forventet produksjonskapasitet fra vannkraft omtrent 157 TWh [4]. Disse ressursene har blitt bygget opp over 100 år [14]. Primært utføres vannkraftproduksjonen i Norge av storskala kraftverk som leverer over 10 MW [4]. Vannkraft kan være både regulerbart og uregulerbart. Regulerbare kraftverk består av vannmagasiner som er kunstige eller naturlige innsjøer [4]. Estimert lagringskapasitet i Norges vannmagasiner er 87,3 TWh [4]. Elvekraftverk er mindre regulerbare, ettersom de produserer etter tilsiget. Mangel på lagringskapasitet gjør disse kraftverkene uregulerbare og avhengig av værmønstre.

Vind- og solenergi utgjør en mindre andel av den norske energiporteføljen. Disse kildene til strømproduksjon er svært værbaserte [4]. Figur 2.2 viser at vindkraft utgjør majoriteten av resterende produksjon etter vannkraften. I løpet av et normalår står primært landbasert vindkraft for omtrent 10 % av produksjonen [4]. En vesentlig mindre andel er på nåværende tidspunkt etablert til havs. Installert solenergi står i dag for en liten andel av norsk strømproduksjon. Estimert årlig kapasitet fra solkraft er omtrent 0,15 TWh [4]. På grunn av begge disse teknologienes væravhengighet kan årlig produksjonskapasitet variere med opptil 15 % [4].

Den norske porteføljen av strømproduksjon består allerede primært av fornybare kilder [4]. Den

europiske porteføljen er til sammenlikning mer avhengig av fossile kilder for strømproduksjon [15]. Energisystemene på kontinentet er svært avhengige av gass [15]. Andre utbredte produksjonsmetoder er kjernekraft, kullkraft og økende andeler vind- og solkraft [15]. Det norske kraftsystemet er strekt tilknyttet det europeiske, som ofte kalles verdens største maskin [4]. Tilknytningen kan deles opp etter kraftlinjer og undersjøiske kabler. De operasjonelle utenlandsforbindelsene i form av kraftlinjer knytter Sverige og Finland til Nord-Norge, Midt-Norge og Østlandet [4]. Dette utgjør norsk oppkobling til det nordiske kraftnett, sammen med undersjøiske HVDC-kabler fra Sørlandet til Danmark [5]. Dette transnasjonale nettet er knyttet til det europeiske av en rekke forbindelser i flere av de nordiske landene [4]. Direkte forbindelser mellom Norge og Europa består utelukkende av undersjøiske HVDC-kabler. Disse knytter Tyskland, Nederland og Storbritannia til Sørlandet [4].

Norge er internt delt opp i fem ulike kraftregioner, som anvist i figur 2.3 [4]. Figuren illustrerer i tillegg utenlandsforbindelsene nevnt i det foregående avsnittet.



FIGUR 2.3: Figuren illustrerer oppdelingen av Norge i kraftregioner, med tilhørende utenlandsforbindelser. NO1, NO2, NO3, NO4 og NO5 representerer henholdsvis Østlandet, Sørlandet med deler av Vestlandet, Midt-Norge, Nord-Norge og resterende andel av Vestlandet. Produsert av NVE og Energikommisjonen, hentet fra [4].

Kraftregionene er tilnærmet oppdelt etter de ulike landsdelene i Norge. Hver av regionene fungerer som egne budområder [16]. Dette betyr at strømprisen er forskjellig på tvers av disse områdene. Regionene er sammenkoblet av sentralnettet. Denne delen av strømmettet styres av Statnett,

som er systemansvarlig (TSO - Transmission System Operator) i Norge [4, 5, 17]. Sentralnettet er tilkoblet de større kraftverkene [4, 5, 18, 19]. Strøm blir levert til ulike forbrukere gjennom regionalnettet eller distribusjonsnettet [18, 19]. Nettselskapene er de ansvarlige systemoperatørene (DSO - Distribution System Operator) for både regional- og distribusjonsnettet [18, 19, 5, 4]. Elvia er nettselskapet som har ansvaret for Norges største nettområde fordelt utover Innlandet, Viken og Oslo [20]. Dette utgjør en stor del av region NO1, anvist i figur 2.3. Ressursene som analyseres i denne oppgaven er tilknyttet Oslo Lufthavn Gardermoen, som befinner seg innenfor Elvias nettområde.

### 2.1.2 utfordringer tilknyttet omstillingen

Norge står ovenfor mange av de samme utfordringene som andre land gjør når det kommer til energiomstilling [4]. Et betydelig unntak er at det ikke er nødvendig å bytte ut eksisterende strømproduksjon. Dette gir Norge et vesentlig forsprang i omstillingen. Større behov for elektrisitet i fremtiden gjør at ny produksjonskapasitet likevel må bygges ut [4]. Anstrengt nettkapasitet en sentral barriere som må overkommes for å tilrettelegge for omstillingen [5].

Figur .. viser at en stor del av norsk energibruk fortsatt er basert på fossile kilder [4]. Sektorene som er avhengige av dette forbruket på fastlandet er hovedsakelig industri og transport. Disse sektorene er allerede i gang med elektrifiseringsprosesser [7, 4]. Norge er verdensledende på andelen elektriske kjøretøy i personbilflåten. Tyngre transportmetoder, som større maritime fartøy og lastebiler har en omfattende elektrifiseringsprosess foran seg [4]. Kraftbehovet for slike teknologier er høyere enn personbiler, som gjør elektrifisering mer krevende [7]. Det samme gjelder for kraftintensive norske industrier. Kjemisk industri, metallutvinning og trefordeling er eksempler på norske næringer med høyt forbruk og elektrifiseringsbehov [4].

For å opprettholde norsk kraftbalanse i et energisystem med økt strømetterspørsel må produksjonskapasiteten utvides [4]. Siden vannkraften har vært utviklet over en veldig lang periode er potensialet for øvrig utbygging svært begrenset [4]. Lav samfunnsaksept har bremsert utviklingen av vindkraft på land [4]. Vindkraft til havs har dermed det største potensialet for å øke produksjonskapasiteten. Nåværende regjering har et mål om å innføre en normalårsproduksjon på omtrent 120 TWh innen 2040 [4]. Dette er en kapasitet som er sammenlignbar med vannkraften. Solkraft har også et betydelig potensial. Potensialet for bakkemonterte installasjoner er rundt 130 TWh, men står delvis ovenfor de samme samfunnsmessige barrierene som landbasert vind [4]. Tak- og fasademonterte installasjoner har et lavere potensial. Potensiell kapasitet antas å være omtrent 65 TWh, med betydelig høyere samfunnsaksept [4].

Innføring av vind- og solkapasitet av størrelsesordenene nevnt i foregående avsnitt vil ha store konsekvenser for strømmettet [4, 5]. Flere uregulerbare energikilder basert på værmønstre minker fleksibiliteten i det norske kraftsystemet. Nye teknologier og tankemåter må utnyttes for å håndtere disse ressursene [21, 4]. Den norske overføringskapasiteten er allerede svært anstrengt. Dette er i særdeles stor grad tilfellet for koblinger på tvers av kraftregionene. Slike flaskehalsar var grunnlaget for de store prisforskjellene i Norge under energikrisen i 2022 [4]. Flaskehalsar eksisterer også på mer lokale nivå i distribusjonsnettet. Disse kan føre til overbelastning og spenningsproblemer [22]. På lang sikt vil det være nødvendig med en omfattende utbygging av strømmettet for håndtering av forventet produksjon- og forbruksøkning [5]. Både Statnett og Elvia har både igangsatt prosjekter og budsjettet investeringer for økning av overføringskapasiteten som skal ferdigstilles i løpet av de neste tiårene [5, 4, 23].

Større utbygninger av nettkapasitet er uunngåelig i et lengre perspektiv [5]. Dette vil koste både tid og penger. For at energiomstillingen skal gjennomføres på en effektiv samfunnsøkonomisk måte må overflødige investeringer unngås [21, 5, 4, 6]. I tillegg vil det være nødvendig å innføre midlertidige løsninger for å avlaste de mest kritiske punktene i strømmettet [7, 22]. Utviklingen av produksjon- og forbrukskapasitet beveger seg raskere enn utbyggingen av ny nettkapasitet [5, 4]. Ulike alternativer som kan bidra til å løse disse problemene vil øke fleksibiliteten til det norske kraftsystemet.

## 2.2 Fleksibilitet

Konseptet fleksibilitet har fått økt betydning i energiomstillingen. Begrepet bunner i at mindre justeringer må gjøres for å håndtere svingninger i forholdet mellom produksjon og forbruk [24]. Regulerbar produksjon i termiske kraftverk eller vannkraft har tradisjonelt sett stått for denne håndteringen, ettersom de er fleksible produksjonsmetoder. I energisystemer med høyere penetrering av stivere produksjonsmetoder og mer komplisert forbruk er det nødvendig med en mer omfattende beskrivelse av begrepet. Forskningscenteret for intelligent elektrisitetsdistribusjon (CI-NEDLI) har formulert en utvidet definisjon av konseptet [6]:

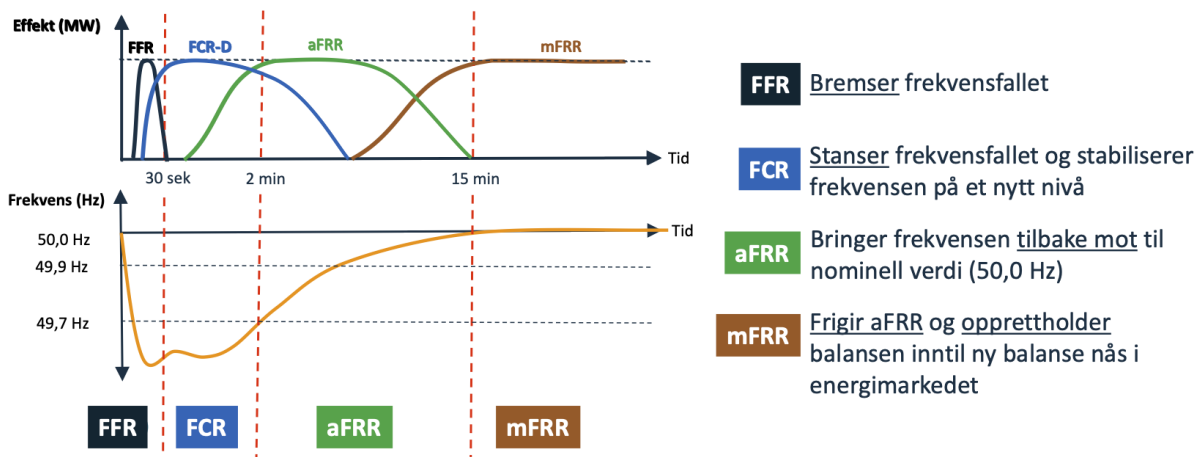
«Fleksibilitet er evne og vilje til å modifisere produksjons- og/eller forbruksmønster, på et individuelt eller aggregert nivå, ofte som en reaksjon på et eksternt signal, for å kunne tilby en tjeneste til kraftsystemet eller opprettholde stabil nettdrift.»

Fleksibilitet anses ofte som et alternativ til nettutbygging. For visse utfordringer kan dette være tilfellet, men det er ikke en endelig løsning for å etablere tilstrekkelig overføringskapasitet [6]. Spesielt for kortvarige overbelastninger vil tilgang på fleksibilitetsressurser være mer attraktivt enn mer kostbar nettutbygging [5]. Slik utnyttelse kan bidra til å håndtere flaskehalsen som forekommer på daglig basis, ved å redusere topplast og kutte effekttopper. Flaskehalsen som forekommer over lengre tidsperspektiv kan kreve vesentlige kutt i forbruket. For slike tilfeller vil det være fordelaktig med større nettinvesteringer [5]. Fleksibilitet bør derfor ikke anses som løsningen på problemene knyttet til energiomstilling, men som et sentralt verktøy. Behovet for kartlegging av hvor fleksibilitet bør anvendes istedenfor nettutbygging er dermed stort.

### 2.2.1 Reserver

Flaskehalsen og ubalansen kan forekomme over tidsrom med varierende lengder. Ulike fleksibilitetsressurser kan håndtere disse tidsrommene avhengig av ressursens kapasiteter og begrensninger. Fleksibilitetstjenester knyttet til ubalanse kalles reserver [5, 21]. Reserver benyttes for å balansere forbruk og produksjon så nettfrekvensen på 50 Hz opprettholdes [17]. Overproduksjon fører til høyere frekvens og underproduksjon til lavere frekvens. For å jevne ut svingningene må systemansvarlig (TSO) sørge for tilstrekkelige reserver i kraftnettet [25]. Reserver kan fordeles i fire kategorier, basert på tidsrom [21]. Disse er illustrert i figur 2.4.





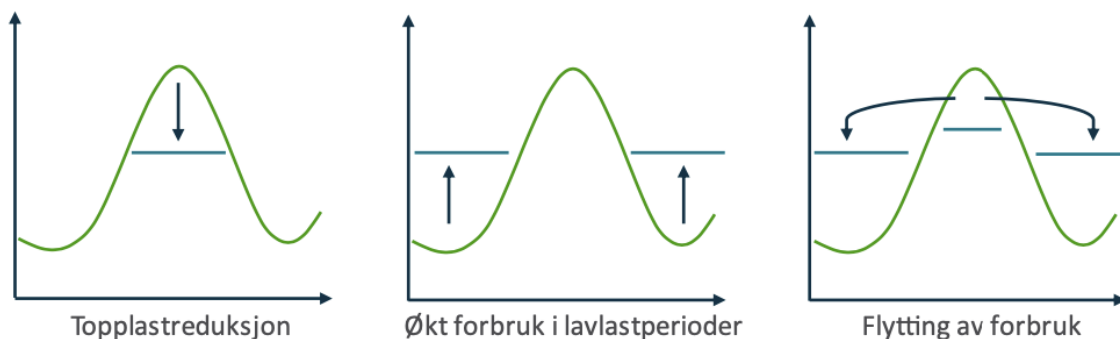
FIGUR 2.4: Figuren viser operasjonstid og aktiveringsfrekvens for reserver i strømnettet ved større ubalanser. Produsert av Statnett, hentet fra [21]

Figur 2.4 viser hvordan de fire hovedkategoriene av reserver aktiveres ved en større ubalanse i nettet. Raske frekvensreserver (Fast Frequency Reserves - FFR) benyttes i de aller korteste tidsrommene for unngå frekvens under 49,0 Hz [25]. Disse reservene aktiveres etter en frekvensendring på 0,3 Hz [17]. Aktiveringstiden for disse ressursene er på 0,7 til 1,3 sekunder og operasjonstid er opptil 30 sekunder [25]. Deretter tar primærreservene (Frequency Containment Reserve - FCR) over for å holde frekvensen stabil. Under større ubalanser benyttes en underkategori av FCR, kalt driftsforstyrrelsesreserver (FCR-D) [17]. Sekundærreserver (automatic Frequency Restoration Reserves - aFRR) sørger for å oppnå nominell frekvens og aktiveres automatisk. Til ny balanse oppnås i kraftmarkedet vil tertiærreservene (manual Frequency Restoration Reserves – mFRR) ta over for de sekundære [17]. Disse aktiveres manuelt for å justeres etter hver spesifikke ubalanse. Under normal drift vil det forkomme mindre ubalanser, innenfor normalbåndet på  $50 \pm 0,1$  Hz [17]. Disse svingingene forkommer mer langsomt enn større ubalanser og betjenes av aFRR, mFRR og FCR-N. Normaldriftsreserver (FCR-N) er en underkategori av FCR [25].

Reserver er ikke den eneste nødvendige formen for fleksibilitet under energiomstilling av det norske kraftsystemet. Ytterligere tjenester er primært knyttet til energilagring. Energisystemer som er mer avhengig av uregulerbar kraft som vind og sol, må produsert elektrisitet lagres til senere forbrukstidspunkter [4, 5]. I en slik sammenheng må lagret energi tilbakeføres i form av elektrisk effekt til strømnettet. Energilagring må etterkomme svært store variasjoner av tidsrom. Solkraft-avhengige energisystemer vil eksempelvis kreve mye døgnvarierende lagringskapasitet [4]. For vindavhengige systemer kan lagringskapasiteten måtte strekke seg til uker eller måneder. Værbaert energi må i de lengste tilfellene lagres på sesongbasis. Det kan for eksempel bli nødvendig å spare solenergi som er rikelig på sommeren helt til vinterhalvåret. Alternative energilagring-metoder, som ikke har evnen til å levere tilbake strøm på nettet, inkluderes ofte under konseptet laststyring. Laststyring kan være svært fordelaktig for å håndtere flaskehalser knyttet til begrenset nettkapasitet [5]. I tillegg åpner det for å utnytte mer av forbrukeres tilgjengelige fleksibilitetskapasiteter.

### 2.2.2 Forbrukerfleksibilitet

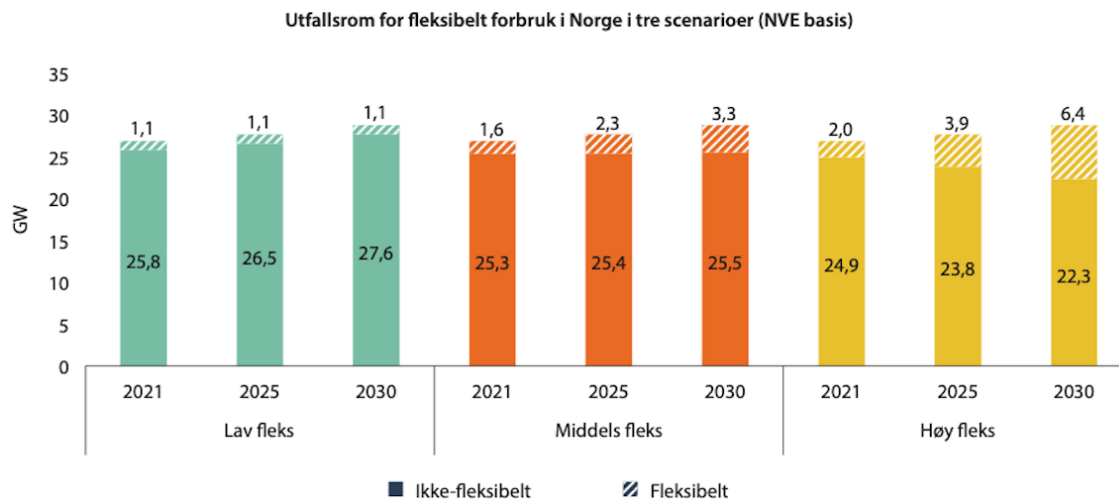
Norske fleksibilitetstjenster blir primært levert av kraftprodusenter fremfor forbrukere. På grunn av stor tilgang på regulerbar vannkraft har Norge et av de mest fleksible energisystemene i verden [5]. Det er også aktører på forbrukersiden som leverer slike tjenester til kraftnettet. Aktørene som idag står for forbrukerfleksibilitet i Norge er få og har stort kraftforbruk. Dette er eksempelvis veldig kraftintensiv industri. Selv om Norge har et fleksibelt energisystem, må flere muligheter implementeres [5]. I et lengre perspektiv vil økte vind og solressurser kreve mer fleksibilitetskapasitet. På kortere sikt må eksisterende fleksibilitetsressurser benyttes, primært for å håndtere flaskehalsgrunnet manglende nettkapasitet [5]. Figur 2.5 illustrerer hvordan ulike forbruksstrategier for laststyring utjevner effekttopper [21].



FIGUR 2.5: Figuren viser tre ulike strategier for utjevning av effekttopper. Denne oppgaven omhandler lastflytting, representert til høyre i figuren. Produsert av Statnett, hentet fra [21].

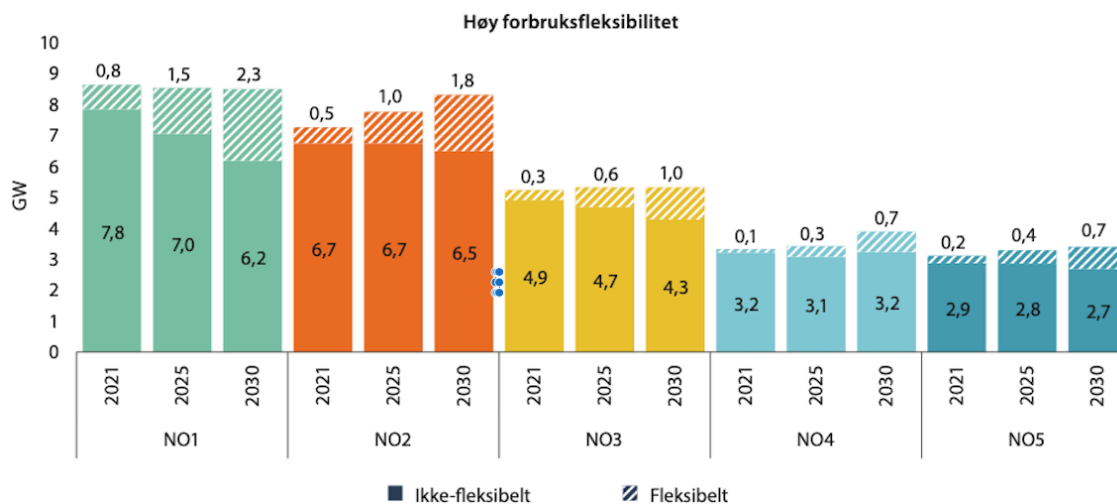
De to strategiene til venstre i figur 2.5 benyttes primært for nytt forbruk som skal introduseres i strømmettet [21]. Strategien til høyre i figuren illustrerer flytting av eksisterende forbruk, ofte referert til som lastflytting. Lastflytting er et svært nyttig og billig alternativ for nettutbygging. Strømforbruk som kan kuttes til strategiske tidspunkter, uten negative konsekvenser for forbrukere, må utnyttes mer i nær fremtid. Det fins flere alternativer av strømforbruk som har evnen til å flyttes i tid, ofte tilknyttet elektriske kjøretøy eller oppvarming i bygg [4, 21]. Flyttbare laster kan i høy grad bidra til å øke fleksibilitet i kraftsystemet med strategisk styring. Daglige effekttopper oppstår på morgenen, mellom klokken 7 og 11, og på kvelden, mellom klokken 17 og 19 [4]. I et anstrengt strømmnett kan dette føre til at visse kraftlinjer overgår sikkerhetsmarginer for overføring av elektrisk effekt [5]. Daglige effekttopper varer kun i få timer. Lastflytting kan frigjøre nettet for forbruk som tradisjonelt har vært aktivt under disse timene. Nettutbygging kan spares eller utsettes ved å avlaste flaskehals i nettet om tilstrekkelig kapasitet frigjøres [5, 21].

Mindre laster, ofte tilknyttet husholdninger eller næringsbygg, utgjør en stor andel av flyttbare ressurser i strømmettet [21]. En sentral utfordring for å utnytte lastflytting som en effektiv strategi er å aggregere disse til et betydningsfullt kapasitetsnivå [5]. I tillegg er det uvisst akkurat hvor mye kapasitet ressursene er i stand til å levere. Hvor stor andel ressursene det reelt er mulig å utnytte er dermed usikkert. NVE har i den sammenheng utviklet tre utfallsrom for potensiell topplastreduksjon med ulike grader av forbrukerfleksibilitet. Figur 2.6 illustrerer utfallsrommene NVE estimerer for 2021, 2025 og 3030 [5].



FIGUR 2.6: Figuren viser tre ulike utfallsrom med økende grad forbrukerflexibilitet. Stripede andeler av grafene representerer potensiell topplastreduksjon ved å benytte fleksible laster. Produsert av NVE, hentet fra [5].

Utfallsrommene presentert i figur 2.6 fordeler seg ulik i de forskjellige kraftregionene vist i figur 2.3. Fordelingen NVE estimerer for utfallsrommet med høy fleksibilitet detaljeres i figur 2.7.



FIGUR 2.7: Figuren viser hvordan utfallsrommet for høy forbruker flexibilitet fra figur 2.6 fordeles i kraftregionene. Stripede andeler av grafene representerer potensiell topplastreduksjon ved å benytte fleksible laster. Produsert av NVE, hentet fra [5].

Som figuren viser har NO1 et stort fleksibilitetspotensial i forbruket. Ressursene som vurderes i denne oppgaven befinner seg godt innenfor dette området, og antas å være en del av denne kapasiteten. Disse ressursene er blant mange potensialer av mindre skala som er distribuert i kraftnettet [7, 5, 4]. Aggregert danner fleksibilitetskapasiteter som dette en stor andel av estimeringene i figurene over [21]. For tilstrekkelig aggregering av disse ressursene må det være incentiv for forbrukere å implementere lastflytting som en forbruksstrategi. Incentivene kan deles inn i implisitte og eksplisitte måter å sørge for at fleksibilitetressurser utnyttes.

### 2.2.3 Implisitt fleksibilitet

Implisitt fleksibilitet er et uttrykk som benyttes om fleksibilitet som oppstår av aktive aktører i nettet [5]. Innføring av nye teknologier som avanserte strømmålere og styringssystemer tillater flere forbrukere mer kontroll. I et moderne energisystem har forbrukere muligheten til å være aktive aktører i kraftsystemet [5]. Aktører som har tilgang på fleksible kapasiteter vil bruke disse for å maksimere lønnsomheten av de. Lønnsomheten kommer fra å utnytte markedssituasjoner eller betalingsmodeller for strømforbruk [21]. Under kostbare forhold betyr dette å enten spare forbruk eller eventuelt benytte egenprodusert elektrisk effekt. Egenprodusert eller lagret elektrisitet kan også selges inn på nettet under disse forholdene. Ved mindre kostbare tider kan flyttbare laster benyttes eller energilagre kan opplades. Forbrukere har med tilgjengelige verktøy og ressurser har mulighet til å forme sitt eget forbruksmønster. Implisitt fleksibilitet oppstår av at aktive forbrukere responderer på prissignaler [21].

Kraftproduktet spotpris på timesbasis fungerer som et aktivt prissignal for forbrukere [4, 5]. Spotprisen er basert på forbruket til sluttbruker i øre [øre/kWh]. Denne prisen endrer seg for hver time, basert på kraftmarkedet. Kraftmarkedet kan deles i to hovedkomponenter [21]. Engrosmarkedet omsetter store kraftvolum mellom større produsenter, forbrukere, meglere og leverandører. Prisene i engrosmarkedet settes ved hjelp av spotmarkedet dagen før forbruk og intradagmarkedet samme dag som forbruket. I Norge drives disse markedsplassene av Nordpool og EPEX [21]. Mesteparten av kraften som selges på engrosmarkedet ender opp hos kraftleverandører. I sluttbrukermarkedet opererer majoriteten av strømforbrukerne, som selv velger hvilken kraftleverandør de ønsker å benytte seg av [21]. Prisene fra kraftleverandørene i sluttbrukermarkedet, basert på prisene fra engrosmarkedet, danner spotprisen for forbrukere. Disse prisene kan variere svært mye fra time til time. Under tidsperioden denne oppgaven er basert på, var den største daglige spotprisdifferansen på 2,2 NOK/kWh. Vesentlige kostnader kan kuttes dersom forbruker benytter seg av tilgjengelige fleksibilitetskapasiteter med timesbasert spotpris. Eventuelt kan forbruker binde seg til en spotpris basert på gjennomsnittspris over en måned. Dette vil minke incentivet for forbrukerfleksibilitet, som kan ha negativ innvirkning [21].

En månedsbasert kostnad som kan fungere som et incentiv til økt forbrukerfleksibilitet, er effektleddet i nettleiemodellen. Elvia er nettansvarlig for store deler av NO1 [20]. Siden denne oppgaven omhandler forbruk på Gardermoen, viser tabell 2.1 nettleiemodellen fra Elvia for kunder med forbruk over 100 000 kWh årlig [26].

TABELL 2.1: Elvias nettleiemodell for bedriftskunder med årlig forbruk over 100 000 kWh [26] For Gardermoen gjelder prisene under Fellesmåling.

Effekttariff (timesmålte anlegg)	Lavspenning	Fellesmåling	Høyspenning
Fastledd	500 kr/mnd	1225 kr/mnd	900 kr/mnd
Effektledd <i>sommer</i>	36 kr/kW/mnd	36 kr/kW/mnd	29 kr/kW/mnd
Effektledd <i>vinter</i>	86 kr/kW/mnd	86 kr/kW/mnd	68 kr/kW/mnd
Energiledd <i>lik hele året</i>	5 øre/kWh	5 øre/kWh	3 øre/kWh
Reaktivt effekt <i>sommer</i>	16 kr/kVAr/mnd	16 kr/kVAr/mnd	13 kr/kVAr/mnd
Reaktivt effekt <i>vinter</i>	37 kr/kVAr/mnd	37 kr/kVAr/mnd	30 kr/kVAr/mnd

Tabellen viser relevante opplysningene for nettleie for lastene som vurderes i denne oppgaven. Kostnadene i tabellen kommer i tillegg til strømprisen [26]. Effektleddet, fremhevet i grått, er den mest relevante komponenten. Prisene er basert på topp effekt for hver måned. Effekttopper måles i timeeffekt. Antall kWh fra timen med høyest forbruk i løpet av måneden multipliseres med prisen oppgitt i modellen [26]. Prisene er forskjellige på sommerhalvåret og vinterhalvåret. Å kutte effekttoppene, for eksempel gjennom lastflytting, kan være svært lønnsomt for forbrukere av denne størrelsen [21]. Effektleddet er et effektivt incentiv for forbrukere å minimere effekttopper som kan bidra til håndtering av flaskehalsen i kraftnettet [21].

#### 2.2.4 Eksplisitt fleksibilitet

Mange distribuerte aktører som operer i kraftnettet med ulike hensyn og behov øker kompleksiteten til systemet. Implisitt fleksibilitet kan sørge for at fleksibilitetsressurser utnyttes, men innebærer at systemansvarlig overgir deler av kontrollen til forbrukere [5]. I et større perspektiv er det nødvendig for systemansvarlig å kontrollere tilstrekkelige fleksibilitetsressurser for å opprettholde balanse- og forsyningsikkerheten [5]. Tilstrekkelige incentiver må eksistere for at aktører skal overgi kontrollen av ressursene sine.

Eksplisitt fleksibilitet er et uttrykk som benyttes for fleksibilitet som styres av systemoperatørene [5]. Basert på kapasiteten til de ledige ressursene kan aktører selge denne inn på energimarkedene eller å yte en spesifikk tjeneste for systemoperatørene [5]. For mange småskala ressurser betyr det at aggregering av kapasitet blir mer avgjørende. En annen sentral barriere for å kunne benytte fleksibilitet i dette perspektivet er å utvikle effektive metoder for systemoperatører å kunne betjene ressursene [27]. Teknisk sett vil dette kreve en form for toveis kommunikasjon mellom systemoperatørene og tilgjengelige ressurser [27]. Fordelingen av disse ressursene bestemmes av ulike markedsmodeller.

Reservemarkedene er en eksisterende metode for eksplisitt fleksibilitet [5]. For hver av de fire reservekategoriene finnes det ulike markeder [17]. Aktører som ønsker å delta i reservemarkedene får betalt for å justere forbruk eller produksjon etter behov [27]. Det stilles spesifikke krav etter hvilke av de ulike reservekategoriene. For at en aktør skal operere i reservemarkedene må det vurderes hvilke av kategoriene de har mulighet til å delta i. Kravene er relatert til automasjon,

responstid og varighet. Som systemansvarlig, må Statnett sikre reserver gjennom kapasitetsmarkeder, som enten aktiveres automatisk eller gjennom aktiveringsmarkeder [17].

Kapasitetmarkedene omfatter alle fire hovedkategoriene av reserver. Tilgjengelige ressurser kan gjennom kapasitetsmarkedene sikre levering av nødvendige netjtjenester [17]. Tabell 2.2 viser en enkel oversikt over hvordan de ulike markedene for reserver fungerer.

TABELL 2.2: Tabellen detaljerer de ulike reservemarkedene. Tabeller forteller minste tillatte effektvolum, innkjøpstidspunkt av kapasitet, prisgrunnlag og andre krav.

Marked	Min. volum [MW]	Innkjøps-tidspunkt	Bud/pris per	Krav
FFR	0,2	Sesong (sommer)	Reguleringsretning, Budstone, Time	Automatisk respons ved frekvensfall på 0,3/0,4/0,5 Hz
FCR-D	1	1 og 2 dager før driftstimen	Reguleringsretning, Budstone, Time	Automatisk respons ved frekvens utenfor normalbåndet
FCR-N	1	1 og 2 dager før driftstimen	Budstone, Time	Automatisk respons ved frekvens innenfor normalbåndet
aFRR	1	1 dag før driftstimen	Reguleringsretning, Budstone, Time	Automatisk respons ved frekvens utenfor normalbåndet
mFRR	1	1 dag før driftstimen	Reguleringsretning, Budstone, Time	Deltakelse i aktiveringsmarkedet EAM

Figuren viser til kravene av størrelsesordre som tillater deltagelse for hver reservekategori. Kravene for responstid, leveringstid og aktiveringskombinasjoner defineres fra bruksområdene illustrert i tabell 2.2. Kravene for å delta i aktiveringsmarkedene er enda høyere. I NO1 er minimumskravet for å delta i mFRR en kapasitet på 5 MW [17]. Volumkravene er relativt store og tillater ikke små distribuerte aktører å delta. For at systemansvarlig skal få tilgang på slike ressurser må de tilbys gjennom en aggregator [27].

En aggregator er en aktør i nettet som samler opp små distribuerte ressurser til betydningsfullt volum [27]. For slike ressurser tar aggregatoren seg av både de fysiske og økonomiske aspektene ved aggregering. Den fysiske aggregeringen skjer gjennom kommunikasjonssystemer som justerer forbruk eller produksjon [27]. Utviklingen av kommunikasjonsteknologi de siste tiårene har vært et avgjørende aspekt for å muliggjøre aggregering. For å benytte forbrukerfleksibilitet i mindre skalaer, på et aggregert nivå, må smarte styringssystemer installeres. Styringen av ulike komponenter kan med disse systemene overtas av en aggregator [27]. Dette tillater aggregatoren å by inn kapasiteten den har kontroll over på kraftmarkedene. Med dagnes løsninger må mindre aktører som ønsker å selge fleksibilitet i et eksplisitt perspektiv knytte seg til en aggregator [28]. En mer markedsorientert løsning ønskelig for at fordelingen skal forekomme på en optimal samfunnsøkonomisk måte [27].

Lokale fleksibilitetsmarkeder er et konsept under utvikling av flere systemoperatører [29]. Målet med slike markeder er å løse mindre problemer som oppstår lokalt til problemområder i nettet [27]. De fungerer ved at lokale nettselskaper definerer nødvendige tjenester for hele eller deler av

nettet de kontrollerer. Der det eksisterer spesifikke behov kan det gjøres langsiktige bilaterale avtaler gjennom auksjoner. Eventuelt kan det anskaffes langsiktig fleksibilitet via direkte bud eller gjennom aggregator. Anskaffelse av kortsiktig fleksibilitet baseres på løpende budkurver gjennom et lokalt fleksibilitetsmarked [27]. Et eksempel på et slikt marked er NODES, som er en uavhengig markeds plass [28]. I denne markedsmodellen kan det handles mellom nettselskaper og aggregatorer om fleksibilitet på størrelsesorden ned til 1 kW [30]. Systemansvarlig inkluderes i et slikt marked der det er behov for koordinering mellom ulike formål [27]. I pilotprosjektet NORFLEX har blant annet NODES deltatt for aggregere opp sine ressurser til minimum 1 MW for å delta på regulerkraftmarkedet (mFRR) [30, 29].

### 2.2.5 **Fleksibilitetsteknologier**

Fleksibilitet kan kun tilbys hvis det finnes teknologier i nettet med kapasitet som kan utnyttes i ulike fleksibilitetsperspektiv. Det finnes ikke en enkelt teknologi som har kapasitet til å dekke alle behov for fleksibilitet [24]. Forsynings- og balansesikkerhet vil i fremtiden være avhengig av en mangfoldig portefølje av fleksibilitetsressurser. Flere teknologier har muligheten til å levere fleksibilitetskapasitet definert av teknologiens iboende egenskaper [24].

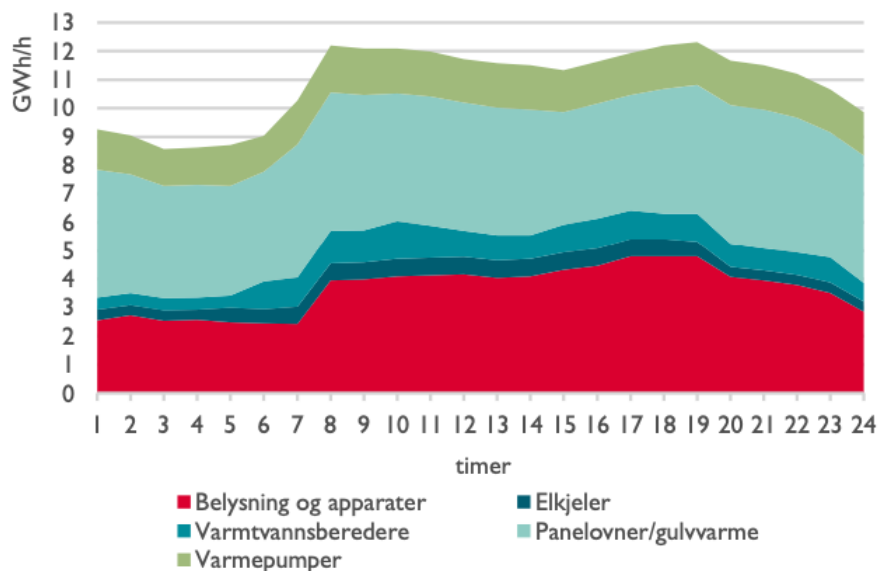
To teknologier som i høy grad utvikles og omtales som gode kandidater til fleksibilitetsutnyttelse er hydrogen og batterier [24, 4, 31]. Disse teknologiene er begge energilagingsmedier og kan levere elektrisk effekt tilbake på nettet. Hydrogenproduksjon og forbruk er en veldig aktuell kandidat for fleksibilitet i mange energisystemer [24, 31]. En vesentlig fordel med hydrogen er kjapp, fleksibel og regulerbar responstid, gjennom både produksjon via elektrolyse og forbruk via brenselcelle [24]. Hydrogen er en energibærer med lang lagringstid og flere nyttige bruksområder. Hydrogen vil være mer fordelaktig i sesonglagring av elektrisitet og tungtransport enn batterier.

Batterier har allerede blitt en svært viktig og integrert del av det norske energisystemet [4, 5, 7]. Utviklingen av batteriteknologi har akselerert de siste tiårene [32]. Dette har gjort denne teknologien mer aktuell i kraftnettsammenheng. Denne utviklingen må sees i sammenheng med den økte interessen for elektriske kjøretøy [33]. Det største omfanget av batterier i nettet er innenfor transportsektoren [21]. Batterier knyttet til kjøretøy er en eksisterende og til dels ubenyttet ressurs i nettet [7, 21]. NVE estimerer at batterikapasitet tilknyttet elbiler i Norge kan være opp imot 100 GWh i 2030 [7, 21]. Installering av toveis ladesystemer tillater slike batterier å tilbakeføre strøm på nettet [21]. Har elbiler mulighet til å levere strøm tilbake på nettet har de mulighet til å yte nettjenester. Utenom elbiler er det flere aktører som integrer batterisystemer i hjem eller næringsbygg, ofte i sammenheng med solcellekapasitet [4, 21]. Batterier egner seg svært godt i den daglige syklusen solceller baserer seg på. Et hvert energisystem som er avhengig av solkraft vil være nødt til å benytte seg av batterier [24]. Etersom batterier mister ladning over lengre perioder fungerer de best over daglige sykluser [32]. Aktiveringstiden til batterier er svært rask, som er en fordel for flere bruksområder. De regnes derfor som å være svært aktuelle som kjappe responssystemer i en kraftnettsammenheng [5, 4, 21, 7]. Flere aktører vurderer kommersielle muligheter til å utnytte batterier for nettavlastning [34]. Benyttes batterier eller hydrogen til andre formål enn å levere tilbake strøm på nettet kan begge likevel være fleksible i forbruket [21, 4].

De raskeste løsningene å implementere er de som krever svært lite til ingen installering av ny

teknologi for å utnytte eksisterende kapasitet [21]. Dette vil hovedsakelig innebære forbrukerfleksibilitet. Behovet for installering av nye teknologier som hydrogen og batterier til fleksibilitetstjenester kan minke dersom disse løsningene benyttes på en aktiv måte [21, 5]. Prinsipielt betyr dette at elektriske laster må flyttes til andre tider av døgnet. Benyttes automatiserte styringssystemer på en gjennomtenkt og velinformert måte, kan potensialet fra ulike laster frigjøres uten tap av komfort [21]. Lastflytting begrenses av de fysiske parametrene den elektriske lasten opererer under. Strømtilførsel kreves i ulike volum etter ulike tidsrom basert på behov, relaterte teknologier eller infrastruktur. For å unngå negative konsekvenser ved forbrukskutt må laster som har mulighet til å flyttes identifiseres.

Teknologier med gode lastflyttingsegenskaper vil ofte innbære en kapasitet for lagring av energi i forskjellige former. Elektriske laster knyttet til oppvarming i bygg har ofte termisk energilagringsskapasitet [21]. Disse teknologiene er samlet sett definert som varmelaster [7]. Termisk energi er av lav kvalitet i forhold til strøm, som gjør at termisk energilagring ikke kan levere tilbake strøm på nettet. Likevel kan den lagres på alternative måter. For eksempel kan økt isolering i husstander føre til å varme som produserer på natta kan bli i boligene utover dagen [7, 21]. Varmelaster utgjør mellom 25 og 30 % av den norske makslasten. Varmelaster utgjør mesteparten av lastene NVE definerer som realistisk fleksibilitetspotensial. Av makslast er dette omtrent 4 til 11 % for husholdninger, og 3 til 7 % av næringsbygg [7]. Fordelingen av de ulike varmlastene er illustrert i figur 2.8, sammenliknet med annet forbruk.



FIGUR 2.8: Figuren illustrerer fordelingen av ulike varmelaster i husholdninger og næringsbygg på en typisk vinterdag. Hentet fra [7].

Av varmelastene er det ulike muligheter for lastflytting. En av teknologiene som egner seg spesielt godt til å benyttes i et lastflyttingsperspektiv er varmtvannsberederen [21, 35, 10].



## 2.3 Berederteknologi

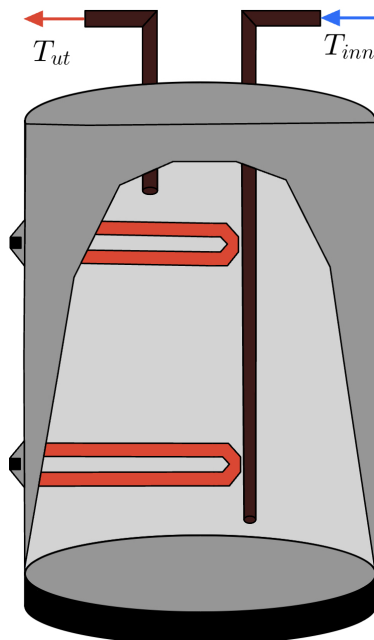
En varmtvannsbereder har kapasitet til å lagre energi, ettersom den tilførte energien i form elektrisk effekt til oppvarming resulterer i forbruk ved senere tidspunkter [21, 10]. Forbruket av energien forekommer i form av varmtvann til for eksempel dusj, oppvaskmaskiner og tappevann. Ofte vil varmtvannsmassen ved full tank være tilstrekkelig for bruksområdene berederen har over en lengre tidsperiode. På grunn av syklusen til varmtvannsforbruk kan den elektriske lasten flyttes til andre tidspunkt [10]. God isolering av tanken gjør at vannet beholder mesteparten av den tilførte varmeenergien utover dagen [36]. Varmtvannsberedere anses som en god kandidat til å fungere som et fleksibilitetsverktøy på daglig basis, på lik linje med et batteri [35].

En elektrisk varmtvannsbereder har flere fellestrekk med et batteri. De lades begge opp av en elektrisk effekt, som begrenser hvor fort de opplades. De kan kobles sammen i serie og parallell for forskjellige formål [37]. Over tid vil begge tape energi hvis de står fulladet, og egner seg derfor ikke til energilagring over lengre tidsperioder [38, 32]. En fordel beredere har over batterier er at de tåler flere ladingssykluser [35]. I likhet med batterier vil varmtvannsberedere også tømmes avhengig av levert effekt. Den leverte effekten er annerledes i en bereder i forhold til et batteri, ettersom de ikke kan levere tilbake tilført strøm [37]. I stedet for elektrisk effekt, leverer en bereder effekt i form av varmtvann per sekund. Dette kan defineres som er massestrømmen ut av tanken  $\dot{m}_{\text{vann}}$ . For varmtvannsberedere kan det være krevende å skille mellom effekt og energi. Dette kommer av definisjoner av massestrømmer og virkemåten av varmtvannsberedere.

### 2.3.1 Virkemåte

Varmtvannsberedere finnes i mange forskjellige varianter. De kan for eksempel varmes med gass, solenergi eller fjernvarme, i tillegg til elektrisitet [35, 10, 37]. Beredere produseres i mangfoldige størrelser. Valg av variant er avhengig av hva varmtvannet skal brukes til, og hvor mye som trengs i løpet av en bestemt periode [39]. Varmtvannsberedere baserer seg på å bruke en bestemt merkeeffekt  $P_{el}$  til å varme vann over tid [37]. En slik bereder består av en tank og minst ett varmeelement. Det finnes også beredere uten varmtvannstanker [40]. De fungerer ved å varme opp vannet mens det forbrukes, og varmer derfor kun den nødvendige mengden vann. Ulempen med slike beredere er at de opererer med svært høye effekter for å oppnå nødvendig temperatur [41]. De vil heller ikke ha mulighet til å lagre energi. I Norge er det definitivt varmtvannsberedere med tanker og elektriske varmeelementer som er mest utbredt [42, 35].

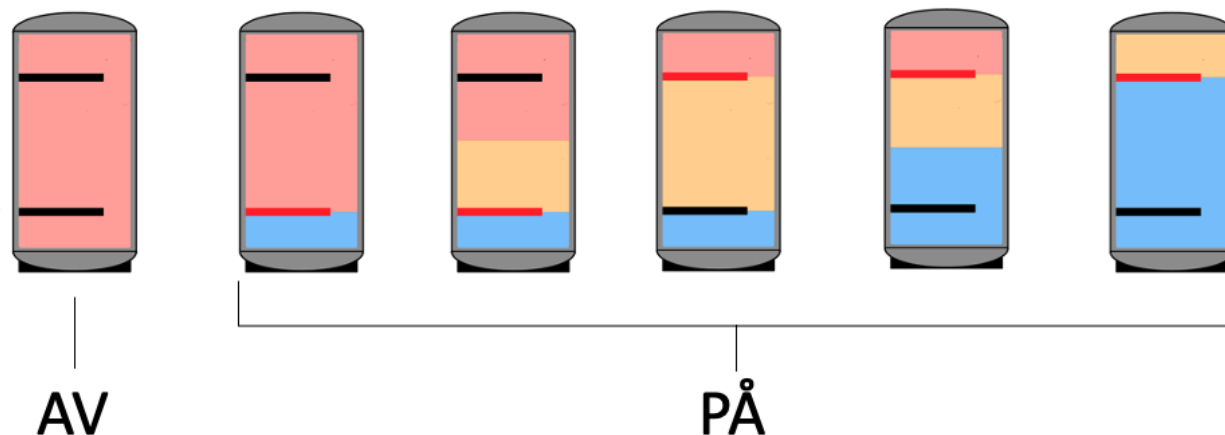
En elektrisk varmtvannsbereder benytter seg av elektriske varmeelement installert på innsiden av en godt isolert tank [37]. Disse benyttes til å varme vann med den individuelle tankens volum. En slik varmtvannsbereder kan ha ett eller flere varmeelementer per tank, avhengig av tankens størrelse og forventet forbruk. Tankene som denne oppgaven er basert på har to varmeelementer [37], som er relativt normalt for litt større beredere. I figur 2.9 er det illustrert en enkel skisse av en elektrisk varmtvannsbereder med to varmeelementer.



FIGUR 2.9: Enkel skisse av varmtvannsbereder med tverrsnitt. Figuren illustrerer essensielle komponenter som inn- og utløpsrør, varmeelementer og elsentraler.

Essensielle komponenter som rustforebygging og trykkventiler er ikke illustrert i denne figuren. De relevante komponentene for forståelse av virkemåte i henhold til lastflytting er heller prioritert. Innløpsrøret som fører kaldt vann inn i varmtvannsberederen kan komme inn fra toppen eller gjennom sidene av tanken [37]. Uavhengig av dette, vil utgangen av røret alltid være plassert nederst inni tanken. Dette er essensielt for berederens virkemåte. Utløpsrøret trekker varmtvann ut i toppen av tanken. Når varmtvann forbrukes tilføres kaldt vann i bunnen av tanken [43, 44]. Siden kaldt vann har høyere tetthet enn varmt vann dannes et temperaturfordelt sjikt kalt en termoklin [39]. Siden kaldt vann tilføres i bunnen av tanken vil tetthetsforskjellen presse varmt vann oppover [45]. Varmtvannet presses til slutt ut gjennom røret på toppen av tanken [39]. På grunn av denne tetthetsforskjellen vil det også forekomme svært lite blanding av vannmengdene med forskjellige temperaturer [45]. Termoklinen danner en termisk grense mellom det varme og kalde vannlaget [39, 43, 44]. Denne grensen brukes strategisk for å utnytte varmeelementene på en optimal måte [37, 39]

Varmeelementene i en bereder, som anvist i figur 2.6, er plassert slik at ett er i nedre del av tanken, og ett er lengre opp [37]. Hvert enkelt eller sett av varmeelement er tilknyttet en elsentral som styrer forbruket. Elsentralene er koblet til en eller flere temperatursensorer [37]. Innstillingene på varmtvannsberederen har en bestemt temperatur  $T_{ut}$ , som vannet skal varmes opp til. Temperaturen vannet har når det kommer inn i tanken defineres som  $T_{inn}$ . Hvis tanken er full og tapping startes, vil termoklinen bevege seg oppover i tanken [39]. Når denne termiske grensen når det nedre varmeelementet, vil temperatursensorene detektere at vannet ved varmeelementet er under  $T_{ut}$  [37]. Dette elementet vil deretter skrus på og levere merkeeffekt. Det nedre varmeelementet skruer seg av ved to tilfeller [37]. Det første tilfellet er at det kalde vannet som har etterfylt tanken varmes opp til  $T_{ut}$  igjen. Når sensoren knyttet til det nedre varmeelementet måler riktig temperatur, vil dette elementet skru seg av. Begge elementene er da skrudd av, og det forekommer ingen forbruk elektrisk effekt. Dette tilfelle er illustrert i figur 2.10 med varmtvannsberederen som er skrudd av.



FIGUR 2.10: Figuren viser mulige temperatursjikt i av- og påskrudde varmtvannsbereidere. Avskrudde bereidere er helt fulle av varmtvann. Rødt representerer vannlag med  $T_{ut}$ , grønt  $T_{mellom}$  og blått  $T_{inn}$ .

Hvis massestrømmen av vann er større enn hva ett varmeelement klarer å varme opp, vil den termiske grensen med  $T_{ut}$  forflytte seg oppover i tanken [39]. Det dannes da en ny termokline med en ny temperatur [43, 44].  $T_{mellom}$  defineres som temperaturen ett enkelt varmeelement klarer å varme opp vannet til mens det trekkes ut. Verdien av  $T_{mellom}$  vil variere avhengig av hvor raskt vannet trekkes ut, eller hvor lenge elementet kan få varme det samme vannet [46]. Siden  $T_{mellom} < T_{ut}$  vil elsentralene sørge for at det nedre varmeelementet fortsatt er på mens den termiske grensen beveger seg oppover i tanken [37]. Etterhvert vil den høyeste termoklinen nå det øvre varmeelementet i tanken. Når temperatursensoren knyttet til dette varmeelementet detekterer  $T_{mellom}$ , vil berederen skru det nedre varmeelementet av og det øvre på [37]. Dette er det andre tilfellet hvor det nedre varmeelementet skruer seg av. Det øverste varmeelementet vil være skrudd på for å varme vannet fra  $T_{mellom}$  til  $T_{ut}$  så lenge det lar seg gjøre. Hvis vannet trekkes ut raskere enn hva det øvre elementet klarer å varme opp til  $T_{ut}$ , vil vannet komme ut med lavere temperatur enn  $T_{ut}$  [46]. Dette vannet vil fortsatt være forholdsvis varmt, så lenge den termiske grensen til  $T_{mellom}$  er under det øvre varmeelementet. Dette fortsetter helt til den termoklinen med vannlaget som har temperaturen  $T_{mellom}$  når det øverste varmeelementet. Når dette potensialet er brukt opp vil det være tomt for varmtvann i tanken [39]. Denne rekken hendelser er illustrert med beredere som er skrudd på i figur 2.10. Vannet som er igjen i tanken vil deretter varmes opp over en viss periode.

For at vannet skal bli varmt igjen må først den øvre delen av tanken varmes opp til  $T_{ut}$ . Når temperatursensoren tilknyttet det øvre varmeelementet detekterer riktig temperatur vil den tilslutte berederen å bytte strømtilførselen [37]. Det nedre elementet kan dermed skru seg på, mens det øvre skruer seg av. Under oppvarmingsprosessen vil vannet oppføre seg annerledes enn under tømingsprosessen. Siden varmt vann har lavere tetthet enn kaldt vann, vil vannet som varmes opp av varmeelementene stige oppover i det kalde vannet [39]. Mens dette skjer vil det avgis varme, slik at hele volumet over et varmeelement varmes opp omtrent like raskt. Når vannet i det nedre volumet er varmet opp til  $T_{ut}$  er tanken full igjen, og begge varmeelementene skrur av.

Når tanken tømmes vil termoklinene stige hvis  $\dot{m}_{vann}$  er større enn vannmengden som varmeelementene er i stand til å ettervarme [39, 46]. Alternativt kan det forbrukes mindre varmtvann enn elementene er i stand varmer over et visst tidsrom. Elementene vil i dette tilfellet skru seg av og på for å oppnå en varmet masse tilnærmet  $\dot{m}_{vann}$ . På grunn av disse to tilstandene er det fordelaktig å definere en ny massestrøm  $\dot{m}_{varme}$  for oppvarmet masse. Denne massestrømmen er avhengig av merkeeffekten  $P_{el}$  og antallet varmeelementer som er skrudd på [37, 46].  $\dot{m}_{varme}$  representerer massen til vannet som varmes fra  $T_{inn}$  til  $T_{ut}$  per sekund. Momentalt vil disse massestrømmene sjeldent være helt like, men vil jevnes ut over en viss periode, som for eksempel i løpet av en time. Hvis  $\dot{m}_{vann} > \dot{m}_{varme}$ , vil varmtvannet i tanken byttes ut med kaldt vann, og den termiske grensen med  $T_{ut}$  vil bevege seg oppover i tanken [39]. Hvis  $\dot{m}_{vann} < \dot{m}_{varme}$  vil termoklinen under den termiske grensen etterhvert bli varmet opp til  $T_{ut}$ . Eksempelvis kan 40 kg varmtvann forbrukes i løpet av 10 minutter under høyt forbruk. Med et varmeelement på 4 kW vil 40 kg vann varmes opp 50°C på omtrent 35 minutter. Innenfor en time etter forbruket har startet vil totalt varmtvannsforbruk  $\dot{m}_{vann}$  være lik totale masse oppvarmet  $\dot{m}_{varme}$ . Den samlede massen i løpet av en time

$$\dot{m}_{vann} = \sum \dot{m}_{vann} 3600 \frac{s}{h} \quad (2.1)$$

er timesforbruket av varmtvann. Heretter vil  $\dot{m}_{vann}$  referere til den den timesbaserte massestrømmen definert av  $\dot{m}_{vann}$  fra likning 2.1 i kg/h. Tiden  $t_{n,på}$  defineres som andelen av en time hvor bereder nummer  $n$  er skrudd på. Den totale oppvarmede massen i løpet av en time

$$\dot{m}_{varme} = \sum \dot{m}_{varme} t_{n,på} \quad (2.2)$$

defineres på lik linje med  $\dot{m}_{vann}$  som timesbasert massestrøm i kg/h.  $\dot{m}_{varme}$  refererer heretter den til timesbaserte massestrømmen  $\dot{m}_{varme}$  fra likning 2.2.

Som nevnt over kan varmtvannsberedere kobles sammen både i parallell og serie [37]. På grunn av virkemåten beskrevet over, vil det være mest gunstig å koble de sammen i serie [37]. Seriekobling vil teknisk sett gjøre at settet av beredere fungerer som en enkelt stor tank med det samlede volumet av alle tankene. Denne ekvivalente tanken vil også ha det samlede antallet varmeelementer som de individuelle tankene har. Dette antallet har da lik virkemåte som beskrevet over, hvor kun annenhver kan være på om gangen.

### 2.3.2 Varmetap og virkningsgrad

I en reell varmtvannsbereder vil varmetap føre til at all tilført elektrisk energi ikke overføres til varmeenergi i vannet [36]. Deler av det elektriske forbruket over tid vil bidra til å opprettholde vannet ved  $T_{ut}$ . Uten svært omfattende målepunkter er det krevende å fastsette faktiske varmetap [36].

Varmetap kan foregå i selve varmtvannsberederen, gjennom veggene av tanken. Dette varmetapet er sannsynligvis veldig lite ettersom de fleste varmtvannsberedere er utstyrt med svært god varmeisolering [37]. Primært vil varmetapet forekomme i rørene som er tilkoblet berederen [36]. Rørene som fører varmtvann ut av berederne inneholder vann med  $T_{ut}$ . Disse kan føre inn i andre beredere, eller ut til der vannet forbrukes [36, 37]. Når man forbruker varmtvann må man ofte vente noen sekunder før det ankommer. Dette kommer av at vannet i rørene har blitt kaldt i løpet av tiden siden forrige forbruk. På grunn av tetthetforskjellen kan dette vannet sile tilbake i tankene og

senke temperaturen til vannet [39]. I selve berederne vil koblingspunktene til rørene være punkter med høyere varmetap [36]. Høyere varmetap vil potensielt forekomme på tvers termokliner, eller vannlag, i tankene [47, 39]. Termokliner vil i teorien opprettholdes stabile uten intensjonell sirkulering ved hjelp av pumper [43, 44]. Konduksjon og konveksjon kan likevel forkomme, som resulterer i delvis varmeavgivning mellom vannlagene.

Varmetapene definerer virkningsgraden til en varmtvannsbereder. Virkningsgraden til elektriske varmeelement er tilnærmet 100 % [48, 49]. Elektrisitet har svært høy energikvalitet, mens termisk energi er den laveste formen for energi [48]. Det er derfor rimelig å anta at all elektrisk effekt resulterer i oppvarming av vann. Virkningsgraden til hele varmtvannsberederen er svært vanskelig å fastsette [36]. Dette kommer av at hver enkelt bereder opererer i en relativt unik kontekst. Temperaturforskjeller mellom kaldtvann, varmtvann og omgivelsene er individuelt for hvert installerte system. I tillegg vil faktorer som rørlengder fra tilkoblede vannføringsystemer innføre større usikkerheter. Virkningsgraden til ulike beredere forventes å variere mellom 80 og 95 % [50].

I denne oppgaven benyttes en ideell beredermodell. Dette innebærer at virkningsgraden antas å være 100 %. Ettersom forventet virkningsgrad oppgitt over er såpass høy, vil ikke dette påvirke resultatene i stor grad. Et annet sentralt aspekt av den ideelle beredermodellen er at de termiske grensene i den termokline tanken antas å være helt stabile.

### 2.3.3 Lastflyttingspotensiale

På grunn av virkemåten til elsentralene i varmtvannsberederne, vil elektrisitet forbrukes samtidig som varmtvann ved tradisjonell bruk [37]. For å kunne utnytte det innebygde fleksibilitetspotensiale i berederteknologien, må alternative styringsmetoder evalueres [42, 51]. Alternative styringsmetoder vil at varmtvannstankene tømmes for varmt vann, og tankene fylles med kaldtvann. Vannet i tanken vil ikke lenger varmes til  $T_{mellom}$ . Tanken fylles med vann med  $T_{inn}$ , helt til alt vannet i tanken har denne temperaturen. Dette betyr at det vil bli tomt for varmtvann mye fortere enn hvis vannet ettervarmes mens det trekkes ut [46]. Vannet må varmes fra  $T_{inn}$  til  $T_{ut}$  for å levere varmtvann igjen. Å bruke varmtvannsberedere som fleksibilitet vil føre til noen ulemper som er vanskelige å unngå, og må veies opp imot fordelene. Ulempene oppsummeres som lengre oppvarmingsperiode, kortere tømingsperiode og mer kaldtvann i tanken.

Benyttes varmtvannsberedere som en fleksibel last betyr det at vannet har en tempertur lavere enn  $T_{ut}$  større andeler av døgnet. På grunn av dette er det svært viktig å ta hensyn til legionella-smitte. Dette avsnittet er basert på informasjon fra Folkehelseinstituttet (FHI) [45]. Legionella er en svært vanlig bakterie, som finnes i nesten alt vann fra det norske vannverket. Inhaleres aerosoler med høy forekomst av legionellabakterier gjennom luftveiene kan de forårsake lungebetennelse. Bakterien trives svært godt i stillestående vann med temperaturer mellom 20 og 55 °C. For å forhindre helsefarende vekst bør tappevann helst være over 60 °C, eller under 20 °C. I tillegg bør det sirkuleres og renses regelmessig. FHI har i den sammenheng utredet retningslinjer for varmtvannssystemer. Retningslinjene relatert til varmtvannsberedere konstanterer at temperaturen bør holdes over 70 °C. Det varme vannet må sirkuleres i tankene slik at det ikke dannes vannlag under varmeelementene som konstant er under 70 °C. For akkumulatortanker som beholder vannreserver under 70 °C bør dette gjøres minst en gang i uken. Sirkulasjonene gjøres av egne sirkulasjonspumper. Lager og oppvarmingskapasitet må håndtere daglige svinginger i varmtvannsforbruk så vesentlige temperaturfall ikke forekommer. Praktisk anvendt vil dette bety at utgående vann ikke

bør være lavere enn  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$  i mer enn 20 minutter per døgn. Det bør også være dreneringsventiler for slamdannelse. Slamdannelse kan bidra til å hindre bakterievekst, men dette må tømmes regelmessig. Det er fordelaktig om hele tanken kan tømmes for en mer grundig rengjøring og desinfisering. FHI peker på flere temperatursensorer med strategiske plasseringer som et godt verktøy for overvåkning av potensiell bakterievekst.

Flere målepunkter tilknyttet varmtvannsberedere vil være fordelaktig for lastflytting [51, 46]. Flere strategisk plasserte temperatursensorer kan gi et mer fullkomment bilde av tilstanden til vannet i tankene. Dette kan gjøre det enklere å estimere varmvannsbeholdningen i tankene. I tillegg kan det gi en indikasjon på om vannlaget under den termiske grensen for  $T_{ut}$  kan benyttes [45]. Tiden strømtilførsel til varmtvannsberedere kan kuttes er avhengig av varmtvannsforbruket [46]. For en nøyaktig verdi av  $\dot{m}_{vann}$  kan det lønne seg å måle massestrømmen direkte. Dette kan gjøres med massestrømmålere. Varmtvannstankene er alltid fylt med den samme mengden vann, som betyr at massestrømmen inn og ut av tanken alltid er lik, selv om temperaturen er forskjellig. Slike målere kan derfor plasseres både før og etter berederene i systemet de er tilkoblet. Smarte beredere med flere målepunkter og mer avanserte styringsystemer er allerede tilgjengelig på markedet. Producenter som Høiax og OSO Hotwater leverer beredermodeller som kan styres etter strømpris og forbrukers egne preferanser [10, 35, 52].

Smartere beredere har egenskaper som egner seg godt for fleksibilitetstjenester [51, 42, 53]. Først og fremst har de en svært rask responstid [42, 10, 51, 46]. Kutt av forbruk til varmtvannsberedere skjer nærmest momentant, kun begrenset av styringssystemene [46]. Elsentralene integrert i berederne er bygget for å kunne bytte mellom å tillate strømforbruk eller ikke [37]. En annen vesentlig fordel med denne teknologien er at den består av relativt robuste komponenter [35]. Disse komponentene er laget for å tåle de varierende forholdene berederne operer med. Tanker, rør og elektriske varmeelementer er godt etablerte teknologier med lang holdbarhet [42]. Dette er grunnen til at en varmtvannsbereder kan gjennomgå langt flere laddningscykluser enn et batteri [10, 35]. I tillegg kan opplading forekomme i hele spekteret av størrelsesordener berederen har kapasitet til å levere, basert på volum og merkeeffekt [46, 51]. Hvert enkelt beredersystem er relativt unikt, med varierte parametre. Flexibilitetspotensial er i tillegg svært avhengig av konteksten til disse systemene. De operer under ulike forhold og leverer varmtvann for ulike formål. Enhver løsning for utnyttelse av flexibilitetspotensialet vil være relativt individuell for hvert system. Dette kommer ned til å bestemme hvordan berederene skal operere ved hjelp av styring algoritmer [51]. Styringsalgoritmene må til en viss grad skreddersys for hvert eneste unike system etter det systemets begrensinger og ønsket formål.

## Kapittel 3

# Case: Oslo lufthavn Gardermoen

### 3.1 NeX2G

Denne masteroppgaven er en del av det større forskningsprosjektet Nettbalansering fra store parkeringsanlegg og næringsbygg - NeX2G. Det henvises til prosjektbeskrivelsen for ytterligere informasjon [11]. Dette er et samarbeidsprosjekt mellom NMBU og Avinor for å evaluere hvordan flyplassanlegget Oslo Lufthavn Gardermoen kan benytte og videreutvikle fleksibilitetsressursene som eksisterer, eller kan potensielt bygges ut på flyplassanlegget. Hovedfokuset til prosjektet omhandler å vurdere kapasiteten ved eventuell innføring av storskala Vehicle-to-Grid-ressurser. I den sammenheng er det plassert fem toveis elbilladere ved et av flyplassens parkeringsplasser som et pilotprosjekt. Innsamling av inn- og utladningsdata for disse fem ladepunktene danner datagrunnlaget for å vurdere en storskala innføring av dette konseptet. Resultatene fra pilotprosjektet ekstrapoleres ved å anta at et av parkeringsanleggene konverteres for å prioritere reisende som har elbiler med toveis ladingkapasitet. Dette innebærer installering av nødvendige ladepunkter på hver parkeringsplass. Batteriene i disse elbilene vil deretter bli brukt til å yte fleksibilitets tjenester for nettet eller internt på flyplassanlegget. Praktisk sett har dermed et parkeringsbygg blitt konvertert til et stort batteri, med betydningsfull kapasitet for nettavlastning. Utbygging av et slikt anlegg vil være relativt kostbart for Avinor. Det er derfor ønskelig for prosjektet å vurdere samspillet med fleksible elektriske laster i tillegg, som vil kreve mindre investeringer.

Næringsbyggdelen av prosjektet baserer seg på å benytte fleksible laster i bygg, spesielt relatert til oppvarming. NeX2G er et tverrfaglig prosjekt, med målsetning om å vurdere den totale fleksibilitetskapasiteten for flyplassanlegget. Denne masteroppgaven er tilknyttet denne delen av prosjektet. Problemstillingen omhandler å utnytte den innebygde kapasiteten til de eksisterende varmtvannsberederne. Resultatene vurderes opp mot nåværende og fremtidig potensial tilgjengelig på Gardermoen.

Målet med denne masteroppgaven er å estimere fleksibilitetspotensialet til varmtvannsberederne ved å benytte elektriske forbruksdata. Et sentralt aspekt av NeX2G-prosjektet er å estimere potensialet for kortsiktig fleksibilitet ved å utvikle optimaliserte forbruksalgoritmer av elektrisitet. Det er mangel på slike lastprognoser, særlig i et eksplisitt perspektiv. Denne oppgaven benytter seg av historiske forbruksdata for å estimere det tilgjengelige potensialet. For at slike forbruksalgoritmer skal fungere i sanntid vil det være svært nødvendig med gode prediksjoner av forbruk på daglig basis. Utvikling av nøyaktige predikasjonsmodeller av forbruk må gjøres gjennom maskinlæring. For å implementere mer intelligente algoritmer for forbruk av varmtvannsberedere på et praktisk nivå, må dette forekomme på forbruk av både elektrisitet og varmtvann. På grunn av manglende data av varmtvannsforbruk og et begrenset datasett av elektrisk forbruk blir dette ikke

gjort i denne oppgaven. Prioritert fokus vil være å estimere kvantitative potensial for fleksibilitet varmtvannsberedersystemene har mulighet til å levere.

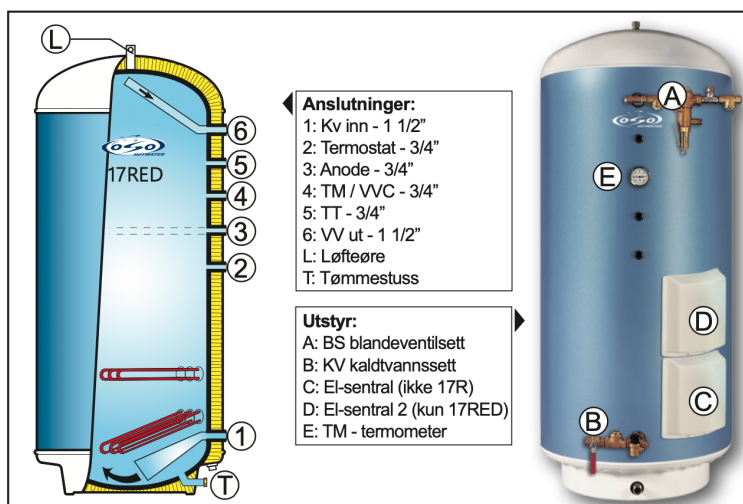
### 3.2 Beredersystemene på Gardermoen

Det er flere separate varmtvannsberedersystemer på Gardermoen, fordelt på forskjellige seksjoner av anlegget. Fem av disse systemene vil bli vurdert for å danne grunnlaget til resultatet i denne oppgaven. Hovedfokuset er på ett spesifikt system, som har installerte målepunkter for elektrisk forbruk.

TABELL 3.1: Individuelle beredersystem på Gardermoen, angitt med merkeeffekt i kW, volum per tank i liter og antall beredere i serie. Informasjonen er oppgitt av Avinor.

	System 1	System 2	System 3	System 4	System 5
<b>Merkeeffekt</b>	15 kW	15 kW	15 kW	14 kW	15 kW
<b>Volum</b>	1000 l	1000 l	900 l	400 l	900 l
<b>Antall</b>	4	4	3	2	2

Som tabell 3.1 viser, er system 1 og 2 identiske, mens de tre andre er unike. System 1 er det systemet som har installerte målepunkter. I hvert system er det flere tanker som er koblet sammen i serie. I følge Avinor er varmtvannsberedermodellene i system 1 17RED 1000l 15kW+15kW, levert av OSO Hotwater [37]. En illustrasjon av denne spesifikke modellen fra tilhørende datablad er presentert i figur 3.1 .



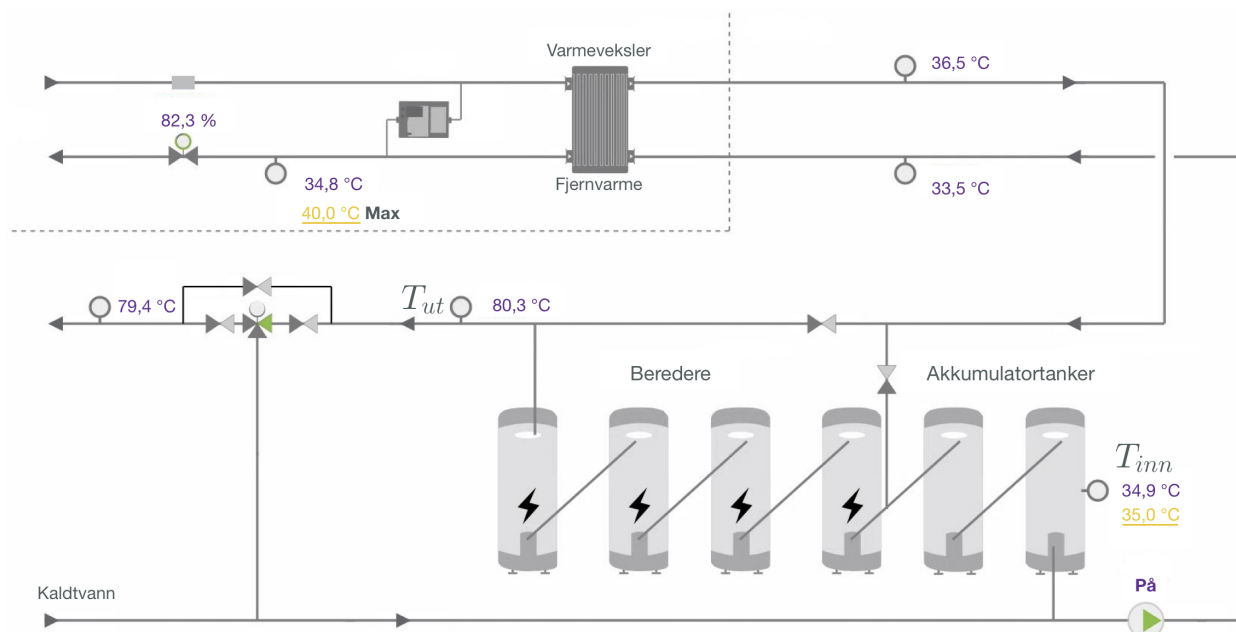
FIGUR 3.1: Illustrering av den beredermodellen 17RED 1000l 15kW+15kW som er installert i beredersystem 1 på Gardermoen. Figuren er hentet fra tilhørende datablad [37].

Figur 3.1 viser at den øvre elsentralen i denne modellen befinner seg relativt lavt i forhold til andre modeller [37]. Dette gjør at det tar mindre tid før bytting fra nedre til øvre element skjer under uttømming. Det øvre elementet vil også stå for mesteparten av oppvarmingen når tanken er tom



for varmtvann. Oppvarmingstiden for vannet mellom elementene vil også være relativt kort.

Avinor oppgir at de fire beredere i system 1 er koblet til et større anlegg for oppvarming av tappevann ved hjelp av fjernvarme, illustrert i figur 3.2.



FIGUR 3.2: Oversiktsskjema for forvarming av tappevann og varmtvannsberedere. Figuren er en redigert versjon av oversiktsskjema oppgitt av Avinor. Den illustrerer forvarming ved hjelp av fjernvarme, kobling av beredere og relevante temperaturer for varmtvann og kaldtvann.

Figur 3.2 viser et komplekst varmesystem, med en forvarmer av tappevann, akkumulortanker og fire elektriske seriekoblede varmtvannsberedere. Dette systemet sørger for lunkent tappevann, opp til ca 35 °C, ved hjelp av forvarmingen. Høyere temperaturer, opp til 80 °C, leveres av beredersystemet. Dette er en modifisert versjon av Turbo-systemet utviklet av OSO Hotwater, som sørger for rask oppvarming av vann ved hjelp av forvarming. Akkumulortankene er ment for å lagre forvarmet vann til systemet i det tilfelle at forvarming ikke fungerer. I henhold til opplysningene gitt i figur 3.2 antas det heretter at  $T_{inn} = 80$  °C og at  $T_{ut} = 80$  °C for beredersystemet som skal analyseres.

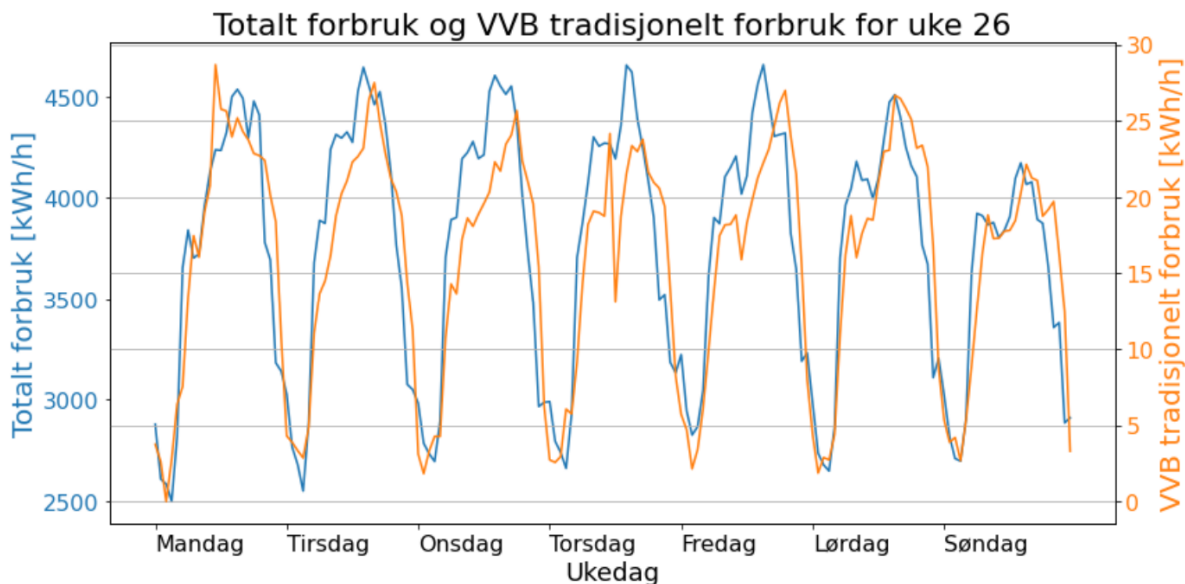
### 3.3 Data

Resultatene og beregningene i denne oppgaven er basert på to forskjellige datasett, hentet fra Avinors interne dataplattform. Begge datasettene begynner den 16. desember 2022, og slutter den 4. desember 2023. Grunnet valget av denne perioden er at målingene av varmtvannsberedere startet den 16. desember 2022. Datasettene inneholder elektriske timeeffekter [kWh/h] for forbruk av elektrisk energi, heretter referert til som  $P_{time}$ . I tillegg har datasettene timesbasert spotpris i norske øre og totalkostnad i norske kroner.

Det ene datasettet inneholder målinger av det elektriske forbruket til varmtvannsberedersystem 1.

I dette datasettet er det oppdaget flere feilmålinger. Disse feilmålingene kommer av at timeeffekten ikke noteres for et varierende antall timer, men akkumuleres til et oppsamlingstidspunkt. Dette gjør at noen timer har målinger på 0 kWh/h i forbruk, som ikke er reelt. De timene som mottar den akkumulerte verdien går også så høyt som > 260 kWh per time. Ettersom fire beredere med 15 kW merkeeffekt maksimalt kan yte 60 kWh/h vil alle verdier over dette ikke være reelt forbruk.

Det andre datasettet har målinger av det totale forbruket til hovedanlegget på Gardermoen. Alle varmtvannsberederne oppgitt i tabell 3.1 skal være representert i denne målingen. Datasettene har blitt satt opp imot hverandre for å sammenlikne forbruk av system 1 med det totale elektriske forbruket på hele anlegget. I preliminæranalysen ble det observert at det elektriske forbruket til beredersystemet sammenfaller med effekttoppene på Gardermoen, illustrert i figur 3.3.



FIGUR 3.3: Blå graf illustrerer det totale strømforbruket på Gardermoen. Oransje graf viser strømforbruket til beredersystem 1. Forbruksmønstrene er produsert med historiske målinger og tradisjonelt berederforbruk. Grafene har ulike aksestørrelser og representerer uke 26 i 2023.

Den blå kurven viser det totale elektriske forbruket på anlegget berederne befinner seg. Strømforbruket tilknyttet beredersystem 1 angis i oransje. Figuren illustrerer hvordan disse forbrukene fordelte seg i løpet av uke 26 i 2023. Uke 26 benyttes som eksempel gjennom hele oppgaven, for å illustrere endringer i en typisk uke. Størrelsesordenene på aksene er svært ulike, så beredersystemets strømforbruk representerer en svært liten andel av det totale forbruket. Oppgaven vil vurdere evnen til å flytte den elektriske lasten til varmtvannsberederne på anlegget til andre tider på døgnet. Slik lastflytting kan avlaste det totale forbruksmønsteret som anvist i figur 3.3.

## Kapittel 4

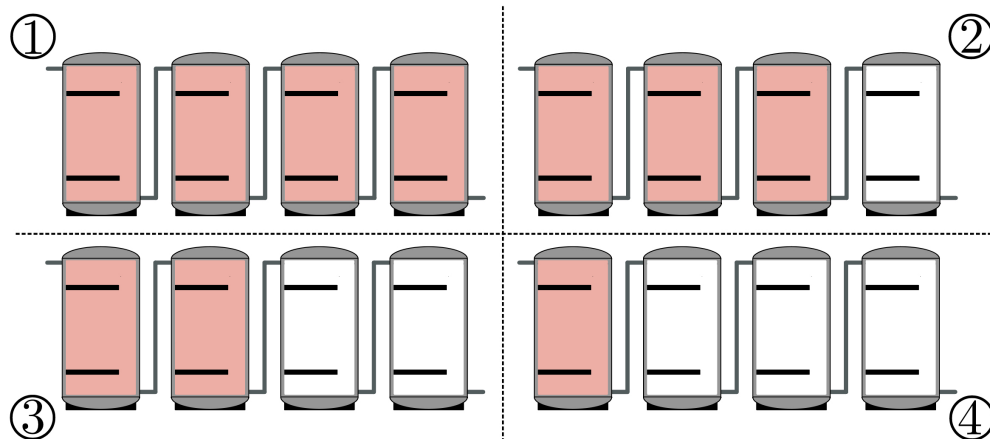
# Metode

Denne oppgavens formål er spesifikk undersøkelse av hvordan varmtvannsberederene på Gardermoen kan bidra til fleksibilitet. For å oppnå dette benyttes datasett for totalt forbruk på Gardermoen og elektrisk forbruk knyttet varmtvannsberederersystem 1 fra tabell 3.1. I tillegg vil opplysningene fra underkapittel 3.2, oppgitt av Avinor og datablad OSO Hotwater, benyttes som bakgrunn for antagelser og beregninger [37]. Opplysningene og datasettene bidrar til å estimere fleksibilitetspotensialet for varmtvannsberederene med to ulike formål. Forskningsspørsmålene danner grunnlaget for hvert av formålene. Estimeringen gjøres ved å utvikle to forskjellige styringsalgoritmer for lastflytting. Styringsalgoritmene vurderes med simuleringer basert på historisk forbruk. Resultatforbruket for system 1 ekstrapoleres til å omfatte de resterende systemene for en mer betydningsfull estimering av tilgjengelig kapasitet. For å muliggjøre elektriske forbruksberegninger vil det være nødvendig å estimere varmtvannsforbruket for hver time,  $\dot{m}_{vann}$ .

### 4.1 Estimering av massestrøm

Som nevnt i delkapittel 2.3.3 er det nødvendig å vite forbruket av varmtvann,  $\dot{m}_{vann}$ , for å kunne evaluere lastflyttingsevnen til varmtvannsberedere. Massestrømmen per time definerer hvor mye varmtvann som er i tanken, og hvor fort den tømmes. Det mest ideelle, som nevnt i 2.3.3, ville vært å ha fysiske målinger av denne massestrømmen ved hjelp av massestrømmålere. Slike målere har ikke blitt installert på anlegget. Det finnes derfor ikke nøyaktige verdier for varmtvannsforbruk. I den sammenheng må  $\dot{m}_{vann}$  estimeres. For å estimere forbruk av varmtvann benyttes datasettet for varmtvannsberedere i sammenheng med virkemåten presentert i delkapittel 2.3.1. Berederne antas å være ideelle, som beskrevet i 2.3.2.

Varmeelementene i varmtvannsberederene har en uregulerbar merkeeffekt, og kun ett varmeelement per tank kan være på om gangen. Hver timeeffektmåling i datasettet forteller indirekte hvor mange varmeelementer som har brukt strøm til oppvarming hver time. Siden merkeeffekten  $P_{el} = 15 \text{ kW}$ , vil en  $P_{time}$  måling på 15 kWh/h bety at ett enkelt varmeelement har vært på hele timen. Totalt fire varmeelementer kan være på samtidig, ettersom berederne kan operere samtidig. For hvert varmeelement som er skrudd på i en hel time, øker timeeffekten med 15 kWh/h. Maksimal verdi av  $P_{time}$  er 60 kWh/h. Fordi den termiske grensen antas å være helt stabil, forteller disse timesmålingene hvilken tank grensen befinner seg i. Denne tanken kan kalles den termokline tanken. Figur 4.1 viser fire tilstander som systemet antas å oppnå i løpet av hver målte time, ved spesifikke målte forbruksverdier for  $P_{time}$ .



FIGUR 4.1: Figuren viser antatte tilstander beredersystem 1 oppnår ved spesifikke forbruksverdier for timeeffekt. Del 1, 2, 3 og 4 av figuren viser henholdvis tilstander ved forbruksverdier under 15, mellom 15 og 30, mellom 30 og 45, mellom 45 og 60 kWh/h. Røde tanker illustrerer at de er helt oppvarmet minst en gang i løpet av hver time.

For hver  $P_{time} < 15$  kWh/h må systemet oppnå tilstand 1, hvor alle tankene er fulle med varmtvann. Er  $P_{time}$  mellom 15 og 30 kWh/h, oppnår systemet tilstand 2, hvor tre av tankene er fulle. Tilstand 3 har to fulle tanker i løpet av timen. Denne tilstanden oppnås når  $30 \geq P_{time} \geq 45$  kWh/h. Når  $45 \geq P_{time} \geq 60$  kWh/h oppnås tilstand 4, hvor kun en tank er full av varmtvann i løpet av den målte timen. Hvis  $P_{time} = 60$  kWh/h er ingen av tankene helt fulle.

Den termokline tanken er for hver tilstand i figur 4.1 anvist som den første røde tanken fra høyre. Den ideelle beredermodellen antar at den termiske grensen for  $T_{ut}$  kun beveger seg i den termokline tanken. Eksempelvis vil grensen befinne seg i andre tank fra høyre ved en måling av  $P_{time} = 24$  kWh/h. Denne tanken vil skru seg av og på etter varmtvannsforbruket. Det antas at det dannes et ekvilibrium over perioden på en time mellom  $\dot{m}_{varme}$  og  $\dot{m}_{vann}$ . Maksimal  $\dot{m}_{varme}$  for en enkelt elsentral defineres som

$$\dot{m}_{varme} = 3600 \frac{P_{el}}{c\Delta T}, \quad (4.1)$$

hvor  $c = 4.186 \frac{kJ}{kgK}$  og  $\Delta T = T_{ut} - T_{inn}$  [54]. Likningen korrigerer merkeeffekten fordi  $\dot{m}_{varme}$  er massen som teoretisk varmes fra  $T_{inn}$  til  $T_{ut}$  per time. Den termokline tanken defineres som bereder nummer  $n$  i serien. Timesandelen hvor bereder  $n$  forbruker elektrisitet

$$t_{n,p\ddot{a}} = \frac{P_{time} - 15kWh(n-1)}{15kW(n-1)}, \quad (4.2)$$

er tiden hvor bereder  $n$  ikke er full av varmtvann. Likning 4.1 og 4.2 settes så sammen for å estimere massestrømmen av varmtvann per målte time,

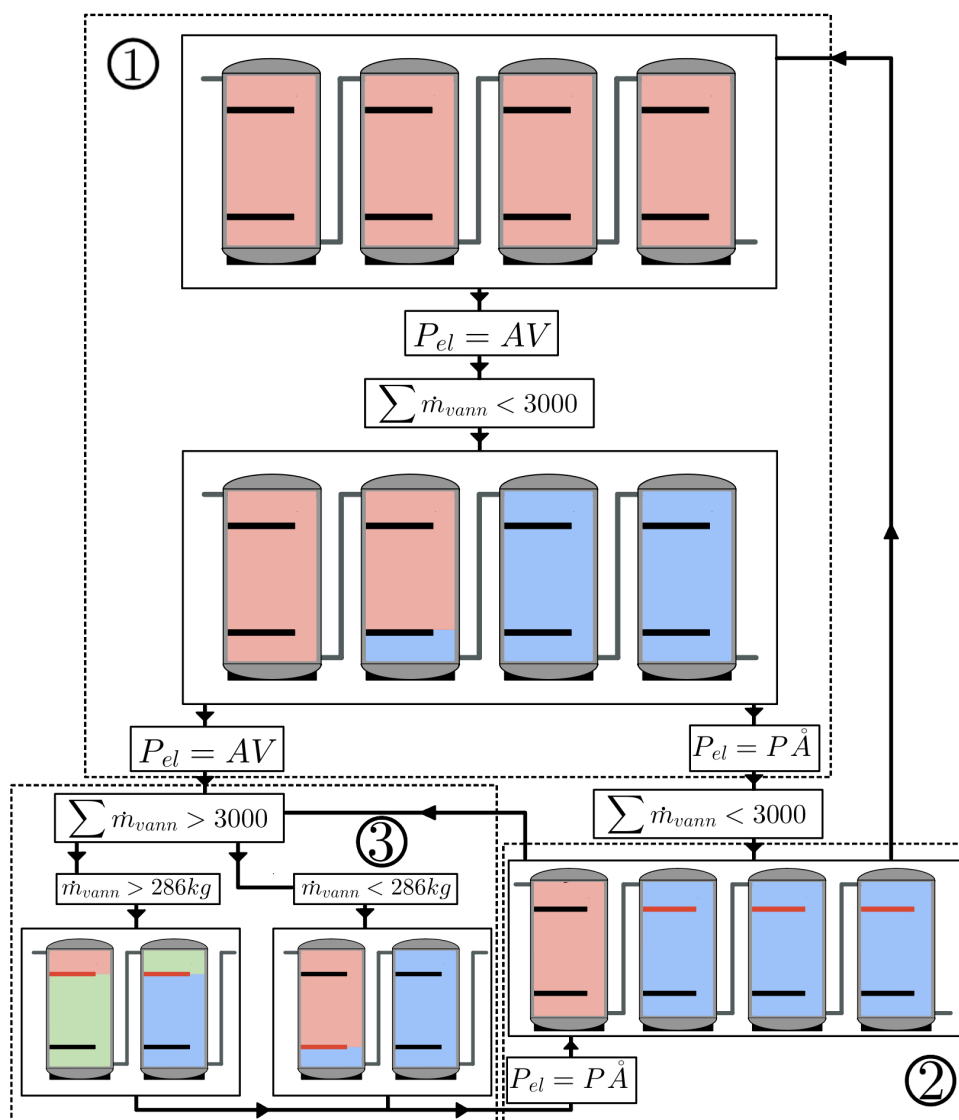
$$\dot{m}_{vann} = \dot{m}_{varme}(n-1 + t_{n,p\ddot{a}}). \quad (4.3)$$

Dette er timesbasert varmtvannsforbruk angitt i kg/h. Beregningen i 4.3 er en veldig grov estimering av varmtvannsforbruket. Likevel tilbyr det en mulighet til å teste de ulike fremgangsmåtene

for lastflytting. Denne estimeringen tillater en simulering hvor de fysiske begrensningene til systemet er tatt i betraktning.

## 4.2 Styringsalgoritme for maksimal lastflytting

Styringsalgoritmen for maksimal lastflytting er basert på forskningspørsmål nummer 1 fra kapittel 1.3. Forskningspørsmål 1 innebærer å flytte mest mulig av det elektriske forbruket tilknyttet varmtvannsberederene til timene med minst totalt forbruk på Gardermoen. Dette betyr å la tankene tømmes til et forsvarlig nivå frem til oppvarmingsprosessen settes igang. Figur 4.2 illustrerer hvordan algoritmen er tiltenkt å fungere i praksis.



FIGUR 4.2: Flytskjema av styringsalgoritmen for maksimal lastflytting. Røde varmelementer er påskrudd. Del 1 illustrerer operasjon uten oppvarming, del 2 illustrerer oppvarmingsprosessen og del 3 illustrerer beredskapsløsningen. Pilene illustrerer sammenhengen mellom tilstandene, med relaterte forutsetninger.

Illustreringene innenfor del 1 av figuren viser at varmtvann byttes med kaldtvann i timene uten strømforbruk. Dette fortsetter for alle timer frem til oppvarmingsprosessen starter, illustrert i del 2 av figuren. Når oppvarmingsprosessen starter tillates elektrisk forbruk. Om oppvarmingsprosessen er i gang eller ikke er illustrert ved om  $P_{el}$  er lik AV eller PÅ.

For å unngå tap av komfort i løpet av dagen vil det være nødvendig å etablere en beredskapsplan for å sikre varmtvannsforsyning hvis systemet er nær ved å tømmes. Denne beredskapsløsningen er illustrert i del 3 av figur 4.2. Hovedsaklig vil løsningen gå ut på å sette en grense for hvor langt den termiske grensen har lov til å bevege seg. På et praktisk nivå vil bety at det bestemmes et volum som ikke lar seg tappes for varmt vann uten påfølgende ettervarming. Den mest naturlige løsningen for et system med fire bereder i serie vil være å la den siste berederen operere som normalt. Hvis varmtvannsforbruket over timene før oppvarmingsprosessen, illustrert ved  $\Sigma \dot{m}_{vann}$  i figur 4.2, overgår 3000 kg vil beredskapsløsningen aktiveres. Bereder nummer fire vil på dette tidspunktet være den termokline tanken. Varmeelementene i denne tanken vil håndtere varmtvannsforbruket som foregår før oppvarmingsprosessen. Sammenliknes dette med et batteri, er dette analogt med en grense for utladningsdybde.

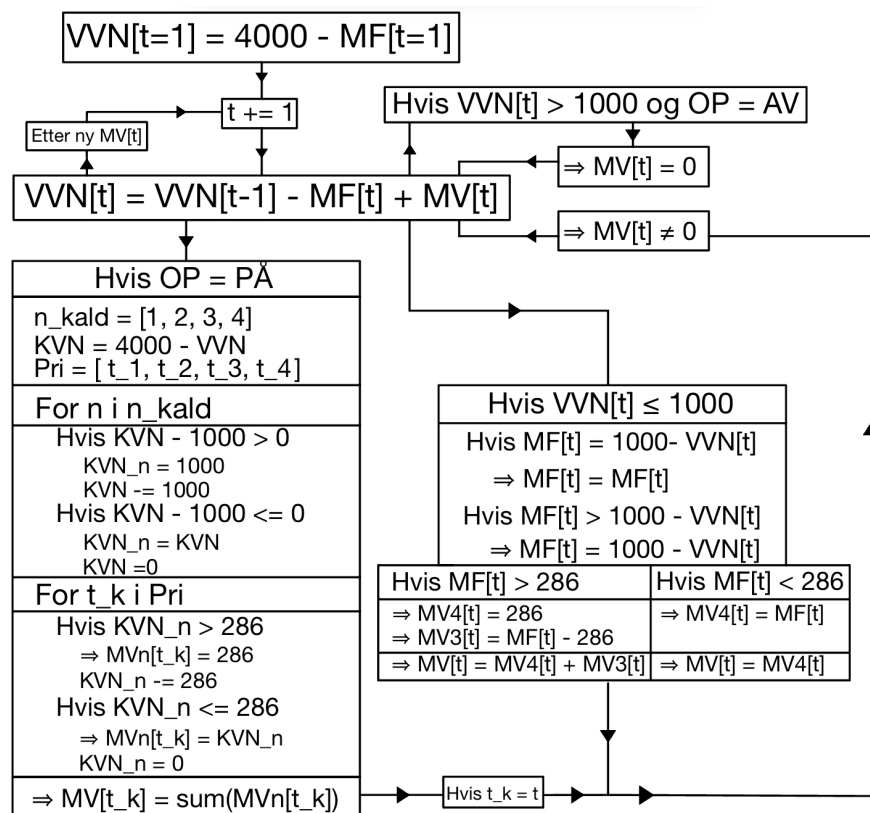
For at en slik beredskapsplan skal fungere må det også gjøres rede for tilfellet der et enkelt varmeelement ikke klarer å opprettholde den termiske grensen. Basert på likning 4.1 i delkapittel 4.1 korrelerer dette til et varmtvannsforbruk  $> 286 \frac{kg}{h}$ . Når den fjerde berederen bytter strømtilførsel fra nedre til øvre varmeelement tillates også det øvre varmeelementet i den tredje berederen strømforbruk. Når den termiske grensen er under det øvre varmeelementet igjen, skrur disse seg av til fordel for det nedre elementet i bereder nummer fire. Slik vil disse to berederene interagere frem til den større oppvarmingsprosessen av de kalde tankene forekommer.

Volumet som må varmes under oppvarmingsprosessen vil antageligvis, men ikke nødvendigvis, være tre helt kalde beredere. På grunn av virkemåten beskrevet i 2.3.1 vil dette skje omtrent likt for alle tankene. Prosessen fordeles over hvor mange timer som trengs for å varme det totale volumet av en tank fra  $T_{inn}$  til  $T_{ut}$ . Tilgjengelig varmtvann kan forbrukes løpet av timene i oppvarmingsprosessen til de resterende tankene oppnår  $T_{ut}$ . Dette kan føre til at beredskapsløsningen aktiveres under oppvarmingsprosessen, illustrert ved sammenhengen mellom del 2 og 3 i figur 4.2.

Oppvarmingsprosessen er ment å forekomme under timene med minst totalt strømforbruk på flyplassanlegget. Siden forbruksmønsteret på Gardermoen er relativt likt for hver dag gjennom hele året, har dette blitt gjort på en forenklet måte. For hver måned i datasettet har gjennomsnittet av totalforbruket for hver enkelt time av døgnet blitt beregnet. Deretter har hver time blitt rangert fra minste gjennomsnitt til høyeste for hvert døgn. Basert på rangeringen har hver time blitt angitt en prioritetsverdi fra 1 til 24. Med andre ord forekommer oppvarmingsprosessen for denne algoritmen under timene på døgnet som har de laveste månedlige gjennomsnittene av totalforbruk.

For å simulere forbruket har det blitt laget en fordelingsfunksjon basert på estimeringen av varmtvannsforbruk. Pseudokode av funksjonen er anvist i figur 4.3. Det antas at alle tankene er fulle med varmtvann før første time av datasettet. Varmtvannsnivået (VVN) er dermed 4000 kg når funksjonen begynner. Deretter trekkes estimeringen for massen forbrukt (MF) for den første timen fra dette tallet. For hver av de neste timene blir estimeringen av massestrøm trukket fra den totale massen fra den foregående timen. I tillegg vurderes de seks neste timene for å se om minst 4 av de

har en en lavere prioritetsverdi enn 6. Hvis dette ikke er tilfellet, tillates ikke oppvarmingsprosessen (OP) å starte. Er varmtvannsnivået i tillegg over 1000 kg, settes heller ikke beredskapsløsningen i gang. Når begge disse betingelsene er oppfylt ( $VVN[t] > 1000$  og  $OP = AV$ ), vil masse varmet (MV) være lik 0.



FIGUR 4.3: Pseudokode som illustrerer hvordan simuleringsfunksjonen til styringsalgoritmen for maksimal lastflytting fungerer.

Hvis kravet for oppvarmingsprosessen oppfylles ( $OP = PÅ$ ), vil de nødvendige parametrene identifiseres. Tankene defineres fra første til siste etter nummer i serien ( $n\_kald$ ). Deretter beregnes kaldtvannsnivå (KVN) basert på varmtvannsnivå. De fire timene hvor de kalde tankene skal varmes rangeres så etter stigende prioritetsverdi (Pri). Tankene fylles med kaldt vann fra den første i serien. Funksjonen starter derfor med denne tanken, og fortsetter for de neste i serien. For hver tank sjekkes det om den er helt full av kaldtvann. Er dette tilfellet, vil funksjonen fordele oppvarmingspotensialet i denne tanken som 1000 kg. Kaldtvannsnivået i denne tanken ( $KVN_n$ ) trekkes så fra det totale kaldtvannsnivået. Alternativt vil ikke hele tanken være full av kaldtvann. I dette tilfellet vil totalt kaldtvannsnivå være under 1000 kg. Det resterende kaldtvannet fordeles i denne tanken. Når hver tank har fått angitt individuelle kaldtvannsnivå, vil funksjonen gå gjennom hver time i prioriteringslisten. Hvis tanken har nok kaldtvann, vil et varmelement være skrudd på hele timen og varme 286 kg ( $MV_n$ ). Den fjerde og siste timen i prioriteringslisten vil varme den resterende massen dersom den er under 286 kg. For en helt kald tank vil dette være omtrent 142 kg. Summen av massene varmet for de kalde tankene hver time i prioriteringslisten vil være totalt masse varmet ( $MV[t_k]$ ). Fordelingen av oppvarming skjer utenfor selve simuleringsløkken, og er ferdigstilt etter en timesverdi.

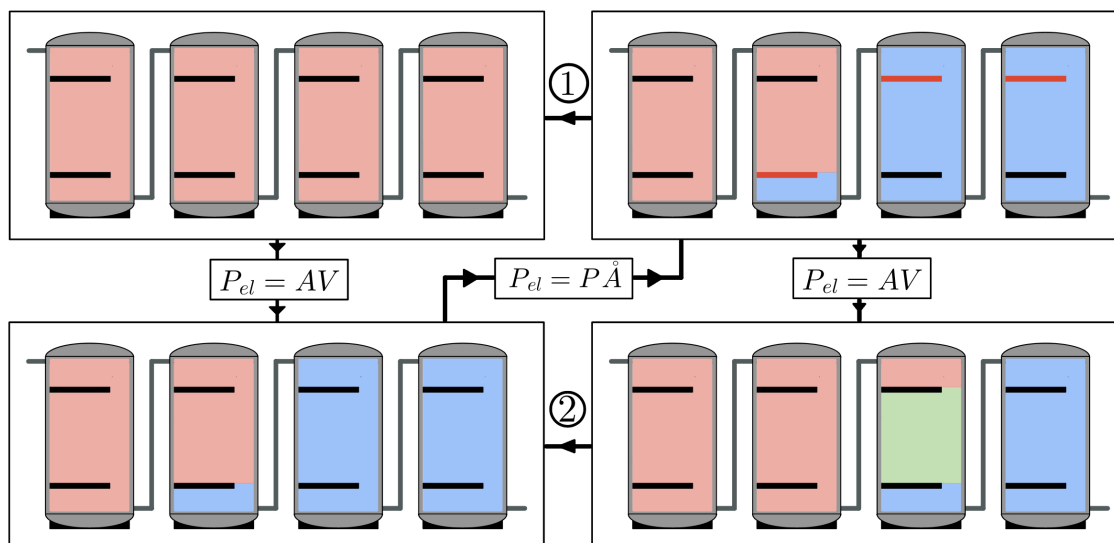
Hvis beredningsplanen initialiseres ( $VVN \leq 1000$ ), vil funksjonen undersøke hvor langt inn i den fjerde tanken den termiske grensen beveger seg. Simuleringen av beredningsplanen opprettholder alltid 1000 kg varmtvann i den fjerde tanken. Varmtvann fra den tredje tanken som forbrukes innenfor timen beredningsplanen initialiseres trekkes dermed fra massen som varmes av den fjerde tanken. Deretter vil massen som varmes være lik massen som forbrukes. Hvis en bereder ikke kan opprettholde 1000 kg varmtvann, antas det at bereder 4 varmer 286 kg og er påskrudd hele timen. Bereder 3 varmer den resterende massen. Hvis varmtvannsforbruket er under 286 kg vil kun den fjerde berederen varme opp denne massen. Denne verdien adderes deretter med massen varmet fra oppvarmingsprosessen hvis timen er i prioriteringslisten. Hvis massen varmet ikke er null, vil varmtvannsnivå beregnes på nytt. Deretter tillates funksjonen å gå videre til neste time.

Etter oppvarmingsprosessen er fullført sjekker funksjonen om de neste timene har en prioritetsverdi på under 12. Dette er ikke illustrert i figur 4.2 og 4.3. Hvis dette er tilfellet vil bereder nummer 1 varme denne massen, frem til første time hvor verdien er over 12. Når oppvarming har blitt fordelt over alle fire berederne for hele datasettet beregnes andelen av hver time berederne har vært på. Den totale tiden og antallet multipliseres så med merkeeffekten, for å få et estimat av nytt elektrisk forbruk for hver time.

### 4.3 Styringsalgoritme for unngåelse av effekttopper

Styringsalgoritmen for unngåelse av effekttopper er basert på forskningsspørsmål nummer 2 fra kapittel 1.3. Forskningsspørsmål 2 innebærer å nekte varmtvannsberedersystemene elektrisk forbruk under de daglige effekttoppene av totalt forbruk på Gardermoen. Denne algoritmen baserer seg først fremst på å indentifisere timer med høyt totalt forbruk for hvert døgn. Etter timesidentifiseringen vil styringsalgoritmen nekte varmtvannsberederne forbruk av elektrisk effekt i de angitte timene. I de resterende timene vil berederne fungere som normalt. Det betyr at varmeelementene skrur på om sensorene detekterer en temperatur under  $T_{utt}$ . Varmeelementene vil så forbli påskrudde, så lenge det er kaldt vann i hver tank og funksjonen tillater strømforbruk. Identifisering av timer som tillater forbruk eller ikke er en essensiell forutsetning for at denne algoritmen skal fungere. Figur 4.4 viser en forenklet skisse av hvordan algoritmen er tiltenkt å fungere i praksis.





FIGUR 4.4: Flytskjema av styringsalgoritmen for unngåelse av effekttopper. Røde varmelementer er påskrudd. Pil 1 og 2 indikerer at forbruksnekt kan forekomme før tankene er helt oppvarmet.

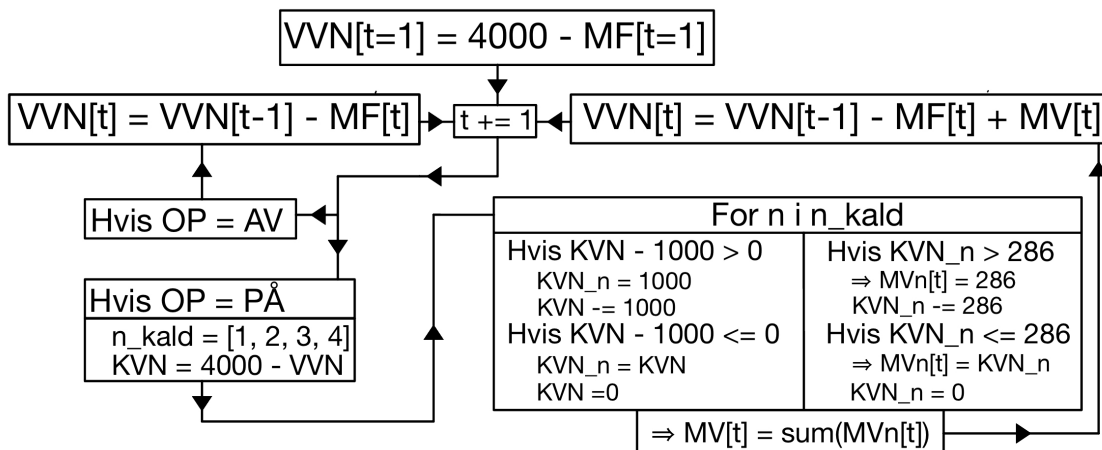
I figuren illustreres tillat forbruk som  $P_{el} = P_{\dot{A}}$ , og forbruksnekt som  $P_{el} = AV$ . Ved timer med forbruksnekt vil tankene tømmes for varmtvann. Berederne tillater oppvarmingsprosessen så lenge  $P_{el} = P_{\dot{A}}$ . Dette betyr at tankene ikke nødvendigvis er helt fulle før elektrisk forbruk tillates igjen. Dette er illustrert ved løkke nummer 2 i figur 4.4. Alternativt varmes alle tankene helt opp, og opprettholder dette nivået til strømforbruk ikke tillates igjen. Dette er illustrert ved løkke nummer 1 i figuren. Denne algoritmen har ikke en innebygd beredskapsløsning.

Tidspunktene som er ønskelig å unngå kan deles opp i to hovedkategorier. De mest ugunstige tidspunktene er timene som gir de høyeste effekttoppene i løpet av en måned. Grunnen til dette kommer av effektleddet i nettleietariffen. Effektleddet bestemmes av det høyeste forbruket av timeeffekt i løpet av hver måned. En viss sum i kroner legges til for hver kWh/h i den høyeste effekttoppen. Dette er illustrert i tabell 2.1 i delkapittel 2.2.3. Å kutte disse effekttoppene så mye som mulig vil være svært lønnsomt. Den andre kategorien er de daglige effekttoppene i de resterende dagene. De to hovedkategoriene vil som regel overlappe.

For å sikre at de høyeste månedlige effekttoppene kuttes mest mulig, gjøres en vesentlig antagelse i simuleringsfunksjonen. Hver time med høyest månedlig timeeffekt antas det elektriske forbruket til alle fem beredersystemene lik forbruket til system 1. Det anses derfor som mulig å kutte fem ganger det forbruket system 1 har fra det totale forbruket på Gardermoen i løpet av denne timen. Når denne timen er identifisert, beregnes den nye månedlige effekttoppen basert på antagelsen. Deretter sjekkes resten av måneden for timeeffekter av totalt strømforbruk som er større enn den nye effekttoppen. Disse timene angis AV-status, slik at elektrisk forbruk nektes i disse timene. Formålet med dette sikkerhetstiltaket er at å sørge at de aller høyeste toppen kuttes.

De resterende tidspunktene bestemmes deretter på en daglig basis. Disse timene blir relativt enkelt definert som de timene med høyest daglig total effektforbruk, med to begrensninger. Den første begrensningen er at summen for estimert varmtvannsforbruk for disse timene ikke kan overstige

3000 kg. Den andre begrensningen er at det ikke kan være mer enn 20 timer per døgn hvor berederne nektes elektrisk forbruk. Grunnen til dette er at det tar fire timer å varme en enkelt tank fra  $T_{inn}$  til  $T_{ut}$ . Kombinert gjør disse begrensningene en beredningsløsning unødvendig. Når timene hvor det nektes bruk av elektrisk effekt er angitt som av, og de resterende som på, settes simuleringsfunksjonen igang. Figur 4.5 viser et forenklet flytskjema for funksjonen.



FIGUR 4.5: Pseudokode som illustrerer hvordan simuleringsfunksjonen til styringsalgoritmen for unngåelse av effekttopper fungerer.

Simuleringsfunksjonen fungerer på relativ lik måte som i algoritmen i forrige delkapittel. Den starter med å anta full tank før den første timen, og trekker fra massestrøimestimatet ( $VVN[t=1]$ ). Funksjonen fortsetter likt som den forrige for alle timer som nektes forbruk ( $OP=AV$ ). Siden det ikke forekommer oppvarming i disse timene sees det bort fra massen varmet ( $MV$ ). Når funksjonen kommer til en time som tillater strømforbruk ( $OP=PÅ$ ), beregnes kaldtvannsnivå ( $KVN$ ) og fordeles i de ledige tankene ( $KVN_n$ ). Deretter beregnes massen varmet i hver tank for den innegående timen ( $MVn[t]$ ). Summen av massene varmet i hver tank legges så til i beregningen av varmtvannsnivå før løkken går videre til neste time.

Hvor stor andel av hver time hvert enkelt varmeelement har vært skrudd på beregnes etter funksjonen er ferdig, i likhet med den forrige metoden. Den totale tiden multipliseres med merkeeffekten for å finne nytt elektrisk forbruk for varmtvannsberederne i hver time.

## 4.4 Ekstrapolering for totalt berederforbruk

Dette delkapittelet vil gjøre rede for hvordan de resterende beredersystemene inkluderes i resultatberegningene. Det vil også bli presentert hvordan de økonomiske beregningene gjøres ved hjelp av det totale berederforbruket.

### 4.4.1 Beregning av totalt forbruk for beredersystemene

For en mer betydningsfull og omfattende kartlegging av fleksibilitetspotensialet til varmtvannsberedersystemene på Gardermoen, må også systemene uten målinger tas med i beregningene. Å anta likt forbruk av varmtvann for alle systemer vil være høyst usannsynlig, ettersom de er forskjellig dimensjonert og tilknyttet ulike seksjoner. Det mest optimale ville vært å vurdere hvert

enkelt system i konteksten de opererer med. Dette kunne for eksempel blitt gjort ved å sammenlikne de ulike delene av hele flyplassanlegget som systemene leverer varmtvann til. Siden disse systemene ikke innehar egne målinger, vil det være krevende å vurdere hvordan systemene faktisk opererer. Ekstrapoleringen vil derfor gjøres ved å anta likt forbruksmønster med individuelle størrelser ordnet dimensjonert for de ulike systemene. Dette vil være i form av en faktor for hvert system, som justerer det estimerte elektriske forbruket med lastflytting.

Egenskapene oppgitt i tabell 3.1 er det eneste tilgjengelige grunnlaget for å bestemme denne faktoren. Egenskapene tilbyr tre ulike grunnlag for å bestemme denne faktoren. Alternativene er å basere faktoren på totalt volum, totalt tilgjengelig makseffekt, eller en kombinasjon av begge. Siden system 1 har størst totalt volum, vil timeeffekten for system  $x$  være

$$P_x = \frac{V_x}{V_1} P_1, \quad (4.4)$$

justert for volum. Total tilgjengelig merkeeffekt er også størst for system 1. Baseres ekstrapoleringen på dette, vil

$$P_x = \frac{P_{el,x}}{P_{el,1}} P_1. \quad (4.5)$$

Den siste muligheten er å kombinere både merkeeffekt og volum, hvor

$$P_x = \frac{P_{el,x} V_x}{P_{el,1} V_1} P_1. \quad (4.6)$$

For å sørge for at det ikke forekommer tap av komfort på lik linje som for metodene over, må det vurderes om tankene vil tømmes helt med det nye elektriske forbruket. Dette gjøres ved å finne de sammenhengende timene i datasettet som raskest oppnår  $\Sigma m_{vann} \geq 3000$  kg. Deretter beregnes forventet varmtvannsforbruk for disse timene med dimensjonert verdi for hvert system. Dette gjøres på samme måte som i delkapittel 4.1. Fra estimert gjenværende varm vannmasse kan det deretter bestemmes hvilken av disse dimensjoneringsfaktorene som gir en akseptabel tilnærming av nytt forbruk for hvert system. Summen av faktorene som bestemmes for hvert system vil være faktoren for nytt totalt elektrisk forbruk av varmtvannsberedere på Gardermoen. Det nye totale forbruket beregnes ved å multiplisere strømforbruket angitt av lastflyttingsalgoritmene til system 1 med summen av faktorene.

#### 4.4.2 Økonomiske beregninger

Resultatene fra simulert lastflytting benyttes direkte for å vurdere de økonomiske konsekvensene. Algoritmene vil derfor bli sammenliknet gjennom lønnsomhet i et implisitt perspektiv. Simulerte verdier av samlet strømforbruk til alle varmtvannsberederene på Gardermoen benyttes for de økonomiske beregningene. Dette gir et mer betydningsfullt bilde av økonomisk lønnsomhet ved implementering av styringsalgoritmene. Lastflytting innebærer å flytte energiforbruk i tid. Det totale energiforbruket til varmtvannsberederene vil være likt som det tradisjonelle forbruket. Besparelsene kommer av forskjell i spotpris mellom timene med flyttet strømforbruk og eventuelle effekteleddkutt i nettleien.

Som nevnt i kapittel 3.3 har datasettet tilgang på timesbaserte spotpris for hele perioden. Disse verdiene benyttes i sammenheng med det totalforbruket til varmtvannsberederene til å bestemme total kostnad per time. Strømprisberegningen av total kostnad

$$K_{spot,total} = \sum K_{time} = \sum 100K_{spot}P_{time} \quad (4.7)$$

summerer timeskostnadene,  $K_{time}$ . Timeskostnaden beregnes ved å multiplisere timesbasert spotpris,  $K_{spot}$ , med den korresponderende timeeffekten,  $P_{time}$ . Dette gjøres for målte timeeffekter av historisk forbruk, og simulerte timeeffekter under lastflytting.

Besparelsene i effektleddet beregnes ved å først identifisere månedlige effekttopper. De 12 forskjellige timene med månedlige effekttopper indentifiseres av totalforbruket på Gardermoen. Korresponderende totalforbruk av beredersystemene defineres som  $P_{time,topp}$  under hver av disse 12 timene. Deretter fastsettes  $K_{ledd}$ , effektleddet i kr/kW/mnd for timens tilhørende måned som beskrevet i tabell 2.1 under fellesmåling. Total kostnad av effektledd relatert til varmtvannsberederene over perioden

$$K_{ledd,total} = \sum P_{time,topp}K_{ledd} \quad (4.8)$$

defineres som summen av alle månedlige andeler av effektleddet berederene står for. Timene med effekttopper identifiseres individuelt for historiske og hver av de simulerte verdiene. Disse timene er derfor ikke nødvendigvis de samme.

Simuleringene benyttes for å gi mer generell innsikt for eksplisitt utnyttelse. Å utrede de økonomiske konsekvenser for Avinor ved å benytte varmtvannsberederene direkte til eksplisitt fleksibilitet ville vært meget utfordrende. Siden strømforbruket har en relativt lav størrelsesorden kan ikke kapasiteten bys direkte inn på markedene. For at dette skal være tilfellet må kapasiteten sannsynligvis aggregeres opp med flere ressurser. Dette tillater kapasiteten å indirekte tilbys på flere av markedene. Egenskapene til systemene under lastflytting kan gi en indikasjon om hvor egnet systemene er for ulike markeder. Interessant informasjon for deltagelse i ulike markeder er responstid og sammenhengende tid med kapasitet for utkobling av en bestemt effekt. Som nevnt i 2.3.3 har berederteknologien tilnærmet umiddelbar responstid for ut- og innkobling. Simuleringene kan fortelle mer om totale utkoblingstider og korresponderende effekt. Disse resultatene vil brukes til å formulere tre ulike tilbud av daglige garanterte effektkutt over ulike tidsrom.

## Kapittel 5

# Resultater og diskusjon

Alle resultater i denne oppgaven baseres på beredersystem nummer 1. Endringene som forekommer på dette systemet vil presenteres for å demonstrere konsekvensene ved å implementere lastflyttingsalgoritmene på et enkelt system. Estimeringer av massestrøm og varmtvannsnivå tillater en nærmere vurdering av de fysiske begrensningene ved å benytte varmtvannsberederes fleksibilitetspotensial. Strømforbrukskurver forteller til hvilken grad algoritmene oppnår formålene sine. Deretter vil det vurderes hvordan lastflyttingen påvirker det totale strømforbruket på Gardermoen. Tilgjengelig fleksibilitetskapasitet til varmtvannsberederene på Gardermoen demonstreres ved å sammenlikne forbrukskurver og økonomiske beregninger. Uke 26 blitt valgt til å demonstrere lastflyttingens påvirkning over en typisk uke. Dette er den samme uken som figur 3.3 er basert på. Etter at resultatene av algoritmene er presentert vil de sammenliknes. Før resultatene kan presenteres må deler av grunnlaget til oppgaven etableres mer i dybde.

### 5.1 Preliminæranalyse og ekstrapoleringsfaktor

Sentrale funn oppdaget under vurderingen av tilgjengelige data og opplysninger i preliminæranalysen har relevans for resultatene. Funnene fra preliminæranalysen blir gjort rede for i de tre neste underkapitlene. Ekstrapoleringsfaktoren vil også bestemmes før resultatene fra lastflyttingalgoritmene presenteres.

#### 5.1.1 Feilmålinger

Som nevnt tidligere har det blitt oppdaget en del feilmålinger i datasettene, spesielt for elektrisk forbruk av varmtvannsberederene. For at dette ikke skal påvirke simuleringsfunksjonene har datasettet blitt korrigert i noen tidsmålinger. Det er én måling som skaper problemer for begge simuleringene. Denne forekommer 26.03.2023 mellom klokken 01:00 og 03:00. Datasettet har hoppet over en tidsmåling, som sannsynligvis har kommet av overgang fra vintertid til sommertid. For at simuleringsfunksjonene skal fungere har det blitt lagt inn en ny tidsmåling. For målingene som angår varmtvannsberederene er alle verdier i denne timen blitt satt til 0. Det totale strømforbruket for denne timen har blitt antatt til å være likt den foregående timen. Ettersom denne timen beskriver lavt forbruk som foregår på natten, vil dette utgjøre neglisjerbar innvirkning på resultatene.

Det er flere feilmålinger som kun gjelder for datasettet med forbruksmålingene til beredersystem 1. Feilmålingene er nærmere beskrevet i delkapittel 3.3. Av disse er det tre sett av tilfeller som kan skape litt problemer for simuleringsfunksjonene. Lørdag uke 5 er det en periode, fra klokken 12 til 15, som samles opp og oppgis som 75,1 kWh klokken 16. Simuleringene hindres ikke for

denne perioden, og korrigeres derfor ikke. Fra lørdag til søndag i uke 35 er det en periode på et døgn hvor energimålingen resulterer i 266,85 kWh fredag klokken 11. Dette problemet korrigeres på forskjellige måter for å ikke hindre gjennomføring av de ulike simuleringssfunksjonene. I tillegg er det en periode med helt flatt forbruk på 13,16 kWh mellom tirsdag og fredag i uke 36. Estimeringer av massestrøm og nytt forbruk til tidene beskrevet i dette avsnittet bør derfor anses som upålitelige.

### 5.1.2 Forbruksanalyse

Funnene i denne oppgaven er basert på en ideell modell for beredersystemene. Dette muliggjør en mer detaljert vurdering av hvordan forbruket av varmtvann har vært i løpet av den utvalgte perioden. Forklaringene i delkapittel 4.1 og figur 4.1, kan indikere hvor tappet for varmtvann beredersystem 1 har vært til ulike tider. For disse vurderingene sees det bort ifra tilfellene med urealistisk forbruk.

For hele perioden er det kun to reelle timesmålinger hvor strømforbruket til system 1 overgår 30 kWh/h. I løpet av perioden vurdert er det totalt 8466 timesmålinger. Vannet i beredersystem 1 bestod av over 50% varmtvann i 8464 timer. De resterende funnene i den preliminare forbruksanalysen er oppsummert i 5.1.

TABELL 5.1: Tabellen viser resultatene fra den preliminare forbruksanalysen. Den forteller antall og prosentvis andel av målinger innenfor 4 ulike forbruksintervall. Tabellen oppgir også korresponderende intervaller for varmtvannsmengde.

	$0 < P_{\text{time}} < 15$	$15 < P_{\text{time}} < 30$	$30 < P_{\text{time}} < 45$	$45 < P_{\text{time}} < 60$
<b>Antall timer</b>	5840	2622	2	0
<b>Total tid [%]</b>	69,063	31,008	0,02365	0
<b>Varmtvann [kg]</b>	4000 – 3000	3000 – 2000	2000 – 1000	1000 – 0
<b>Varmtvann [%]</b>	100 – 75	75 – 50	50 – 25	25 – 0

Tabell 5.1 forteller at over 69 % av hele perioden var varmtvannsnivået over 75 % i beredersystem 1. Bereder nummer 1 er med tradisjonelt strømforbruk den termokline tanken mesteparten av tiden. Den fjerde berederen har i følge forbruksanalysen aldri vært termoklin. Den termiske grensen har så vidt beveget seg inn i den tredje tanken i løpet av nesten et helt år. Disse funnene viser til at det er betydelig ubenyttet volumkapasitet i system 1. Tankene tappes lite nok til å kunne spare oppvarming av kaldtvann til senere tidspunkt.

### 5.1.3 Varmetap og termokliner

Uten ytterligere målepunkter enn de som har vært tilgjengelige for denne oppgaven er det krevende å fastsette faktiske varmetap. Datasettet med målte strømforbruk for beredersystem 1 kan utnyttes for å gi videre innsikt. Alle forbruksmålinger med nullverdi antas å være feilmålinger, som beskrevet i 3.3. Disse målingene er ekskludert i følgende oppgitte verdier.

Den laveste forbruksmålingen er 0,03 kWh/h. Omtrent 1,67 % av timesmålingene har forbruksverdier under 1 kWh/h. Forbruksverdier under 3 kWh/h forekommer 13 % av timene i datasettet. Tre timer er litt i underkant av 13 % av et døgn. For beredersystem 1 er de tre timene med lavest

gjennomsnittsförbruk mellom 00:00 og 03:00. Timen etter midnatt har et gjennomsnittlig förbruk på 3,4 kWh/h. Mellom 01:00 og 03:00 er gjennomsnittsförbruket omtrent 2,2 kWh/h. Det er rimelig å anta at dette er timene med minst aktivitet på anlegget. De tidligste flyvningene har avgang rundt klokken 06:00. Passasjerer og ansatte vil ankomme et par timer før, som gjør flere folk ankommer flyplassen mellom 03:00 og 04:00. De siste ankomstene er ofte rett før midnatt, som gjør at aktiviteten er litt høyere frem til klokken 01:00. I tillegg er fasiliteter som potensielt kan forbruke varmtvann, eksempelvis toaletter, åpne for allmennheten 24 timer i døgnet. Dette gjør at det kan forekomme varmtvannsförbruk mellom 01:00 og 03:00. Med bakgrunn i disse vurderingene er varmetap under 3 kWh/h en svært rimelig antagelse for beredersystem 1.

Varmetapet mellom klokken ett og tre forekommer når alle tankene er fulle av varmtvann. Høyere temperaturforskjell mellom vannet i tanken og omgivelsestemperatur vil antageligvis føre til høyere varmetap. Siden berederene er knyttet til et større anlegg, som anvist i figur 3.2 vil tilnærmet statisk vann beholde seg i rørene under de laveste förbrukstimen. Som beskrevet i 2.3.2, vil dette føre til høyere varmetap. Antageligvis vil mindre varmetap i rør forekomme under tapping. Når vannet dynamisk, er det enda mer krevende å fastsette varmetap. Vurderingene diskutert ovenfor gjør det rimelig å konkludere at simuleringene gir betydningsfulle resultater, selv om de ikke tar høyde for varmetapene til tankene.

Skal varmtvannsberedere benyttes til lastflytting stratifisering av vannet danne termokliner [39, 44, 45]. Dannelse og opprettholdelse av vannlag med forskjellige temperaturer i mindre vannlagingsmedier er på nåværende tidspunkt et pågående forskningstema. Litteraturen omhandler hvor stabile termiske grenser og termokliner opprettholdes i varmtvannstanker. Ulike størrelser, design og operasjonstemperaturer gjør at det må utvikles kompliserte analyser for å fastsette varmetap på tvers av termokliner [47, 39, 43, 44]. Den ideelle beredermodellen i denne oppgaven antar at dette er helt stabilt.

#### 5.1.4 Vurdering av ekstrapoleringsfaktorer

De ulike dimensjoneringsfaktorene beskrevet med likning 4.4, 4.5 og 4.6 i underkapittel 4.4.1, be- regnes ved hjelp av spesifikasjonene i tabell 3.1. De resulterende faktorene er oppgitt i tabell 5.2.

TABELL 5.2: Tabellen viser resulterende ekstrapoleringsfaktorer for hvert enkelt beredersystem på Gardermoen. Faktorene er dimensjonert etter totalt volum, merkeeffekt og en kombinert verdi av begge.

	System 1	System 2	System 3	System 4	System 5
<b>Totalt volum</b>	1,00	1,00	0,675	0,200	0,450
<b>Merkeeffekt</b>	1,00	1,00	0,750	0,467	0,500
<b>Kombinert</b>	1,00	1,00	0,506	0,093	0,225

Siden alle dimensjonene til system 1 og 2 er like vil begge ha en faktor på 1. Dette samsvarer godt med konteksten til hver av systemene. System 1 og 2 opererer i like seksjoner av flyplassanlegget. Det kan ansees som sannsynlig at de vil ha et relativt likt varmtvannsförbruk. System 3 er tilknyttet en liknende seksjon som 1 og 2. Om dette systemet må levere varmtvann på nivå med de to første systemene vil det være underdimensjonert i et lastflyttingsperspektiv. På samme grunnlag vil ikke dimensjoneringen i denne oppgaven være reell dersom dette er tilfellet. Berederene til

denne seksjonen kan tømmes for varmtvann fordi det ikke tilføres nok varme med dimensjonert strømforbruksverdi. En mulig forklaring på underdimensjoneringen er at dette kan være et eldre system. Siden det ikke eksisterer et datagrunnlag å basere forbruket til system 3 på, antas dette varmtvannsforbruket å være mindre på tross av systemets kontekst. For forbruket tilknyttet beredersystem 4 og 5 er det lite tilgjengelige opplysninger om kontekst. Disse systemene antas å være dimensjonert på lik linje med det første systemet.

De sammenhengende timene med raskest forbruk av 3000kg varmtvann er de seks timene mellom klokken 12:00 til 18:00, 3. juli 2023. Resterende dimensjonert varmtvannsnivå etter disse timene for hver faktor er oppgitt i tabell 5.3.

TABELL 5.3: Tabellen viser gjenværende varmtvannsnivå i beredersystemene etter 6 timer med forbruksnekt. Verdiene forteller hvilken ekstrapoleringsfaktor som resulterer i relativt lik dimensjonering.

	System 1	System 2	System 3	System 4	System 5
<b>Totalt volum [%]</b>	25	25	23,6	18,1	23,6
<b>Merkeeffekt [%]</b>	25	25	15,0	-91,1	15,1
<b>Kombinert [%]</b>	25	25	42,7	61,8	61,8

Som prosentene i tabellen viser, sammenfaller verdiene som er justert for totalt volum best med system 1. Justering etter merkeeffekt vil gjøre at system 4 blir tom for varmtvann lenge før det burde. Siden dette er et svært uønsket utfall, elimineres denne faktoren som et alternativ. I tillegg har de andre systemene lavere varmtvannsnivå enn ønskelig med merkeeffektjustering. Faktoren for kombinert justering underdimensjonerer hvor mye effekt det er mulig å flytte. Dette kan fortsatt være et mulig alternativ, men frigjør mindre lastflyttingskapasitet. På dette grunnlaget konkluderes det dermed at dimensjoneringsfaktoren bør baseres på totalt volum. De totale elektriske forbruksestimeringene for varmtvannsberederene blir derfor justert med summen av volumfaktorene. Timeeffektene for totalt berederforbruk antas derfor å være 3,325 ganger større enn alle målte timeeffekter for system 1.

## 5.2 Maksimal lastflytting

Før simuleringsfunksjonen settes igang tildeles hver time i datasettet en prioriteringsverdi som beskrevet i delkapittel 4.2. Den lengste tiden oppvarmingsprosessen kan ta er omtrent 3,5 timer. Oppvarmingstiden er avhengig av systemenes merkeeffekt. For beredersystem 1 med en merkeeffekt på 15 kW er  $\dot{m}_{varme,max} = 286$  kg/h. Oppvarmingen av helt kalde tanker vil foregå over 4 timesverdier. Disse timesverdiene er de fire timene med lavest prioritetsverdi per måned. For alle månedene i datasettet foregår disse timene i fire av de fem timene mellom klokken 00:00 og 05:00. Et døgn kan deles opp i seks forskjellige firetimersintervaller basert på prioritetsverdi.

TABELL 5.4: Tabellen viser fordelingen av energiforbruk med og uten lastflytting. Fordelingen gjøres over firetimersintervaller basert på prioritetsverdi.

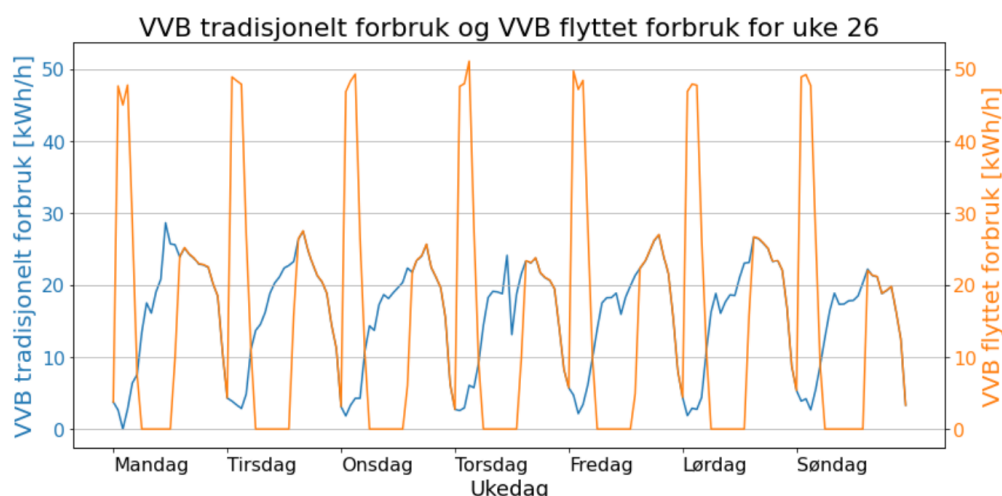
Prioriterte timer	1 - 4	5 - 8	9 - 12	13 - 16	17 - 20	20 - 24
<b>Tradisjonell [%]</b>	4,4	11,0	17,9	20,7	22,9	23,2
<b>Flyttet [%]</b>	61,2	10,7	8,2	4,1	9,1	6,8



Tabell 5.4 viser at styringsalgoritmen har sørget for at over 61 % av av strømforbruket foregår under oppvarmingsprosessen. Dette er en vesentlig forskjell fra 4,4 % med tradisjonelt forbruk. Mye av dette forbruket har blitt flyttet fra timer med prioritetsverdi fra 9 til 24. Tabellen forteller at omtrent 39 % av oppvarmingen skjer utenfor oppvarmingsprosessen. Denne oppvarmingen kommer primært av beredskapsløsningen.

### 5.2.1 Endring for beredersystem 1

En detaljert illustrering av hvordan strømforbruket til beredersystem 1 endres under eksempe-luken ved denne algoritmen er presentert i figur 5.1. Elektriske forbruksmønstre er plottet over hverandre med like akser for en effektiv sammenlikning. Tradisjonelt forbruk for system 1 presenteres med blå forbrukskurve. Dette er det reelle historiske strømforbruket i uke 26. Den oransje kurven er simulert elektrisk berederforbruk ved implementering av styringsalgoritmen.



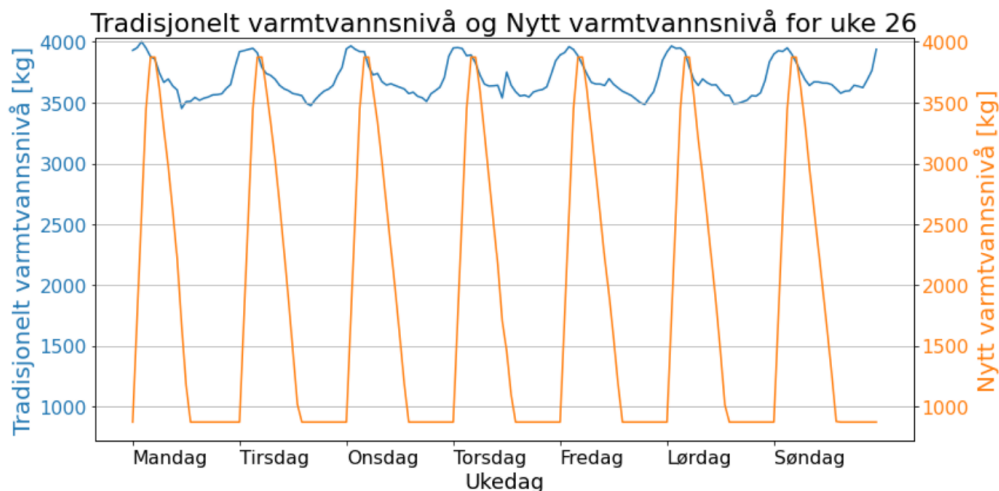
FIGUR 5.1: Figuren viser forbruksmønstre til varmtvannsberederne med (oransje) og uten (blå) lastflytting for uke 26. Figuren illustrerer hvordan styringsalgoritmen for maksimal lastflytting endrer forbrukskurven til beredersystem 1.

Formålet med denne styringsalgoritmen er å sørge for at så mye som mulig av oppvarmingen forgår under timene med lavest månedlig gjennomsnitt av totalforbruk. Siden en bereder holdes i beredskap, betyr dette i praksis at forbruket under minst 3 timer av oppvarmingsprosessen bør være 45 kWh/h. Figuren viser at strømforbruket i tidsrommet mellom 00:00 og 05:00 er godt over dette nivået. Dette kommer av at bereder nummer 4 varmer vann som forbrukes under oppvarmingsprosessen. Grunnen til dette er at beredskapsløsningen alltid er skrudd på. Elsentralen i bereder 4 vil detektere vann under  $T_{ut}$  helt til oppvarmingsprosessen er ferdigstilt.

Beredskapsløsningen er utviklet til å ha en eller to påskrudde varmeelementer. Dette betyr at maksimalt strømforbruk under beredskap er 30 kWh/h. Bereder 3 og 4 må håndtere varmtvannsforbruket på lik linje med det tradisjonelle forbruket. Forskjellen er at kun én tank benyttes til varmtvannslagring istedenfor fire. Figur 5.1 viser at beredskapsplanen fungerer som tiltenkt, ved at det nye forbruket følger det gamle i timene hvor beredskap er aktivert. Forbruket som beredskapsløsningen må håndtere alene er under maksimalkapasiteten på 30 kWh/h for hele uken. Det er rimelig å anta at løsningen er tilstrekkelig til å opprettholde varmtvannsnivå for hele datasettet,

grunnet lav forekomst av strømforbruk over maksimalkapasiteten. Dette er beskrevet nærmere i kapittel 4.2.

Figur 5.2 viser simulert varmtvannsnivå ved tradisjonelt forbruk i blått og ved implementering av styringsalgoritmen i oransje, med like akseverdier. Dette fungerer som en illustrasjon av økt benyttelse av den iboende lagringskapasiteten til tankene.



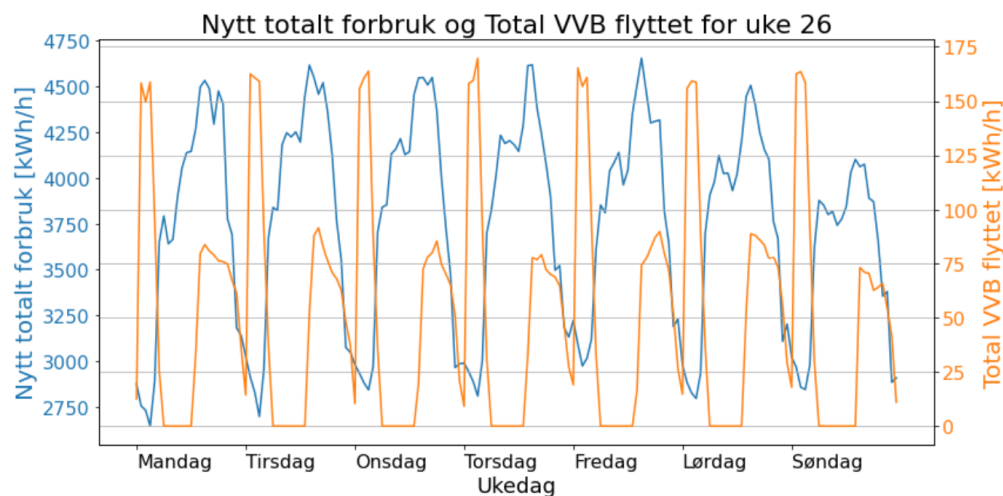
FIGUR 5.2: Figuren viser estimeringer av varmtvannsnivå med (oransje) og uten (blå) lastflytting for uke 26. Y-aksene representerer varmtvannsmengde i tankene. Figuren illustrerer økt utnyttelse tilgjengelig volum ved implementering av styringsalgoritmen for maksimal lastflytting.

Kurvene i figur 5.2 er ikke reelle varmtvannsnivåer. Reelle varmtvannsnivåer vil være krevende å fremstille ettersom datapunktene er timesbaserte verdier. Dette vil diskuteres nærmere i delkapittel 5.5.1. Figuren illustrerer hvordan ved den termiske grensen opprettholdes tidlig i det seriekoblede systemet ved tradisjonell bruksmåte. Under lastflyttingsalgoritmen vil grensen tillates å bevege seg mot enden av systemet. Figuren viser at grensen beveger seg raskt i denne retningen når strømforbruk er skrudd av. Når den ankommer den fjerde tanken i serien vil den opprettholdes der, fremfor den første tanken. Dette illustreres ved de flate delene av den oransje kurven under 1000 kg.

Denne styringsalgoritmen prioriterer å forbruke mest mulig strøm om natten. Den tar ikke hensyn til hvilke tider strømforbruk ikke forekommer i løpet av dagen. Algoritmens formål er å samle opp mest mulig forbruk for oppvarmingsprosessen å håndtere i løpet av natten. Strømforbruket kuttes dermed så fort som mulig etter at oppvarmingsprosessen er ferdigstilt. Dette fører til, som figur 5.1 og 5.2 viser, at beredskapsløsningen aktiveres omtrent midt på dagen. Datasettet viser at dette skjer mellom klokken 13:00 og 15:00 i hverdagene og mellom 15:00 og 16:00 i helgen. For å vurdere algoritmen i et større perspektiv, må det nye forbruket settes i kontekst med totalforbruket på Gardermoen.

### 5.2.2 Endring av totalforbruk

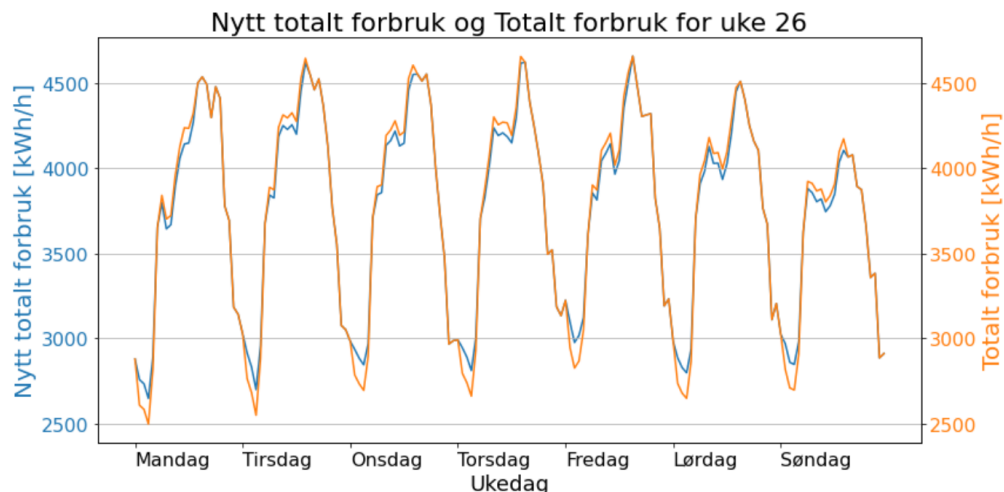
Figur 5.3 viser hvordan totalforbruket på Gardermoen i blått sammenfaller med forbruket til varmtvannsberederne i oransje med simulert lastflytting. Her vurderes totalforbruket til alle beredersystemene ved hjelp av ekstrapoleringsfaktoren funnet i delkapittel 5.1.4. Legg merke til at aksene har ulik størrelsesorden.



FIGUR 5.3: Figuren viser forbruksmønsteret til varmtvannsberederne med maksimal lastflytting mot justert forbruksmønster av totalt strømforbruk på Gardermoen. Størrelsen på y-aksene er ulike.

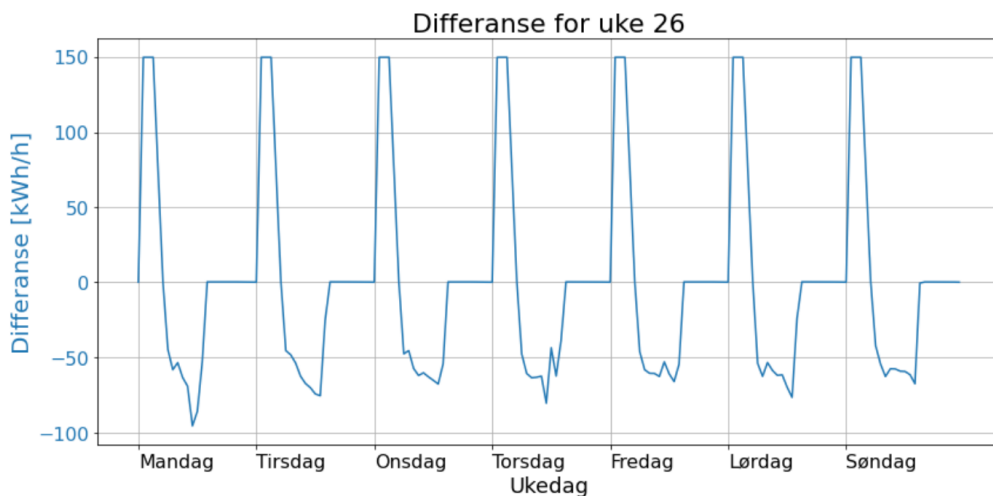
Simuleringen av lastflyttingsalgoritmen har kuttet forbruket til berederne på formiddagen. Beredingsløsningen er ofte aktivert under effekttoppene som forekommer på ettermiddagen. I uke 26 forekommer de høyeste daglige effekttoppene på omtrent samme tidspunkt. En stor andel av det daglige forbruket til berederne har blitt flyttet til timene med lavest forbruk for hvert døgn. Oppvarmingsprosessen startes basert på månedlige gjennomsnitt. For uke 26 sammenfaller dette godt med de reelle timene med lavest forbruk i løpet av uken.

Totalt strømforbruk fra figur 3.3 kan sammenliknes med det i figur 5.3. I figur 5.4 fremstilles påvirkningen lastflyttingen har hatt på forbruksmønsteret til hele flyplassanlegget.



FIGUR 5.4: Figuren viser endringen av forbrukskurven til totalt strømforbruk på Gardermoen etter maksimal lastflytting. Simulert forbruk er presentert i blått og historisk forbruk er presentert i oransje.

Den blå kurven representerer nytt totalforbruk, mens den oransje viser reelt forbruk under tidsperioden. Siden beredskapsløsningen aktiveres utover ettermiddagen er de høyeste daglige effekt-toppene relativt like. De mer betydningsfulle endringene forekommer på formiddagen og natten. Figur 5.4 demonstrerer et forminket forbruk på formiddagen og økt forbruk på natten. En mer detaljert fremstilling av forskjellen mellom forbrukskurvene er presentert i figur 5.5.



FIGUR 5.5: Kurven illustrerer endringer av totalforbruket i uke 26, etter maksimal lastflytting. Negative verdier representerer forbrukskutt. Positive verdier representerer økt forbruk.

Figur 5.5 viser en kurve for differansen mellom tradisjonelt og lastflyttet totalforbruk. Forbruk som har blitt flyttet fra ulike tidspunkt for totalforbruket presenteres som negative verdier. Positive verdier er tidspunkt hvor flyttet forbruk har blitt tilført. Er differanseverdien lik null er det nye totalforbruket likt det gamle. Figuren viser for uke 26 at flere timer kan kutte forbruket med mellom 50 og 75 kWh/h. Tabell 5.5 viser flyttet energiforbruk for uke 26 og hele perioden vurdert.

TABELL 5.5: Tabellen forteller hvor mye energi som har blitt flyttet, både over hele perioden og i uke 26. Den viser også andelen endrede forbrukstimer ved maksimal lastflytting

	Flyttet energi [MWh]	Endrede tidspunkt [%]
<b>Uke 26</b>	3,7	58,6
<b>Totalt</b>	182,3	67,5

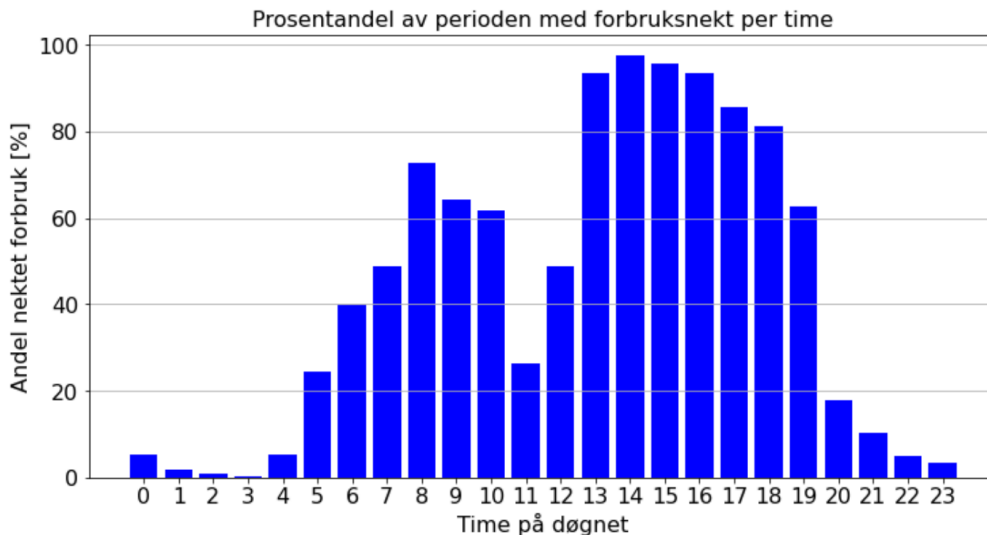
Tabellen forteller at det har blitt flyttet over 180 MWh i løpet av hele perioden. Dette har blitt gjort ved å endre timesforbruket for 67,5 % av alle timene i datasettet. Lastflyttingen i uke 26 utgjør omtrent 2,03 % av det totale flyttede forbruket. Dette er litt i overkant av 1,98 %, som er hvor mye en uke utgjør på hele den vurderte perioden. Forskjellen av prosentvis endrede tidspunkt mellom uke 26 og hele perioden kommer av at varmtvannsforbruket i flere av ukene er lavere. Dette gjør at beredskapsløsningen aktiveres sjeldnere.

### 5.3 Unngåelse av effekttopper

Styringsalgoritmen for unngåelse av effekttopper er avhengig av at timene hvor strømforbruk tillates bestemmes i forkant. For at dette skal fungere reelt må det forekomme predikeringer av totalforbrukskurvene på Gardermoen. På et praktisk nivå betyr dette at styringsalgoritmen har forutbestemte timesverdier som nektes forbruk for hvert døgn. Det antas dermed at predikeringsmodeller av totalforbruket med tilstrekkelig grad av nøyaktighet er tilgjengelige for styringsalgoritmen. I simuleringen benyttes det historiske forbruket over vurderingsperioden som predikerte timesverdier.

I delkapittel 4.3 beskrives et sikkerhetstiltak som inkluderes i simuleringen. Dette tiltaket øker sikkerhetsmarginen for at de høyeste månedlige effekttoppene kuttet. Tiltaket er strengt tatt ikke nødvendig, ettersom styringsalgoritmen nekter strømforbruk til effekttoppene på daglig basis. Tankene burde ha tilstrekkelig kapasitet til å inkludere alle verdiene med hensyn til algoritmens begrensninger, som beskrevet i 4.3. Formålet med denne oppgaven er å undersøke påvirkningen til styringsalgoritmene i ytterste konsekvens. Sikkerhetstiltaket inkluderes i simuleringen for å sørge for dette. Implementering av tiltaket på reell basis vil innebære prediksjon av månedlige effekttopper og korresponderende varmtvannsforbruk. Ytterligere relevant informasjon om sikkerhetstiltaket er vedlagt i vedlegg A.

Predikering av varmtvannsforbruk må forekomme på daglig basis for fordeling av timer som nektes strømforbruk ved reell implementering. Sammen med prediksjoner av totalforbruk dannes grunnlaget for kravene til fordeling, spesifisert i 4.3. Styringsalgoritmen ville i et reelt scenario benyttet prediksjonsverdiene til å fordele timene ved midnatt hvert døgn. Simuleringsfunksjonen fordeler disse timene på lik linje med denne fremgangsmåten. Den simulerte fordelingen skjer samtidig for hele året. Figur 5.6 angir hvor stor prosentandel av hele perioden hver time som nektes strømforbruk.

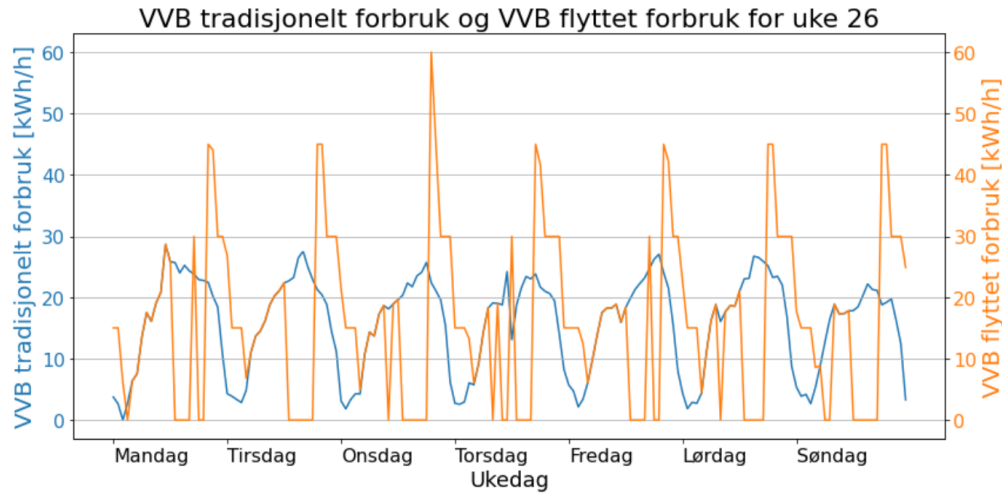


FIGUR 5.6: Figuren viser hvor ofte hver time nektes forbruk over hele den vurderte perioden. Dette er vist som prosentvis andel av den totale forekomsten til hver time. Topper av forbruksnekt dannes fra klokken 07:00 til 11:00 og fra 12:00 til 20:00.

Figuren viser at de høyeste forbrukstimene på Gardermoen sammenfaller relativt godt med time-  
ne med topp effekt i hele kraftsystemet. Nekt av strømforbruk forekommer godt over 50 % av tiden  
mellom klokken 7 og 11. For ettermiddagstoppen mellom klokken 17 og 19, nektes strømforbruk  
over 80 % av tiden. Gardermoen er et spesialtilfelle ved at de daglige interne effekttoppene forkom-  
mer noen timer tidligere enn de eksterne toppene i strømmettet. Timene med høyest forekomst av  
forbruksnekt er mellom klokken 13 og 17. Forbruket til en flyplass er sannsynligvis relativt sær-  
egent i forhold til andre forbrukere. Det er rimelig å anta at strømforbruket er avhengig av generell  
aktivitet og antall reisende på flyplassanlegget. Detaljert data om denne antagelsen er ikke tilgjen-  
gelig.

### 5.3.1 Endring for beredersystem 1

En detaljert illustrering av forbruksendringen til beredersystem 1 under eksempelruken er pre-  
sentert i figur 5.7. Tradisjonelt forbruksmønster er presentert i blått og flyttet i oransje. Figuren  
sammenlikner det reelle forbruket i perioden med simulert forbruk under lastflytting.



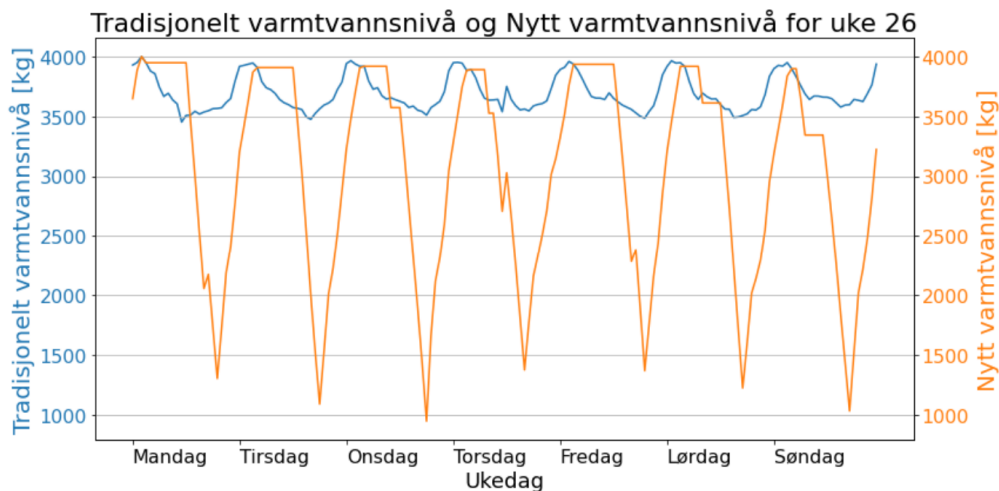
FIGUR 5.7: Figuren viser forbruksmønstre til varmtvannsberederne med (oransje) og uten (blå) lastflytting for uke 26. Figuren illustrerer hvordan styringsalgoritmen for unngåelse av effekttopper endrer forbrukskurven til beredersystem 1.

Formålet med denne styringsalgoritmen er å sørge for at strømforbruk unngås av varmtvannsberederne under de daglige effekttoppene i totalforbruket. Figuren viser til at timene med kuttet forbruk ofte sammenfaller med høyt varmtvannsforbruk. Timene hvor strømforsyningen begrenses av styringsalgoritmen vises med de flate seksjonene med nullverdi av den oransje kurven. De samme timene korresponderer regelmessig med forbrukstopper for det tradisjonelle forbruket. Varmtvannsforbruk kan derfor ansees som relativt korrelert til totalt energiforbruk på Gardermoen. Dette støttes også av figur 5.7. Forklaringen på dette er sannsynligvis at høyere aktivitet på anlegget krever mer varmtvann. Tidspunkter hvor mange reisende befinner seg på flyplassen er de samme som krever mye varmtvann. Disse tidene sammenfaller i høy grad med de hvor det er mest ønskelig å kutte forbruk. Timene hvor forbruket kuttes er uregelmessig fordelt utover hver dag i uke 26. Flere daglige effekttopper kan resultere i at forbruk tillates mellom dem.

Kurven for flyttet forbruk viser store korrigeringer etter perioder med forbrukskutt. Den største korrigeringen i uke 26 er onsdag ettermiddag. I simuleringen har den termiske grensen beveget seg et godt stykke inn i den fjerde berederen i serie. Dette resulterer i at alle beredene leverer maks timeeffekt under denne timen. En mulig forklaring på at styringsalgoritmen har tillatt dette er at varmtvannsforbruket er svært høyt for denne timen. Etter effekttoppene for alle andre dager denne uken har den termiske grensen beveget seg til den tredje tanken i serie. Deretter beveger forbruket seg stykkvis nedover ettersom hver tank oppvarmes. Determinering om forbruksmønsteret vist i figur 5.7 er svært krevende. Siden denne styringsalgoritmen er mer dynamisk enn den forrige, er det nødvendig med mer omfattende målinger for å vurdere den termiske grensens beliggenhet. Denne potensielle feilkilden diskuteres nærmere i 5.5.1. Reelt sett er det tenkelig at forbruket opprettholdes på 45 kWh/h i lengre perioder enn illustrert i figuren. Det totale energiforbruket over oppvarmingsprosessene representeres av arelet under forbrukskurvene. Ved lengre tider med høyere strømforbruk er det fortsatt rimelig å anta at oppvarmingsprosessen er fullført til tidene som anvist i figur 5.7. Når oppvarmingsprosessen er ferdigstilt og forbruk tillates, følger det nye forbruket det gamle. Dette illustreres av overlappende kurver i figuren.

Figur 5.8 representerer varmtvannsnivået under lastflytting for unngåelse av effekttopper. Den

oransje kurven illustrerer hvordan denne styringsalgoritmen utnytter tankenes lagringskapasitet i forhold til tradisjonell metode, anvist i blått.



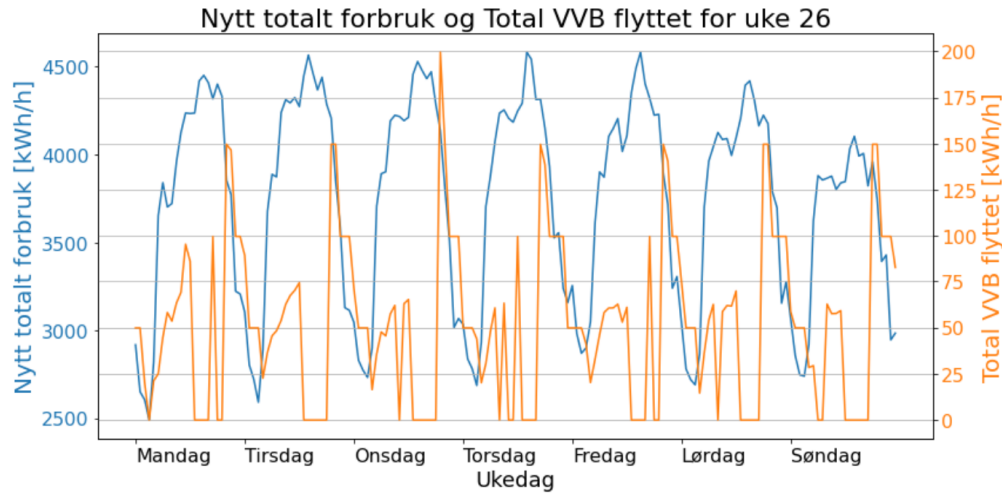
FIGUR 5.8: Figuren viser estimeringer av varmtvannsnivå med (oransje) og uten (blå) lastflytting for uke 26. Y-aksene representerer varmtvannsmengde i tankene. Figuren illustrerer økt utnyttelse tilgjengelig volum ved implementering av styringsalgoritmen for unngåelse av effekttopper

Kurvene i denne figuren representerer varmtvannsnivå på lik linje som beskrevet for figur 5.2. Formålet med figur 5.8 er å illustrere bevegelsen til den termiske grensen under styringsalgoritmen for unngåelse av effekttopper. Figuren viser at, i likhet med tradisjonelt forbruk, opprettholdes grensen tidlig i det seriekoblede systemet. Når forbruket kuttes tillates grensen å bevege seg nærmere enden. Etter disse timene vil algoritmen forsøke å tilbakeføre grensen så raskt som mulig. Grunnlaget til denne oppførselen er at styringsalgoritmen forbereder seg på en eventuell effekttopp. Potensielt kan en ny topp nekte forbruk kort tid etter oppvarming tillates. Algoritmen er konstruert for dette tilfellet. Varmtvannsbereederne vil operere med maksimal tilgjengelig effekt når forbruk tillates.

### 5.3.2 Endring for totalt forbruk

Figur 5.9 viser hvordan det nye det totale berederforbruket (oransje) sammenfaller med totalforbruket på Gardermoen (blå) i uke 26. De vertikale aksene i figuren har ulike størrelsesorden.

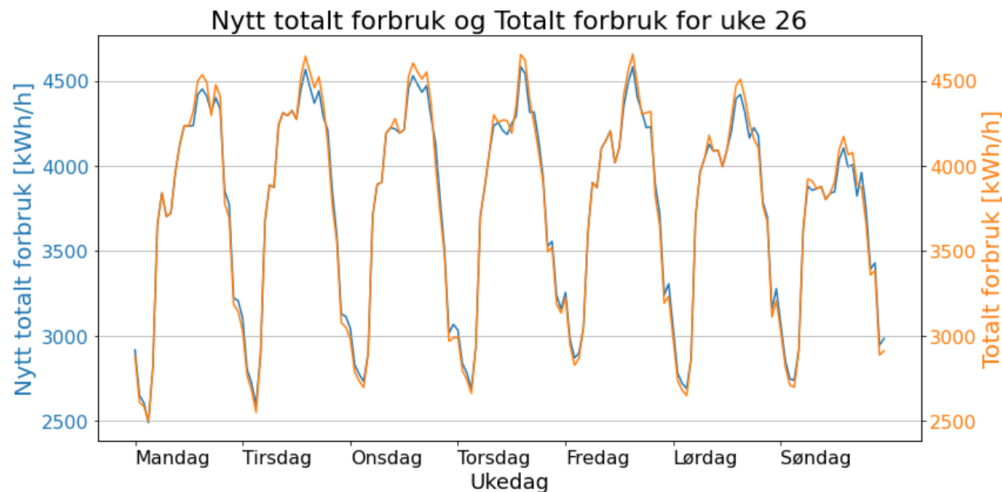




FIGUR 5.9: Figuren viser forbruksmønsteret til varmtvannsberederene ved unngåelse av effekttopper mot justert forbruksmønster av totalt strømforbruk på Gardermoen. Størrelsen på y-aksene er ulike.

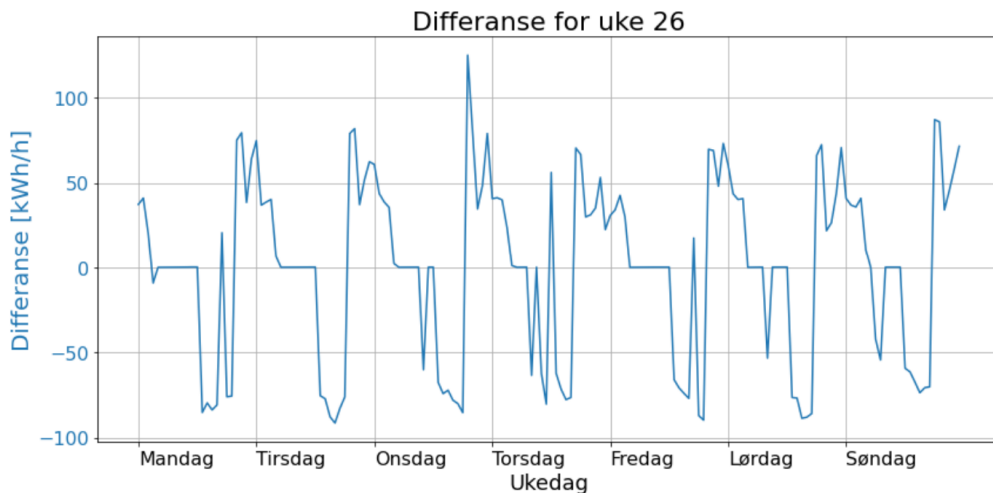
Figuren viser at nullverdier av den simulerte forbrukskurven for berederforbruk sammenfaller godt med effekttoppene til totalforbruket. Dette resulterer i at de store korrigeringsene beskrevet ovenfor finner sted på ettermiddagen. Det er krevende å konkludere hvilke timer som kuttes regelmessig. En direkte vurdering av datasettet forteller at forbruk nektes mellom 13:00 og 17:00 hver dag i uke 26. Strømforbruk tillates hvert døgn mellom 20:00 og 06:00, i tillegg til en time etter klokken 09:00.

Effekttoppen til totalforbruket fredag uke 26 er den høyeste månedlige effekttoppen for juni 2023. Det er svært ønskelig å forminske dette forbruket. Den blå kurven fra figur 5.9 sammenliknes med totalforbruket med den tradisjonelle totalforbrukskurven fra figur 3.3 i figur 5.10.



FIGUR 5.10: Figuren viser endringen av forbrukskurven til totalt strømforbruk på Gardermoen etter unngåelse av effekttopper. Simulert forbruk er presentert i blått og historisk forbruk er presentert i oransje.

Figur 5.10 viser de to totale strømforbrukskurvene over hverandre. Effekttoppen på fredagen har blitt forminskert med denne styringsalgoritmen. Forminskert forbruk forekommer på alle de høyeste daglige effekttoppene i løpet av hele uken. Styringsalgoritmen for unngåelse av effekttopper har dermed oppnådd sitt formål. En mer detaljert fremstilling av forskjellene av totalforbruk for uke 26 presenteres i figur 5.11.



FIGUR 5.11: Kurven illustrerer endringer av totalforbruket i uke 26, etter unngåelse av effekttopper. Negative verdier representerer forbrukskutt. Positive verdier representerer økt forbruk.

Negative verdier av den blå kurven representere forbruk som har blitt flyttet fra korresponderende tidspunkter. Positive verdier representeres hvilke tidspunkter dette forbruket har fordelt seg. Flate andeler av kurven med nullverdi representerer tidspunkter hvor det nye strømforbruket til varmtvannsberederne er likt det gamle. Til tross for kurvens relative uregelmessighet dannes et gjenkjennelig mønster. Mønsteret viser omtrentlige kutt av totalforbruket på 75 kWh/h tidlig på ettermiddagen. Dette forbrukskuttet korrigeres stykkvis utover ettermiddag og kveld.

I simuleringen har ekstrapoleringsverdien vært grunnlaget for estimering av total berederforbruk. Alle månedlige effekttopper forekommer på samme tidspunktene med og uten lastflytting. Tabell 5.6 viser de simulerte effekttoppene i forhold til de historiske.

TABELL 5.6: Tabellen presenterer historiske og simulerte verdier for dato, tidspunkt og timeeffekt av månedlige effekttopper. Tidspunktene med effekttopper var de samme for begge tilfellene.

Dato	Time	Historisk [kWh/h]	Simulert [kWh/h]
22.01.23	18:00	5594,34	5540,94
02.02.23	17:00	5040,01	4991,07
07.03.23	08:00	4968,11	4935,76
25.04.23	14:00	4758,18	4708,17
01.05.23	14:00	4598,25	4546,31
23.06.23	13:00	4722,13	4651,81
10.07.23	16:00	4541,09	4453,21
17.08.23	14:00	4605,46	4535,57
04.09.23	15:00	4608,69	4564,93
29.10.23	17:00	5063,12	5002,37
30.11.23	16:00	5271,84	5221,73
22.12.22	16:00	5301,01	5237,07

Siden de simulerte toppene forgår til samme tid som de historiske, kan det konkluderes at algoritmen har oppnådd sitt formål. I tidspunktene med høyt totalt strømforbruk på Gardermoen har algoritmen sørget for tilnærmet like forbrukskutt tilknyttet beredersystemene. Forminsking av de høyeste månedlige effekttoppene er primærformålet til denne styringsalgoritmen. All annen lastflytting har forekommet med en antagelse om hver daglige effekttopp potensielt vil være den høyeste månedlige. Styringsalgoritmen tar ikke hensyn til strømprisen når den korrigerer for timer med forbruksnekt. Tabell 5.7 viser hvor mye energiforbruk har blitt flyttet og andel av totaltid med endret timesforbruk.

TABELL 5.7: Tabellen forteller hvor mye energi som har blitt flyttet, både over hele perioden og i uke 26. Den viser også andelen endrede forbrukstimer ved unngåelse av effekttopper.

	Flyttet energi [MWh]	Endrede tidspunkt [%]
Uke 26	3,4	73,1
Totalt	175,2	82,8

Tabellen forteller at over 175 MWh har blitt forflyttet til ulike tidspunkt. Forflyttingen har forekommet på 82,8 % av alle timene i hele perioden. Flyttet forbruk under uke 26 utgjør omtrent 1,94 % av det totale flyttede forbruket. Dette er litt i underkant av prosentandelen en uke utgjør på hele perioden.

## 5.4 Sammenlikning av simulerte styringsalgoritmer

Styringsalgoritmene for lastflytting er utviklet med ulike formål. De økonomiske konsekvensene vil redegjøres for med et implisitt perspektiv. I et eksplisitt perspektiv vil algoritmene vurderes

etter potensialet de har til å etterkomme kravene stilt av ulike fleksibilitetsmarkeder. I denne oppgaven er styringsalgoritmene innebygd i hver av simuleringsfunksjonene. For å vurdere algoritmene opp mot hverandre vil det være nødvendig å gjøre rede for hvordan disse funksjonene opererer. Algoritmene vil deretter sammenliknes på generell basis for å vurdere fordeler og ulemper mot hverandre.

### 5.4.1 Implisitt perspektiv

Styringsalgoritmene har primært blitt utviklet med et implisitt tankesett. Implisitte fleksibilitets tiltak kan implementeres mye enklere enn eksplisitte. De eneste begrensingene ved å benytte disse spesifikke varmtvannsberederne til implisitt fleksibilitet er de fysiske begrensingene til systemet. Økonomiske konsekvenser tilknyttet implisitt fleksibilitet kan beregnes direkte ved hjelp av likning 4.7 og 4.8 fra delkapittel 4.4.2. Evaluering av lønnsomhet er en effektiv måte å vurdere styringsalgoritmene opp mot hverandre. Tabell 5.8 viser en oversikt over kostnadsendringene med de ulike styringsalgoritmene.

TABELL 5.8: Tabellen viser total forbrukskostnadene tilknyttet varmtvannsberederne på Gardermoen. Simulerte forbrukskostnader av styringsalgoritmene presenteres mot den reelle. Tabellen deler forbrukskostnadene opp i spotpris og effektledd.

	<b>Tradisjonelt forbruk</b>	<b>Maksimal lastflytting</b>	<b>Unngåelse av effekttopper</b>
<b>Spotpris</b>	71 668,98 kr	64 057,53 kr	68 897,98 kr
<b>Effektledd</b>	40 072,90 kr	10 315,08 kr	0 kr
<b>Totalkostnad</b>	111 741,88 kr	74 372,61 kr	68 897,98 kr

Implementering av begge lastflyttingsalgoritmene har resultert i sparte energikostnader. Algoritmen for maksimal lastflytting har sørget for en årlig besparelse på 7 611,45 norske kroner. Dette har redusert strømkostnaden av varmtvannsberederne med 10,6 %. Den andre algoritmen har sørget for en besparelse på 2 771 kroner. Redusert årlig forbrukskostnad for denne metoden er 3,87 %.

Under den vurderte perioden utgjorde varmtvannsberederne 40 072,90 norske kroner av effektleddet. Styringsalgoritmen med formål om unngåelse av effekttopper har sørget for en besparelse på 100 % av denne summen. Implementering av denne algoritmen resulterer i at strømforbruket til varmtvannsberederen ikke inkluderes i effektleddet. Årlig redusert kostnad av det totale effektleddet er omtrent 1,09 %. Den første algoritmen har sørget for en ny kostnad på 10 315,08 kroner, som er kutt på 74,3 %. Den reduserte kostnaden av det totale effektleddet er omtrent 0,81 %.

Styringsalgoritmen for maksimal lastflytting har resultert i en total besparelse på 37 369,27 kroner. Denne algoritmen presterer best på å spare spotpriskostnader. Styringsalgoritmen med formål om unngåelse av effekttopper har resultert i en totalt besparelse på 42 843,90 kroner. Denne algoritmen presterer best på å spare effektleddkostnader. Den har også resultert i en total besparelse på 5 474,63 kroner mer enn den første algoritmen. Det kan dermed konkluderes at forbrukskutt under effekttopper er mer lønnsomt enn maksimal oppsamling av varmpotensial til lave forbrukstimer i et implisitt perspektiv.

Som beskrevet i 5.3 sammenfaller ikke effekttoppene på Gardermoen nødvendigvis med toppene i kraftnettet. Tilgjengelige ressurser på anlegget som benyttes til implisitt fleksibilitet kan ikke

garantere økt nytteverdi fra systemoperatørens ståsted. Styringsalgoritmen med formål om maksimal lastflytting benytter det ofte strøm under effekttoppene på ettermiddagen. Dette kommer av beredskapsløsningen. Større korrigeringer forekommer etter forbruksnekt med styringsalgoritmen med formål om unngåelse av effekttopper. Disse kan potensielt forkomme under toppene i strømmettet. Dette har større konsekvenser i et nettperspektiv, ettersom timeeffektene kan være betraktelig høyere under korrigeringene enn ved tradisjonelt forbruk. Skal varmtvannsberederene på Gardermoen benyttes til nettavlastning må dette foregå gjennom et eksplisitt perspektiv.

### 5.4.2 Eksplisitt perspektiv

Å utrede de økonomiske konsekvensene for Avinor ved å benytte varmtvannsberederene direkte til eksplisitt fleksibilitet ville vært meget utfordrende. Flexibiliteten berederne har kapasitet til å levere er ikke tilstrekkelig til å by inn på eksisterende markeder. I dette delkapittelet vil egenskapene til systemene diskuteres i en eksplisitt kontekst, som beskrevet i 4.4.2. Dette kan gi en indikasjon om hvor egnet systemene er for en slik utnyttelse. For å benytte berederene i et eksplisitt perspektiv må de delta i en aggregering av flere ressurser. På nåværende tidspunkt har Avinor to muligheter til å benytte berederne eksplisitt. Berederne kan aggregeres opp med andre tilgjengelige fleksibilitetsressurser på flyplassanlegget. De aggregerte ressursene kan deretter bys inn direkte på markedene av Avinor. Alternativt kan de benyttes av en ekstern aggregator. I fremtiden kan det potensielt være mulig å by kapasiteten direkte inn på lokale fleksibilitetsmarkeder.

Hvis disse beredersystemene skal benyttes eksplisitt vil ikke styringen bli utført etter algoritmene utviklet i denne oppgaven. Styringen vil foregå i en helt annen kontekst enn presentert i 5.3. Benyttes berederene slik, kan en modifisert versjon av styringsalgoritmen med formål om unngåelse av effekttopper benyttes. I et systemperspektiv vil utnyttelse av fleksibilitetsressurser som dette primært omhandle håndtering av flaskehals ved redusering av effekttopper. Algoritmen er utviklet for akkurat dette og er mer dynamisk enn den første. Dette gjør den godt stilt for å modifiseres til å håndtere en annen kontekst enn den som har blitt oppgitt i denne oppgaven. Simuleringen av denne styringsalgoritmen kan dermed gi innsikt for hvordan berederne kan benyttes i et eksplisitt perspektiv. Innsikten kommer fra timene som nektes forbruk. I 3,95 % av dagene i datasettet nektes totalt 6 timer forbruk. Dette er det laveste antall timer som nektes forbruk. Gjennomsnittlig totalt berederforbruk i disse timene over hele perioden er 77,9 kWh/h. Maksimal antall tillatte timer med forbruksnekt er 20, som forekommer 5,37 % av alle dagene vurdert. For disse timene er gjennomsnittlig forbruk 21,8 kWh/h. I omtrent 81,4 % av dagene er gjennomsnittlig forbruk under timene med nekt over 40 kWh/h. Med bakgrunn i disse opplysningene kan det foreslås tre tilbud i en eksplisitt sammenheng, som anvist i tabell 5.9.

TABELL 5.9: Tabellen presenterer tre ulike kapasiteter som kan tilbys på reservemarkedene med tilstrekkelig aggregering. Tabellen viser forslag for garanterte effektkutt over visse tidsintervall. Tilbudene har stigende nivå av aggressivitet for effektkutt.

	Antall timer [h]	Effektkutt [kW]
<b>Konservativt</b>	6 til 12	20
<b>Moderat</b>	4 til 8	40
<b>Aggressivt</b>	2 til 4	70

Flere av varmtvannsberederens egenskaper gjør teknologien egnet til å bidra i reservesammenhenger. Elsentralene er som nevnt i 2.3.1 allerede utviklet for momentan endring i tilførsel av elektrisitet. Figur 5.6 forteller at høyt varmtvannsforbruk forekommer relativt ofte under timer med belastet nett. I timer med sammenfall av disse tilfellene kan varmtvannsberedere fungere som en effektiv alternativ ressurs. Dette gjør at aggregerte berederressurser er gode kandidater for å delta i FFR- og FCR-markedene. Hvis funnene i denne oppgaven er sammenliknbare med reell implementering har systemene potensial til å fungere i aFRR- og mFRR-markedene i tillegg. Deltagelse i disse markedene kan i fremtiden gjennomføres via lokale fleksibilitetsmarkeder.

Hvis varmtvannsberederne utstyres med flere målepunkter kan det estimeres hvor mye volum ulike temperatursjikt i tankene består av. I tillegg til å gi et bedre estimat av tilgjengelig varmtvann vil dette gi en indikasjon på hvor mye potensial det kalde vannet har for oppvarming. Dette åpner en helt ny mulighet for fleksibilitetsbenyttelse. Gode indikasjoner på oppvarmingspotensial muliggjør at beredere kan fungere begge reguleringsretningene. Aggregerte berederressurser kan med pålitelige estimeringer avlaste tidspunkter med overproduksjon i strømmettet. Frigjøres begge varmeelementene til å operere samtidig kan varmtvannsberedere fungere svært godt som raske responssystemer i slike tilfeller.

### 5.4.3 Generell sammenlikning av algoritmene

Styringsalgoritmene er utviklet etter forskjellige ønskede formål. Dette resulterer i ulikhetene mellom simulert forbruk presentert i delkapittel 5.2 og 5.3. Begge algoritmene har oppnådd primærformålene sine. Primærformålene går på bekostning av andre hensyn. Styringsalgoritmen med formål om maksimal lastflytting presterer dårlig på unngåelse av effektopper. Algoritmen som er utviklet for unngåelse av disse toppene tillater strømforbruk til andre ugunstige tider på døgnet. En mer optimal styringsalgoritme for implisitte formål kan etableres ved å kombinere sentrale aspekter fra begge algoritmene i denne oppgaven. En kombinert versjon av styringsalgoritmene kan eksempelvis ta utgangspunkt i metoden for å unngå effektopper og bygge inn beredskapsløsningen fra algoritmen for maksimalflytting. Dette tillater flytting av korrigeringsene etter forbruksnekt til timene med lavt totalt strømforbruk på Gardermoen. Det har ikke blitt utviklet en slik metode i denne oppgaven av flere grunner.

En av de mest sentrale grunnene omhandler usikkerhet, som vil diskuteres nærmere i 5.5.1. Usikkerhetene knyttet til den metoden for unngåelse er betydelig større enn metoden for maksimalflytting. Styringsalgoritmen med formål om unngåelse av effektopper er en mye mer spekulativ modell, ettersom den opererer på en mer dynamisk måte enn den algoritmen for maksimalflytting. Usikkerhet, knyttet til reelt varmtvannsnivå ved start av lastflyttingsprosessen, er mye høyere når den termiske grensen opprettholdes i starten av systemet. I tillegg er det krevende å fastsette hvordan oppvarmingen av vannet foreløper seg. Oppvarming i den algoritmen for unngåelse foregår i samsvar med høyere varmtvannsforbruk og med potensielt forskjellige temperatursjikt i tankene. Når tankene varmes på natten er varmtvannsforbruket lavt. Dette gjør at vannet er tilnærmet statisk under oppvarmingsprosessen. Siden lastflyttingen i metoden for maksimalflytting starter med et system fullt av varmtvann er det rimeligere å anta at vannet under den termiske grensen har samme temperatur. Det kan dermed konkluderes at simuleringen av denne algoritmen er mer pålitelig enn algoritmesimuleringen for unngåelse. Under utviklingen har dette blitt gjort intensjonelt.

Styringsalgoritmen med formål om unngåelse av effekttopper har flere forutsetninger for å kunne implementeres reelt enn styringsalgoritmen for maksimalflytting. Disse forutsetningene er primært knyttet til utvikling av pålitelige prediksjonsmodeller for varmtvannsforbruk og totalt strømforbruk på Gardermoen. Uten tilstrekkelig gode predikerte forbruksverdier er det meningsløst å implementere styringsalgoritmen for unngåelse av effekttopper. Algoritmen er dermed mer avansert og fremtidsrettet enn de nåværende forutsetningene tillater. En vesentlig fordel med denne algoritmen er at den er svært modifiserbar. I forrige delkapittel nevnes det at den kan enkelt omgjøres til å unngå effekttopper i strømmettet. Den kan modifiseres etter flere ønskede formål, som for eksempel å unngå timer med høy spotpris. Modifisering vil kun innebære å angi alternative timer for unngåelse av strømforbruk.

Prediksjonsmodeller er ikke nødvendig for styringsalgoritmen med formål om maksimal lastflytting. Den krever betydelig mindre forutsetninger for reell implementering. Installerer enkle styringssystemer som utfører styring etter algoritmen presentert i 4.2 kan denne metoden benyttes på nåværende tidspunkt. Disse styringssystemene må nekte bereder nummer 1 og 2 strømforbruk alle timer etter klokken 05:00 hvert døgn. I tillegg må de sørge for å opprettholde beredskapsløsningen. Dette kan gjøres ved å nekte strømforbruk til bereder nummer 3, med mindre det øvre varmelementet i bereder 4 aktiveres. Dette er relativt enkle tiltak som er svært gjennomførbare.

Styringsalgoritmen med formål om maksimal lastflytting har en ytterligere fordel i et mer fremtidsrettet perspektiv. Dette relateres primært til innføringen av langtidsparkerte elbiler med toveis ladekapasitet som en fleksibilitetsressurs på flyplassenlegget gjennom NeX2G-prosjektet. Beredskapsløsningen representerer i realiteten tidligere strømforbruk tilknyttet varmtvannsberederne. Mer datainnsamling av dagens forbruk vil fastsette om 30 kWh/h er nok for å opprettholde beredskapen. Forbruket til beredskapsløsningen kan dermed antas være under 30 kWh/h med høy grad av forutsigbarhet. Lagret kapasitet i elbilene kan benyttes internt på anlegget til å forsyne beredskapsløsningen. Benyttes dette alternativet i timer med høy strømpris eller under effekttopper, vil interageringen mellom disse to systemene oppnå samme fortjenestene som en optimal styringsalgoritme.

Begge algoritmene har resultert i omtrent like mye flyttet energi. Disse verdiene er oppgitt i tabell 5.5 og 5.7. Styringsalgoritmen for maksimal lastflytting har resultert i mest lastflytting. Flyttingen foregår over færre timer enn for algoritmen for unngåelse. Styringsalgoritmen med formål om å unngå effekttopper har dermed fordelt litt mindre energimengde over flere timer.

## 5.5 Generell diskusjon

### 5.5.1 Evaluering av simuleringsfunksjonene

Begge simuleringsfunksjonene er basert på de samme massestrøimestimatene. Dette er den største feilkilden til resultatene i denne oppgaven. Som beskrevet i 3.3 er det begrenset informasjon i datasettet. Forbruksdata kan fortelle hvor stor andel av hver time hver tank i serien har vært full. Det er ikke mulig å vurdere hvordan hver time fordeler denne tidsperioden. Antageligvis består denne tiden av mange korte perioder med aktivert forbruk. Dette resulterer i et stabilt nivå over timen, som beskrevet i 2.3.1. Det er ingen tilgjengelige datapunkter som forteller om det dannes vannlag med andre temperaturer enn  $T_{ut}$  og  $T_{inn}$ . Siden ingen  $T_{mellom}$  kan bestemmes, antar modellen at alt vannet i tankene er enten  $T_{ut}$  eller  $T_{inn}$ . Dette har store konsekvenser for fremstillingen

av varmtvannsnivå i figur 5.2 og 5.8. Modellen antar at tilført energi har varmet opp en mindre vannmasse til  $T_{ut}$  istedenfor den reelle massen til  $T_{mellom}$ . Dette betyr at den termiske grensen for  $T_{ut}$  har beveget seg lengre i systemet enn anvist i figurene. Estimeringene av massestrøm kommer av hvor stor masse som varmes per time. Basert på funnene i tabell 5.1 er det rimelig å anta at for de fleste timer vil  $T_{mellom}$  være nærmere  $T_{ut}$  enn  $T_{inn}$ . Når varmtvannet forbrukes blandes det med kaldt vann for å få ønsket temperatur til ulike bruksområder. Vannlag med en temperatur på  $T_{mellom}$  kan benyttes om det tilfredsstillende temperaturkravene beskrevet i 2.3.3.

Hvordan temperaturene i vannet reelt fordeler seg internt i tanken skaper ulik grad av usikkerhet for de to simuleringene. For algoritmen med formål om maksimal lastflytting er denne usikkerheten av mindre betydning. Hovedsakelig er usikkerhetsaspektet knyttet til hvor raskt beredningsløsningen aktiveres. Dette kan føre til at reell tid med forbrukskutt kan være mindre enn anvist. Et annet usikkerhetsaspekt er hvor ofte beredningsløsningen benytter to varmeelementer istedenfor en. Basert på forbruksanalysen i delkapittel 5.1.2 er det fortsatt rimelig å anta at beredningsløsningen har tilstrekkelig kapasitet til å sørge for varmtvann. Usikkerheten knyttes til om vannet primært varmes i den tredje eller fjerde tanken. Dette kan føre til at timeeffektene fordeles annerledes i realiteten. I figur 5.8 vil de flate seksjonene av den oransje kurven følge mønsteret til den blå kurven.

Innvirkningen av usikkert varmtvannsnivå er mye større for algoritmen med formål om unngåelse av effekttopper. I simuleringen antas det opprettholdes at det 100 % varmtvann før forbruk nektes. Reelt vil varmtvannsnivået i tanken være lik det tradisjonelle. Dette varmtvannsnivået er fremstilt i blått i figur 5.2. Forklaringene fra andre avsnitt i denne seksjonen gjør at den termiske grensen kan være relativt langt inn i den andre berederen når forbruksnekt starter. Det vil dermed være et vesentlig volum under denne termiske grensen med temperatur  $T_{mellom}$ . Verdien av  $T_{mellom}$  avgjør konsekvensene av dette hvis vannet med  $T_{ut}$  brukes opp. Er  $T_{mellom}$  for lav vil dette sterkt begrense timene hvor forbruksnekt er fysisk mulig. Som beskrevet i 2.3.3 vil dette vannet være mulig å benytte om  $T_{mellom} > 60\text{ °C}$ .

### 5.5.2 Legionella

Retningslinjene for tiltak mot legionellavekst er beskrevet i delkapittel 2.3.3. I følge FHI og Oso Hotwater burde varmtvannstanker opprettholde en temperatur på over  $60\text{ °C}$ . Implementering av styringsalgoritmene denne oppgaven beskriver vil resultere i betydelig kaldere vann enn den anbefalingen over flere timer. Alle tankene oppnår  $80\text{ °C}$  minst én gang per døgn med begge styringsalgoritmene. Når alle tankene er tilstrekkelig oppvarmet bør det sørges for tilstrekkelig sirkulasjon. Oppsamling av slam kan resultere i økt bakterievekst [45]. Dette kan føre til at vedlikehold og grundig rensing bør gjennomføres hyppigere for varmtvannssystemer som benyttes for fleksibilitet.

Cazals et al. viser at varmesjokk ved tilstrekkelig høye temperaturer i opp til fire timer vil unngå helseskadelig bakterievekst [55]. Rapporten konkluderer at fire timer over  $55\text{ °C}$  i løpet av en uke vil hemme oppvekst av bakteriekultur. Basert på funnene fra simuleringene vil dette kravet oppfylles. Det konkluderes dermed at styringsalgoritmene ikke resulterer i økt risiko for helseskadelig legionellasmitte.



### 5.5.3 Varmtvannsberedere i strømmettet

Interessen for å utnytte varmtvannsberedere til fleksibilitet er høy [35]. Flere leverandører har utviklet modeller med innebygde styringssystemer for smartere forbruksmønstre [35, 52]. I forskningslitteraturen fokuseres det primært på systemoperatørens perspektiv og eventuell deltagelse i FRR og FCR markeder [42, 35, 10].

BattFLEX er en del av det storskala demonstrasjonsprosjektet IDE – Intelligent distribusjon av elektrisitet (prosjektnummer 502000848) [35]. I sammenheng med BattFLEX har Oso Hotwater utviklet en styringsalgoritme for nettvennlig aktivering, basert på dynamiske spenningsparametre og markedspris. Denne algoritmen kan benyttes med styringssystemet OSO Charge. Varmtvannsberedere med OSO Charge installert kan opereres av systemoperatører for øyeblikkelige forbrukskutt. Dette tillater en veldig effektiv form for aggregering av berederressurser gjennom digital samhandling. Varmtvannsberederene på Gardermoen er levert av OSO, som kan gjøre de kvalifisert til å delta i denne aggregeringen.

Resultatene fra BattFLEX-prosjektet oppsummeres i rapporten “Nytteverdier fra smarte varmtvannsberedere” [35]. Prosjektet testet 21 beredere dimensjonert for husholdninger. Både volum og merkeeffekt er betydelig mindre enn berederene vurdert i denne oppgaven. Rapporten konkluderer med at implementering vil føre til økte nytteverdier på alle nivå i verdikjeden. Resultatene er sammenliknbare med funnene i denne oppgaven. Videreutvikling av denne styringsalgoritmen kan i følge rapporten tillate deltagelse i FFR-markedet eller benyttes til lokal og regional driftsoptimalisering. BattFLEX ble for dette arbeidet i 2022 innovasjonsprisen til The Norwegian Smartgrid Centre. Enova innførte deretter en støtteordning for privatkunder som ønsker å ta i bruk smarte varmtvannsberedere [56].

## Kapittel 6

# Konklusjon og videre arbeid

### 6.1 Konklusjon

Formålet med denne masteroppgaven har vært å vurdere potensialet for fleksibilitet til industriberedere. Oppgaven har benyttet et spesifikt varmtvannsberedersystem installert på Oslo Lufthavn Gardermoen som et case scenario. Vurderingen har blitt gjennomført ved å utvikle styringsalgoritmer med ulike formål for lastflytting med påfølgende simulering. Simuleringene tar hensyn til de fysiske begrensningene til varmtvannsberederene for å estimere reell tilgjengelig kapasitet. For å vurdere styringsalgoritmene opp mot hverandre beregnes økonomisk lønnsomhet ved implisitt utnyttelse av den tilgjengelige kapasiteten. Styringsalgoritmene er utviklet med bakgrunn i de to forskningsspørsmålene presentert i introduksjonen.

Styringsalgoritmen med formål om maksimal lastflytting er basert på forskningsspørsmål 1. Månedlige gjennomsnitt har vært grunnlaget for å determinere de daglige timene med minst totalt strømforbruk på flyplassanlegget. Algoritmen har oppnådd sitt primære formål ved å tillate tapping av varmtvann uten umiddelbar påfølgende oppvarming. De fysiske begrensningene til berederne håndteres ved å implementere en beredskapsløsning. Denne løsningen opprettholder et forsvarlig varmtvannsnivå frem til oppvarming av hele systemet tillates. Dette har resultert i at strømforbruket tilknyttet varmtvannsberederene i timene med minst totalt strømforbruk på Gardermoen har økt betraktelig. Ved tradisjonelt forbruk foregikk 4,4 % av berederforbruket under disse timene. Ved simulert forbruk har denne andelen økt til 61,2 %. Omtrent 182,3 MWh har blitt flyttet i løpet av hele den vurderte perioden ved å endre berederforbruket i 67,5 % av alle timer. Total besparelse med simulert strømforbruk ble vist til å være 37 369,27 kroner. Dette har blitt oppnådd ved å redusere spotpriskostnadene med 10,6 %, og berederenes andel av effektleddet med 74,3 %.

Styringsalgoritmen med formål om unngåelse av effekttopper er basert på forskningsspørsmål 2. Identifisering av timene med høyest totalt strømforbruk på Gardermoen fungerer som predikering av daglige effekttopper i simuleringen. Algoritmen har oppnådd sitt primære formål ved å nekte varmtvannsberedere strømforbruk under disse timene. Simulert fordeling av timer med forbruksnekt ble begrenset ved å benytte korresponderende estimeringer av varmtvannsforbruk som predikerte forbruksverdier. Dette sørget for at det ble tatt tilstrekkelig hensyn til de fysiske begrensningene. Etter timer med forbruksnekt forekommer store korrigeringer for å varme opp kaldt vann tilført berederene i løpet av denne tiden. Ingen dager nektes forbruk i mindre enn 6 timer over hele den vurderte perioden. Det konkluderes dermed at 6 timer med forbruksnekt er minste tilgjengelige utkoblingstid. Timene med forbruksnekt forekommer hovedsakelig tidlig på

ettermiddagen. Styringsalgoritmen har sørget for å kutte alle daglige effekttopper med all tilgjengelig berederforbruk. Omtrent 175,2 MWh har blitt flyttet i løpet av hele den vurderte perioden ved å endre berederforbruket i 82,8 % av alle timer. Total besparelse med simulert strømforbruk ble vist til å være 42 843,90 kroner. Dette har blitt oppnådd ved å redusere spotpriskostnadene med 3,87 %, og berederens andel av effektleddet med 100 %.

Forskningsspørsmål 2 besvares ved at den relaterte styringsalgoritmen har prestert best på økonomisk lønnsomhet. Det kan dermed konkluderes at det bør prioriteres å kutte effekttopper, ettersom dette er mest lønnsomt for begge algoritmene. Styringsalgoritmen for unngåelse av effekttopper er i tillegg mest dynamisk og modifiserbar. Modifisering innebærer kun å bestemme alternative timer hvor forbruksnekt er ønskelig. Dette gjør den bedre stilt til å fungere for eksplisitt fleksibilitet. Simuleringen av denne algoritmen viste også at berederens kan bidra i reservemarkedene, med forbehold om tilstrekkelig aggregering. På grunn av rask responstid er varmtvannsberedere gode kandidater for FFR- og FCR- markedene. Den største ulempen med styringsalgoritmen for unngåelse av effekttopper er at reell implementering ikke er mulig på nåværende tidspunkt. Algoritmen forutsetter at forbruksprediksjoner av strøm og varmtvann er tilgjengelig. Styringsalgoritmen for maksimal lastflytting er i motsetning svært implementerbar med nåværende forutsetninger, som er en vesentlig fordel med denne algoritmen.

En rekke sentrale antagelser og estimeringer gjøres for å tillate tilstrekkelig omfattende simuleringer. Primært innebærer dette estimeringer av varmtvannsforbruk og ekstrapolering av forbruket til varmtvannsberedere på flyplassanlegget uten målinger. Dette representerer potensielle feilkilder i resultatene.

## 6.2 Videre arbeid

De potensielle feilkildene i oppgaven gjør at det er krevende å fastsette hvor sammenliknbare simuleringene er med reell implementering. Det burde derfor forekomme fysisk testing av systemene for å vurdere simuleringene. Dette kan gjøres relativt enkelt eller mer omfattende. Det presenteres to forslag for å evaluere simuleringene i følgende avsnitt.

En svært enkel test kan gjøres av beredersystem 1 uten installering av ytterligere målepunkter. Testen vil innebære å skru av strømtilførselen til de tre første berederene i serien. Deretter måles kun tiden det tar før den fjerde berederen aktiveres. Gjennomføres denne testen til ulike tidspunkt på døgnet kan denne tiden sammenliknes direkte med de liknende simulerte tider for mulig forbrukskutt. For test av den første styringsalgoritmen kan dette gjøres tidlig på morgningen. Den andre algoritmen kan testes ved tider med høy aktivitet på flyplassen.

Mer omfattende testing bør innebære installering av flere målepunkter. Massestrømmålere kan direkte vurdere om estimeringen denne oppgaven gjør av varmtvannsforbruk er tilnærmet reell. Installering av flere temperatursensorer kan bidra til å vurdere stabiliteten til den termiske grensen, og varmetap på tvers av vannlag.

Annet videre arbeid kan forkomme uten fysisk testing. Dette kan innebære å kombinere styringsalgoritmene utviklet i denne oppgaven. En kombinert styringsalgoritme vil i teorien gi de høyeste besparelsene for begge kostandene presentert i denne oppgaven. Eventuelt kan styringsalgoritmen for unngåelse av effekttopper modifiseres til å unngå timer for andre formål. Eksempelvis

kan dette gjøres for spotpris istedenfor timer med høyt forbruk. En mer direkte vurdering mot reservemarkedene er også nødvendig.

## Vedlegg A

# Sikkerhetstiltaket

TABELL A.1: Tabellen viser de beregnede verdiene algoritmen for unngåelse av effektopper gjør for sikre forbrukskutt ved daglige effektopper

Dato	Time	Total [kWh/h]	VVB [kWh/h]	Total VVB [kWh/h]	Ny total [kWh/h]
22.01.23	18:00	5594,34	16,06	80,30	5514,04
02.02.23	17:00	5040,01	14,72	73,6	4966,41
07.03.23	08:00	4968,11	9,73	48,65	4919,46
25.04.23	14:00	4758,18	15,04	75,20	4682,98
01.05.23	14:00	4598,25	15,62	78,10	4520,15
23.06.23	13:00	4722,13	21,15	105,75	4616,38
10.07.23	16:00	4541,09	26,43	132,15	4408,94
17.08.23	14:00	4605,46	21,02	105,10	4500,36
04.09.23	15:00	4608,69	13,16	65,8	4542,89
29.10.23	17:00	5063,12	18,27	91,35	4971,77
30.11.23	16:00	5271,84	15,07	75,35	5196,49
22.12.22	16:00	5301,01	19,23	96,15	5204,86

## Vedlegg B

# Python programmer

TABELL B.1: Tabellen oppgir linker med relaterte hash for tilgang på programmene utarbeidet i sammenheng med masteroppgaven

<b>Filnavn</b>	<b>Link</b>	<b>Commit hash</b>
Maks flytting.py	<a href="#">Github</a>	89bf827
Preliminær.py	<a href="#">Github</a>	429c14d
Unngåelse av effektopp.py	<a href="#">Github</a>	42656d9

# Bibliografi

- [1] Paul J Crutzen. «The “anthropocene”». I: *Earth system science in the anthropocene*. Springer, 2006, s. 13–18.
- [2] Christoph Böhringer. «The Kyoto protocol: a review and perspectives». I: *Oxford Review of Economic Policy* 19.3 (2003), s. 451–466.
- [3] United Nations Framework Convention on Climate Change. *The Paris Agreement - Publication*. Publication date: 29 Nov 2018. Conference: Paris Climate Change Conference - November 2015, Session: COP 21. Nov. 2018. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>.
- [4] Energikommisjonen. *Mer av alt - raskere*. <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/nou-2023-3/id2961311/>. Hentet: [2023-09-09]. 2023.
- [5] Strømnettutvalget. *Nett i tide – om utvikling av strømmettet*. <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/nou-2023-3/id2961311/>. Hentet: [2023-09-09]. 2023.
- [6] Gerd Kjølle. *Fleksibilitet i strømmettet - hva er det og hvorfor trenger vi det?* <https://blogg.sintef.no/sintefenergy-nb/fleksibilitet-i-stromnettet-hva-er-det-og-hvorfor-trenger-vi-det/>. Hentet: [2023-09-01]. 2021.
- [7] Hallgeir Horne og Aleksandra Roos og Ingrid Helene Magnussen og Magnus Buvik og Benedicte Langseth. *Norge har et betydelig potensial for forbrukerfleksibilitet i sektorene bygg, transport og industri*. 7/2020. Hentet: [2023-10-13]. NVE, 2020. URL: [https://publikasjoner.nve.no/faktaark/2020/faktaark2020\\_07.pdf](https://publikasjoner.nve.no/faktaark/2020/faktaark2020_07.pdf).
- [8] David Mohler og Daniel Sowder. «Energy Storage and the Need for Flexibility on the Grid». I: *Renewable energy integration*. Elsevier, 2017, s. 309–316.
- [9] Paul Denholm og Trieu Mai. «Timescales of energy storage needed for reducing renewable energy curtailment». I: *Renewable energy* 130 (2019), s. 388–399.
- [10] B Tennbakk mfl. «Value of flexibility from electrical storage water heaters». I: *Thema: Oslo, Norway* (2020).
- [11] Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. *Nettbalansering fra store parkeringsanlegg og næringsbygg - NeX2G*. <https://nmbu.no/forside/prosjekter/nex2g>. Hentet: 2023-05-12. 2021.
- [12] Lizette De La Peña mfl. «Accelerating the energy transition to achieve carbon neutrality». I: *Resources, Conservation and Recycling* 177 (2022), s. 105957.
- [13] Jinfang Tian mfl. «Global low-carbon energy transition in the post-COVID-19 era». I: *Applied energy* 307 (2022), s. 118205.
- [14] Regjeringen. *Norsk vannkraftshistorie på 5 minutter*. <https://www.regjeringen.no/no/tema/energi/fornybar-energi/norsk-vannkraftshistorie-pa-fem-minutter/id2346106/>. Hentet: 2024-01-10. 2023.

- [15] Muswellbrook Energy. *Quarterly report*. MEM, 1987.
- [16] Statnett. *Fakta om prisområder*. <https://www.statnett.no/om-statnett/bli-bedre-kjent-med-statnett/om-strompriser/fakta-om-prisomrader/>. Hentet: 2024-01-10. 2024.
- [17] Statnett. *Introduksjon til reservemarkedene*. <https://www.statnett.no/for-aktorer-i-kraftbransjen/systemansvaret/kraftmarkedet/reservemarkeder/introduksjon-til-reserver/>. Hentet: 2023-12-29. 2023.
- [18] BKK. *Bli kjent med strømmettet*. <https://www.bkk.no/om-bkk/bli-kjent-med-stromnettet>. Hentet: 2024-01-10. 2024.
- [19] NVE. *Om kraftmarkedet og det norske kraftsystemet*. Hentet: 10.01.2024. 27.02.2015. URL: <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten/kunde/om-kraftmarkedet-og-det-norske-kraftsystemet/>.
- [20] Elvia. *Om oss*. <https://www.elvia.no/hva-er-elvia/om-oss/>. Hentet: 2024-01-10. 2024.
- [21] Statnett. *Fleksibilitet som kilde til verdiskaping og forretningsutvikling*. <https://www.statnett.no/contentassets/3c42c9b85bb04a7b944fe6884284a959/fleksibilitet-som-kilde-til-verdiskaping-og-forretningsutvikling.pdf>. Hentet: [2023-10-13]. [2023].
- [22] Hanne Sæle. *Når er det riktig å bruke fleksibilitet i kraftsystemet?* <https://blogg.sintef.no/sintefenergy-nb/nar-er-det-riktig-a-bruke-fleksibilitet-i-kraftsystemet/>. Hentet: 2024-01-10. 2021.
- [23] Statnett. *Strømmettet i Innlandet må fornyes og oppgraderes*. <https://www.statnett.no/om-statnett/nyheter-og-pressemeldinger/nyhetsarkiv-2023/stromnettet-i-innlandet-ma-fornyes-og-oppgraderes/>. Hentet: 2024-01-10. 2023.
- [24] Sadam Hussain, Chunyan Lai og Ursula Eicker. «Flexibility: Literature review on concepts, modeling, and provision method in smart grid». I: *Sustainable Energy, Grids and Networks* (2023), s. 101113.
- [25] Niklas Modig mfl. «Overview of Frequency Control in the Nordic Power System». I: *Nordic Analysis Group* (2022).
- [26] Elvia. *Nettleiepriser og effekttariff for bedrifter med årsforbruk over 100.000 kWh*. <https://www.elvia.no/nettleie/alt-om-nettleiepriser/nettleiepriser-og-effekttariff-for-bedrifter-med-arsforbruk-over-100000-kwh/>. Hentet: 2023-12-18. 2024.
- [27] Asmund Jenssen mfl. *Aggregatorollen og fleksibilitetsmarkeder og forretningsmodeller i energisystemet*. ENA-17-01 2017-20. Tilgjengelighet: Offentlig. THEMA Consulting Group, des. 2017.
- [28] NODES. *Market Design*. Hentet: 2023-12-18. 2023. URL: <https://nodesmarket.com/market-design/>.
- [29] Statnett. *NORFLEX*. Hentet: 2023-12-18. 2020. URL: <https://www.statnett.no/om-statnett/innovasjon-og-teknologiutvikling/vare-sentrale-prosjekter/norflex/>.
- [30] Statnett. *Lokale fleksibilitetsløsninger testes i Statnetts regulerkraftmarked*. <https://www.statnett.no/for-aktorer-i-kraftbransjen/nyhetsarkiv/lokale-fleksibilitetslosninger-testes-i-statnetts-regulerkraftmarked/>. Hentet: 2023-12-18. 2022.
- [31] European Commission. *Hydrogen*. [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en). Hentet: 2024-01-02. 2023.
- [32] Michel Armand mfl. «Lithium-ion batteries—Current state of the art and anticipated developments». I: *Journal of Power Sources* 479 (2020), s. 228708.



- [33] Mario Marinaro mfl. «Bringing forward the development of battery cells for automotive applications: Perspective of R&D activities in China, Japan, the EU and the USA». I: *Journal of Power Sources* 459 (2020), s. 228073.
- [34] Peakshaper. *Batterisystemer i storskala*. <https://www.peakshaper.no>. Hentet: 2024-01-02. 2023.
- [35] Alf Inge Tunheim mfl. «Value of grid friendly flexibility from smart water heaters». I: *SmartGrid-senteret-Rapport* (2022).
- [36] AK Kar og KM Al-Dossary. «Thermal performances of water heaters in series». I: *Applied energy* 52.1 (1995), s. 47–53.
- [37] Oso Hotwater AS. *Industriberedere Serie 17 og 18: Montasje, Bruksanvisning og Reservedeler*. Mai 2015.
- [38] Minsung Kim, Min Soo Kim og Jae Dong Chung. «Transient thermal behavior of a water heater system driven by a heat pump». I: *International journal of refrigeration* 27.4 (2004), s. 415–421.
- [39] S Vannerem, P Neveu og Q Falcoz. «Experimental and numerical investigation of the impact of operating conditions on thermocline storage performance». I: *Renewable Energy* 168 (2021), s. 234–246.
- [40] MS Naghavi mfl. «On-demand dynamic performance of a thermal battery in tankless domestic solar water heating in the tropical region». I: *Applied Thermal Engineering* 167 (2020), s. 114790.
- [41] Grant Bourke, Pradeep Bansal og Robert Raine. «Performance of gas tankless (instantaneous) water heaters under various international standards». I: *Applied energy* 131 (2014), s. 468–478.
- [42] Venkatachalam Lakshmanan, Hanne Sæle og Merkebu Zenebe Degefa. «Electric water heater flexibility potential and activation impact in system operator perspective–Norwegian scenario case study». I: *Energy* 236 (2021), s. 121490.
- [43] S Vannerem, P Neveu og Q Falcoz. «Thermal cycle performance of thermocline storage: numerical and experimental exergy analysis». I: *Energy* 278 (2023), s. 127647.
- [44] Philipp Roos og Andreas Haselbacher. «Thermocline control through multi-tank thermal-energy storage systems». I: *Applied Energy* 281 (2021), s. 115971.
- [45] Folkehelseinstituttet. *Interne vannfordelingsnett som forsyner dusjer og andre aerosoldannende tappepunkter*. <https://www.fhi.no/ss/legionella/legionellaveilederen/temakapitler/interne-vannfordelingsnett-som-forsyner-dusjer-og-andre-aerosoldannende-tappepunkter/?term=>. Hentet: 2024-01-03. 2020.
- [46] Ruisheng Diao mfl. «Electric water heater modeling and control strategies for demand response». I: *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. 2012, s. 1–8. DOI: [10.1109/PESGM.2012.6345632](https://doi.org/10.1109/PESGM.2012.6345632).
- [47] Valeria Palomba og Andrea Frazzica. «Application of numerical methods for the design of thermocline thermal energy storage: Literature review and critical analysis». I: *Journal of Energy Storage* 46 (2022), s. 103875.
- [48] U.S. Department of Energy. *Electric Resistance Heating*. <https://www.energy.gov/energysaver/electric-resistance-heating>. Hentet: 2024-01-13. 2023.

- [49] Ibrahim Dincer. «1.7 Energy and Exergy Efficiencies». I: *Comprehensive Energy Systems*. Red. av Ibrahim Dincer. Oxford: Elsevier, 2018, s. 265–339. ISBN: 978-0-12-814925-6. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00123-1>.
- [50] *Electric Resistance Tank Water Heaters*. <https://esource.bizenergyadvisor.com/article/electric-resistance-tank-water-heaters>. Hentet: 2024-01-13.
- [51] Wassim Salameh mfl. «On the optimization of electrical water heaters: Modelling simulations and experimentation». I: *Energies* 14.13 (2021), s. 3912.
- [52] Høiax Systems. *Alt om legionella og temperatur i varmtvannsberederen*. <https://www.hoiax.no/om-hoiax/articles/produktnyheter/alt-om-legionella-og-temperatur-i-varmtvannsberederen>. Hentet: 2024-01-13. 2023.
- [53] ML Di Silvestre mfl. «Flexibility of grid interactive water heaters: The situation in the US». I: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 182 (2023), s. 113425.
- [54] Donald Howard Menzel. *Fundamental formulas of physics*. Bd. 1. Courier Corporation, 1960.
- [55] Margot Cazals mfl. «Compromised effectiveness of thermal inactivation of *Legionella pneumophila* in water heater sediments and water, and influence of the presence of *Vermamoeba vermiformis*». I: *Microorganisms* 10.2 (2022), s. 443.
- [56] Enova. *Smart varmtvannsbereder*. <https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/smart-varmtvannsbereder/>. Hentet: 2024-01-13.



**Norges miljø- og biovitenskapelige universitet**  
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet  
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
Norway