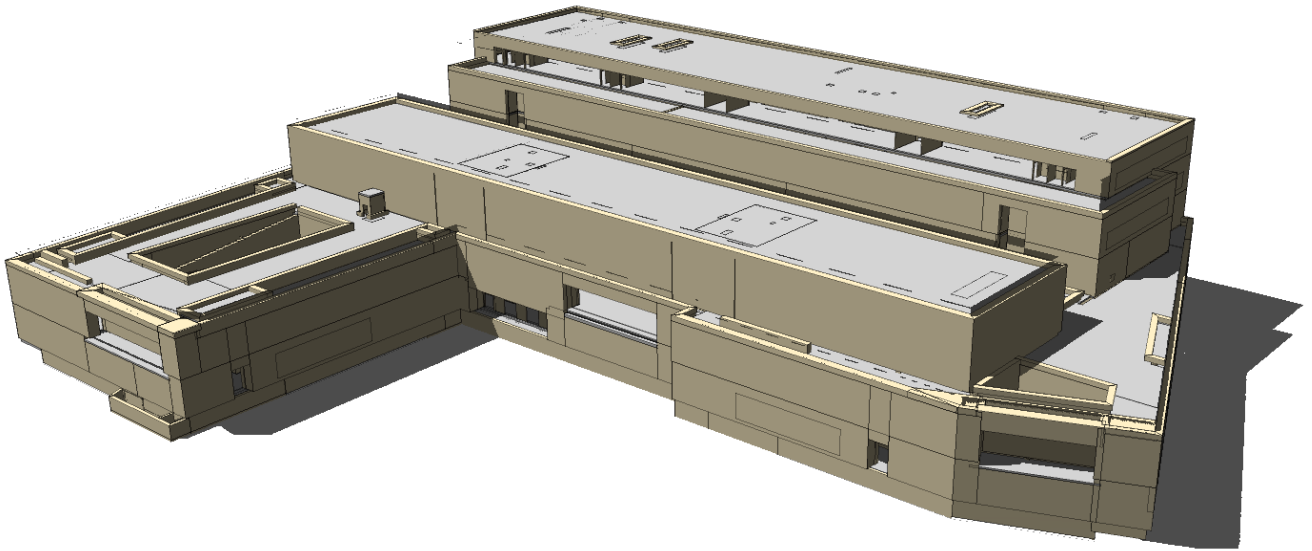


BIM I ENERGI- OG INNEKLIMABEREGNINGER



DEL 2: DETALJERT SIMULERING AV ENERGISENTRALER

Rapporten er utarbeidet av:



På oppdrag for:



OSLO: Postboks 4464 Nydalen, 0403 Oslo Telefon: 22 02 63 00		<h2>RAPPORT</h2>
LILLEHAMMER: Elvegata 19, 2609 Lillehammer Telefon: 61 27 59 00		
SKIEN: Lyngbakkveien 5, 3736 Skien Telefon: 35 58 85 00		
Epost: firmapost@erichsen-horgen.no www.erichsen-horgen.no Foretaksreg.: NO 929 308 697 MVA		
EH OPPDRAGSNUMMER	DOKUMENTNUMMER	OPPDRAGSGIVERS KONTAKTPERSON
10911	02	Ann-Magritt Larsen Glømmen og Øystein Graffer
DATO	UTARBEIDET AV	
03.07.2014	Kristian H. Kluge og Arnkell J. Petersen	
ISBN	SIDEMANNSKONTROLL og EH GODKJENNING	
978-82-92982-05-1	Arnkell J. Petersen	

SAMMENDRAG

På vestbanen i Oslo skal Statsbygg prosjektere og bygge et nytt nasjonalmuseum på oppdrag fra Kulturdepartementet. Prosjektet bruker BIM som et integrert verktøy i prosjekterings- og byggefasen. Sideløpende med Prosjekt Nytt Nasjonalmuseum, PNN, gjennomfører Statsbygg et FoU-prosjekt som har til formål å undersøke og videreutvikle bruken av BIM i energi- og inneklimatesting. Statsbygg ønsker derved å løfte frem bruken av BIM i prosjektering av bygg mht. optimalisering av arbeidsprosessen mellom de relevante aktørene.

Denne rapport er en delrapport i dette FoU-prosjekt, hvor formålet er å løfte dynamisk simulering av energisentraler frem som en mulig teknikk for optimalisering av energiforsyningsløsninger mht. valg av komponenter, systemer, temperaturnivåer m.m. I dette prosjektet er det dynamiske simuleringstøytet IDA ICE benyttet for å simulere energiforsyningsløsningen.

Det er i utgangspunktet to mulige framgangsmåter for å simulere energiforsyningsløsninger med IDA ICE. Den ene er å benytte prefabrikkerte energiforsyningsmoduler, den andre er å bygge sentralen fra bunnen av, med alle nødvendige komponenter og styringssekvenser. Sistnevnte er tidkrevende og krever høy brukerkompetanse. Ved å benytte de prefabrikkerte modulene går det raskt å bygge opp sentralen, samtidig som energiforsyningsmodulene virker gode. Det virker derfor mest fornuftig å benytte de prefabrikkerte modulene, dersom IDA ICE skal benyttes ved optimalisering av energiforsyningsløsningen i reelle prosjekter, særlig i tidlig fase. Ved bruk av ESBO sentral blir beregningsmodellen kompleks og simuleringstiden lå på ca. 1 t og 50 min. Ved praktisk anvendelse virker denne simuleringstiden noe lang.

Styringssekvensen i ESBO virker lovende, men noe unyansert. I simuleringene framkom det at det ikke ligger inne noen temperaturbegrensning på de prefabrikkerte modulene, som tilsvarer de begrensningene reelle produkter har. Dette kan gi noe høyere dekningsgrader og produksjonsvirkningsgrad for anlegget enn ved reelle forhold. Her er det viktig at simuleringresultatene vurderes opp mot reelle forhold, og det krever høy kompetanse i forhold til bruk av programmet og prosjektering av slike energisentraler. Totalt sett fremstår IDA ICE som et godt verktøy for å simulere alle deler av energisentralen, både i forhold til byggets energiforbruk over året og samspillet mellom komponentene i energisentralen og distribusjonssystemene. Resultatene vil gi et godt grunnlag for å optimalisere temperaturnivåer og komponentene i energisentralen. Det er behov for videreutvikling av ESBO sentralen, og flere momenter i denne retning er presentert i rapporten.

INNHOLDSFORTEGNELSE

1	INNLEDNING	2
2	SIMULERING AV ENERGISENTRAL I IDA ICE	3
2.1	Basismodell og nødvendige tilpasninger	4
2.2	ESBO sentral	5
2.3	Beregnet energibehov for bygget	8
2.4	Størrelse på akkumulatortanker	8
2.5	Simuleringsstid ved tilpasninger av beregningsmodellen	9
3	ENERGISENTRAL TILSVARENDE SOM FOR NYTT NASJONALMUSEUM	10
3.1	Energisentral for Nytt Nasjonalmuseum	10
3.1.1	Sentralens oppbygning	11
3.1.2	Energibehov	14
3.1.3	Evaluering av simuleringsmodell	14
3.2	Implementert temperaturbegrensning på varmepumpemodell	16
3.2.1	Energibehov	17
3.2.2	Evaluering av simuleringsmodell	17
3.3	Simuleringer med forskjellig størrelse på sjøvannsvexleren	18
3.3.1	Energibehov	18
3.3.2	Evaluering av simuleringsmodell	19
3.4	Simulering av frikjøling ved forskjellige sjøvannstemperaturer	21
3.4.1	Energibehov	22
3.4.2	Evaluering av simuleringsmodell	22
3.5	Simulering med forskjellige størrelser på varmepumpa	22
3.5.1	Energibehov	23
3.5.2	Evaluering av simuleringsmodell	23
3.6	Simulering med forskjellig temperaturnivå på distribusjonssystemene	24
3.6.1	Energibehov	24
3.6.2	Evaluering av simuleringsmodell	25
3.7	Simulering av energisentral med uteluft som energikilde	26
3.7.1	Energibehov	26
3.7.2	Evaluering av simuleringsmodell	26
4	KONKLUSJON OG PERSPEKTIVERING	28
5	VIDERE ARBEIDER	31

1 INNLEDNING

På vestbanen i Oslo skal Statsbygg prosjektere og bygge et nytt nasjonalmuseum på oppdrag fra Kulturdepartementet. Prosjektet bruker BIM som et integrert verktøy i prosjekterings- og byggefaser. Sideløpende med Prosjekt Nytt Nasjonalmuseum, PNN, gjennomfører Statsbygg et FoU-prosjekt som har til formål å undersøke og videreutvikle bruken av BIM i energi- og inneklimatesting. Statsbygg ønsker derved å løfte frem bruken av BIM i prosjektering av bygg mht. optimalisering av arbeidsprosessen mellom de relevante aktørene.

Denne rapporten er en delrapport i FoU-prosjektet, hvor formålet er å løfte dynamisk simulering av energisentraler frem som en mulig teknikk for optimalisering av energiforsyningsløsninger mht. valg av komponenter, systemer, temperaturnivåer m.m.

Det er ikke vanlig at energiforsyningsystemer simuleres, og all prosjektering skjer typisk på basis av forenklete analyser og tommelfingerregler. Muligheten for integrert simulering av energiforsyning og bygg, er forholdsvis ny og er implementert i et knippe programmer bl.a. IDA ICE og Transys. I dette prosjektet er programmet IDA ICE benyttet, dette blant annet på grunn av at energidelen er godt validert, brukervennlighet, godt samarbeid med programutviklerne og at det finnes en modell for PNN allerede.

Det er i utgangspunktet to mulige fremgangsmåter for å studere energiforsyningsløsninger i IDA ICE. Den ene er å bruke prefabrikkerte energiforsyningsmoduler for å lage en energisentral som ligner den en ønsker å arbeide med. Den andre går ut på å bygge en egen energisentral fra bunnen av, med alle komponenter og styringssekvenser som ville inngå i en virkelig energisentral.

I dette prosjektet er det starter med en studie på nivå med det som ville være fornuftig å utføre i et forprosjekt, dvs. en studie basert på prefabrikkerte energiforsyningsmoduler koblet sammen slik at de ligner på den tenkte energisentralen ved PNN. Deretter er det arbeidet med enkeltkomponenter som varmpumper, kjølemaskiner, energikilde og temperaturnivåer på anleggene. Tidsforbruket ved å bygge opp en energisentral ved hjelp av prefabrikkerte moduler er vesentlig lavere enn å bygge opp sentralen og styringssekvenser fra bunnen, og ville derfor være en naturlig framgangsmåte i tidligfase i et prosjekt når flere systemløsninger skal vurderes. Ved å benytte de prefabrikkerte modulene får en sett hvilke muligheter og begrensninger som ligger her uten at tidsforbruket for å sette opp de forskjellige modellene blir for høyt.

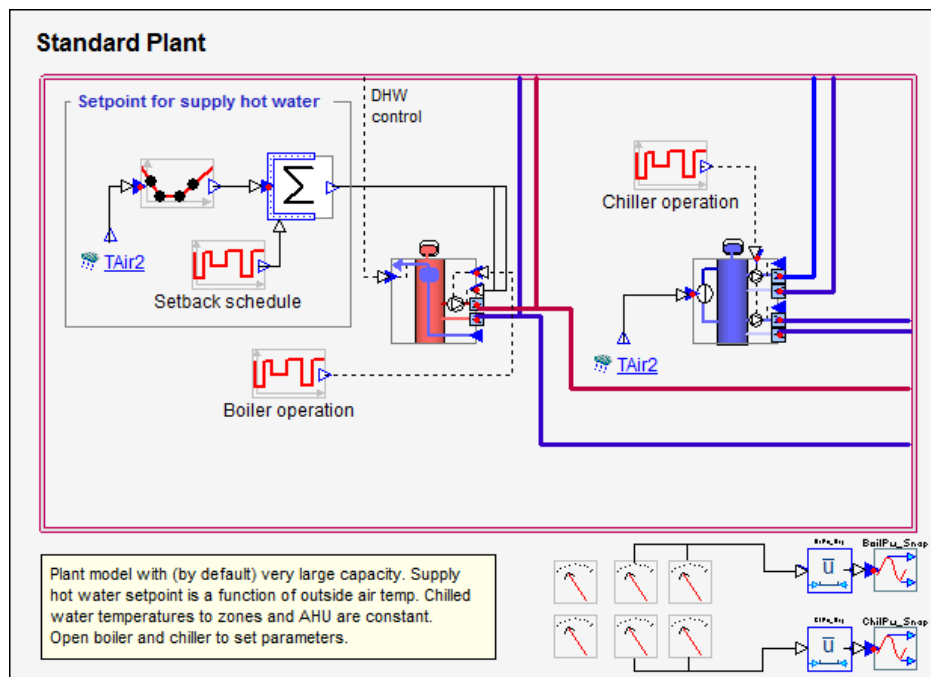
Simulering av energisentralen er utført med det dynamiske simuleringsverktøyet IDA ICE (IDA Indoor Climate and Energy) versjon 4.6, et program utviklet av Equa Simulation AB. Dette er et verktøy for full dynamisk beregning av inneklimatesting og energibruk i bygninger. Programmet er bl.a. validert iht. NS-EN 15255:2007 og NS-EN 15265:2007. Oppbygging av

energisentral er gjort ved hjelp av IDA Early Stage Building Optimization (ESBO) versjon 1.1 Beta 4, som er en applikasjon i Expert versjon av IDA ICE.

Ved simuleringer av energisentralen, og særlig ved implementering av ny styring for varmpumpemodellen, har Erichsen & Horgen AS hatt kontakt med programutvikleren (Equa), og vi vil takke for et godt samarbeid.

2 SIMULERING AV ENERGISENTRAL I IDA ICE

I basisutgaven av IDA ICE er det benyttet en standard energisentral. Denne består av en ideell kjøleenhet og en ideell enhet for oppvarming, begge med effektfaktor som er fast i hele simuleringsperioden og tilstrekkelig stor effekt, og er vist i Figur 2-1. Denne energisentralen er svært enkel og effektiv ved simuleringer. Det er her ingen mulighet for å velge andre energikilder eller energiproduserende enheter som kjeler, varmpumper og lignende. Basismodellen for energisentralen egner seg derfor kun til beregning av energi og effektbehov for bygningen, samt levert energi ved bruk av virkningsgrader som er faste i simuleringsperioden, og ikke for å simulere energisentralen i detalj.

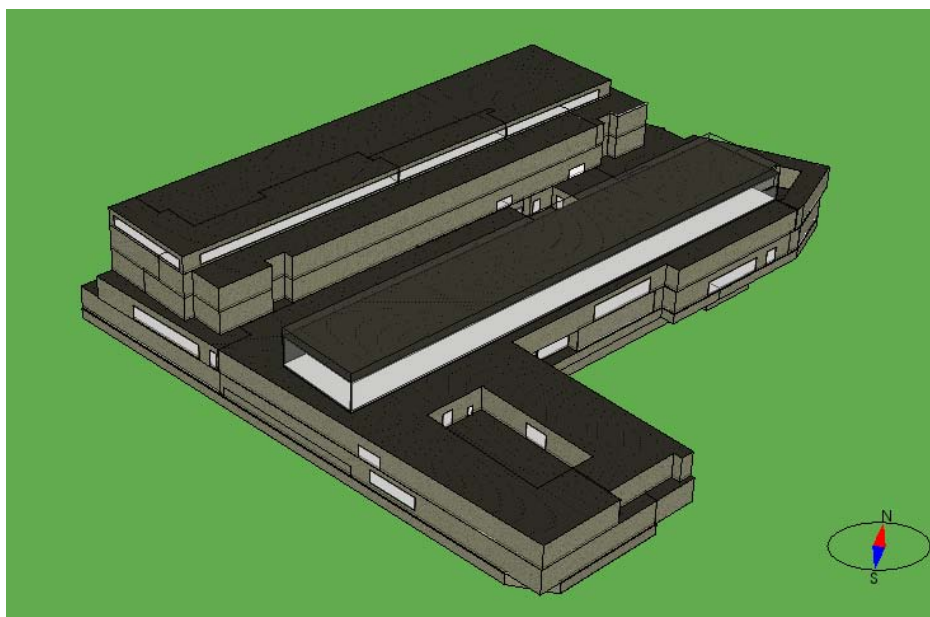


Figur 2-1 Oppbygning av energisentral i basismodell.

For å møte disse begrensningene er det i IDA ICE, innført en Early Stage Building Optimization (ESBO) Sentral. Dette er en mer kompleks modell for energisentralen og er basert på en rekke predefinerte komponenter. Her benyttes "drag-and-drop" prinsippet og man velger de komponentene man ønsker ut fra hvordan sentralen skal bygges opp. Dette gir mulighet for å bygge opp egne varianter av energisentralen med blant annet

varmepumper, kjeler, kjølemaskiner, forskjellige energikilder og elektrisitetsproduksjon med sol og vind. Her kan det benyttes standardmoduler for styring av energisentralen eller egne styringssekvenser kan moduleres.

Figur 2-2 viser en 3D visualisering av beregningsmodellen i IDA ICE.



Figur 2-2 3D-visualisering av beregningsmodell.

2.1 Basismodell og nødvendige tilpasninger

Som basis for simulering av energisentralen er det tatt utgangspunkt i energiberegningsmodellen for Nytt Nasjonalmuseum fra forprosjektfasen. Da beregningsmodellen er relativt tung er det gjort følgende forenklinger for å redusere simuleringstiden:

- Antall soner er redusert fra 35 til 19, ved at flere soner er slått sammen.
- Flere ventilasjonsaggregater er dermed også slått sammen.
- Flere interne isoleringssjikt er fjernet. Dette gjelder isoleringssjikt i kjølerom, magasiner etc.

For å kunne benytte modellen vider til simulering av energisentralen med ESBO sentral har det vært nødvendig å gjøre noen tilpasninger. Videre er nødvendige tilpasninger beskrevet:

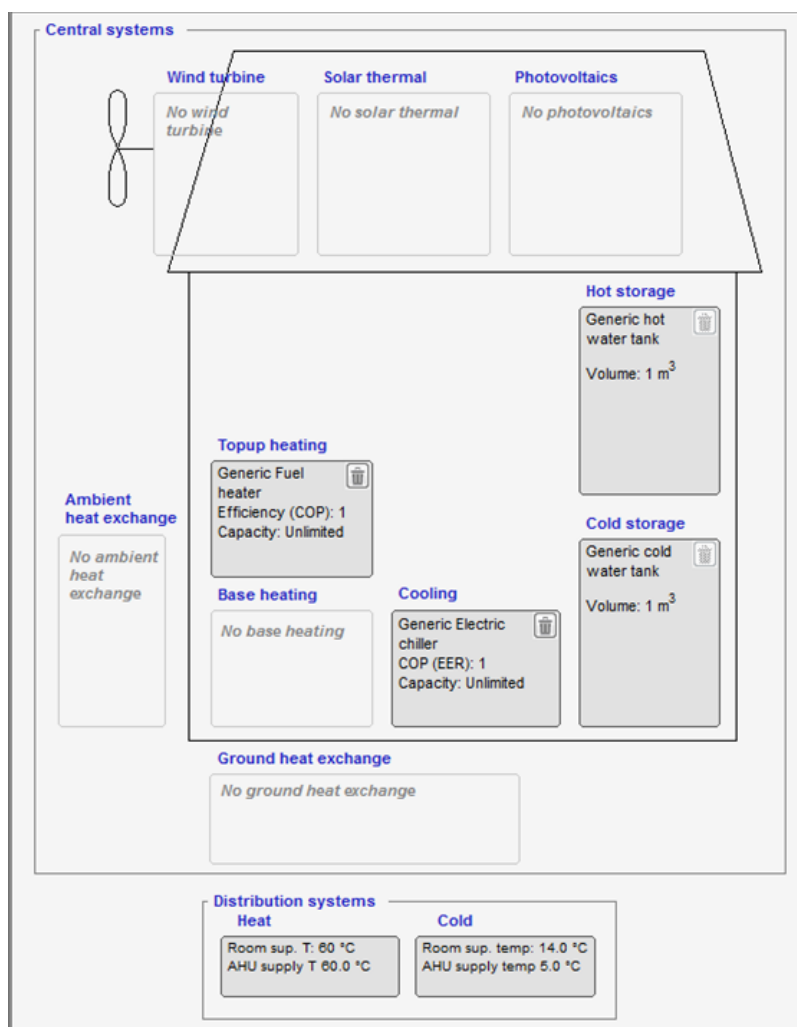
- **Tappevann:** I basismodellen er det ikke lagt inn forbruk av varmt tappevann. For å få mest mulig reelt energibehov, samt få et varmebehov på sommeren som varmepumpa kan jobbe mot, er det lagt inn tappevannsforbruk på 10 kWh/m²år (iht NS3031:2007, tabell A.1). Det er definert at tappevannet skal varmes opp fra 5 til 65 °C, med følgende driftstid: 10-21 mandag-fredag, 52 uker/år.

- **Radiatorer og kjøleenheter:** Hver av sonene i basismodellen klimatiseres ved hjelp "ideal heaters" og "ideal coolers". Disse enhetene har ingen kobling til de reelle temperaturnivåene på distribusjonssystemene. For at oppvarming av sonene skal gi mest mulig reelt samspill opp mot energisentralen og de temperaturbegrensningene som vil komme her, er de ideelle enhetene byttet ut med vannbårne radiatorer (water radiator) og kjøleenheter (cooling device).
- **ESBO sentral:** Videre er energisentralen byttet ut med ESBO sentral. Utforming av ESBO sentral er beskrevet videre i kapittel 2.2.

Energisentralen vist i Figur 2-1 omtales videre som basismodellen.

2.2 ESBO sentral

Ved installering av ESBO sentral i beregningsmodellen framkommer den enkleste utgaven av sentralen, med standard verdier. I Figur 2-3 vises oppbygning av energisentralen. Energisentralen består da av en kjel og en elektrisk kjølemaskin, begge med ubegrenset kapasitet og effektfaktor som er fast gjennom hele simuleringsperioden. I tillegg består sentralen av to akkumulatortanker, en for isvann og en for varmtvann, som forsyner hver sitt distribusjonssystem. Isvann og varmtvann som produseres av kjølemaskinen og kjelen, tilføres de respektive akkumulatortankene. Hver av tankene er i utgangspunktet på 1 m³. Turtemperatur for varmedistribusjonssystemet er satt til 60 °C.

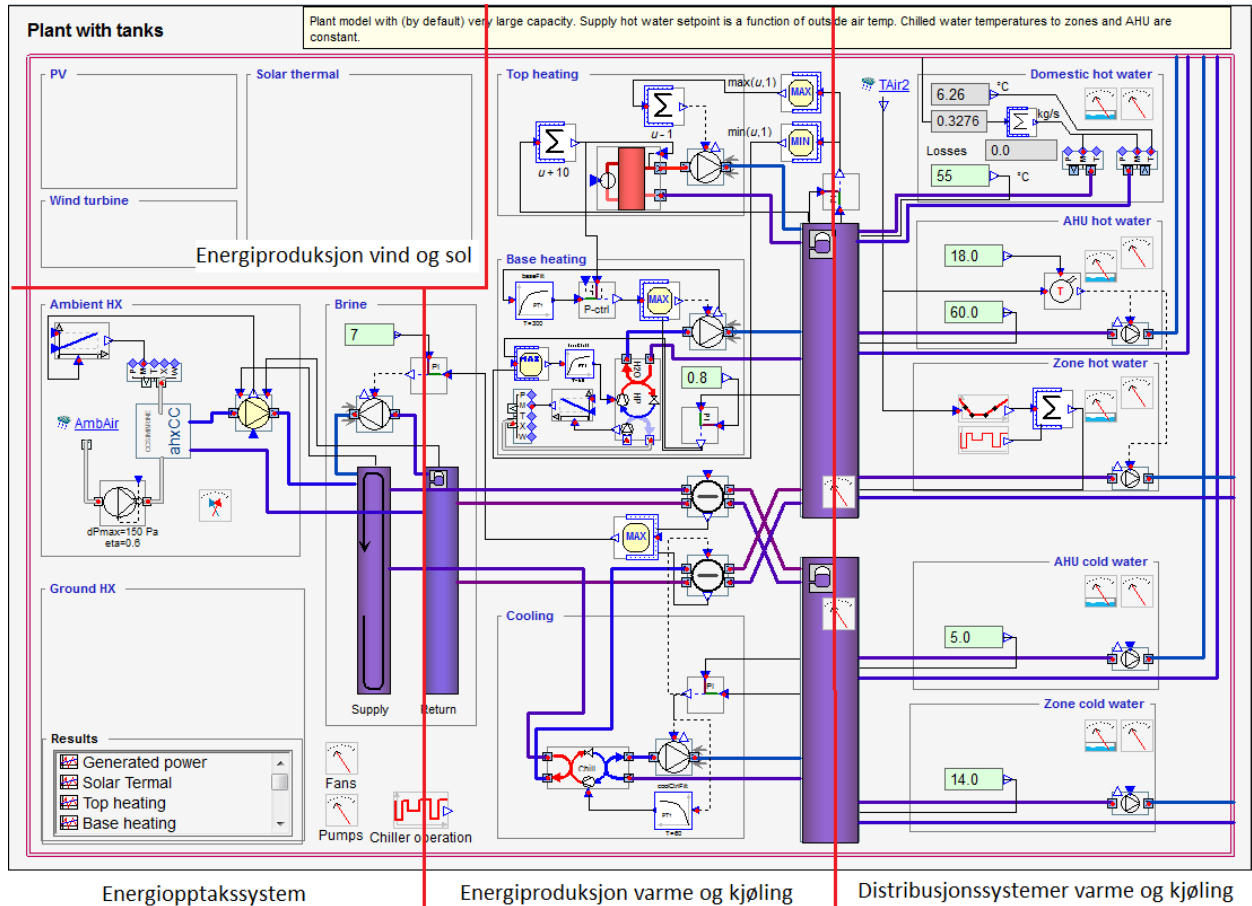


Figur 2-3 Oppbygning av enkleste versjon av ESBO sentral. Sentralen er her bygd opp av en varmekilde og en kjølemaskin, samt akkumuleringstanker for varme og kjøling.

Som det framkommer av Figur 2-3 er det i tillegg til komponentene i den enkleste versjonen av ESBO sentral også mulig å legge til andre komponenter. For oppvarming kan det velges en grunnlast og en topplastkilde. Dette er typisk en varmepumpe i kombinasjon med en kjele. For kjøleproduksjon kan det velges en væske/vann kjølemaskin i stedet for den elektriske kjølemaskinen. Som energikilde kan det enten benyttes luft, varmeveksler mot grunnvarme eller annen energikilde med gitt temperaturnivå. Videre kan energiproduksjon med vind, solfanger eller solceller velges. Til slutt kan temperaturnivåer på distribusjonssystemet for varme og kjøling defineres.

Oppbygningen av ESBO sentralen kan vises på to forskjellige måter i IDA ICE. Det enkleste oppsettet er som i Figur 2-3, hvor kun de viktigste komponentene og de mest grunnleggende inndataene vises. En mer detaljert fremstilling av energisentralen er vist i Figur 2-4, her for

en sentral med kjølemaskin mot tørrkjøler og luft/vann varmepumpe. I denne visningen fremkommer systemoppbygningen med alle komponenter, rørkoblinger, temperaturer og styringssekvenser.



Figur 2-4 Systemoppbygning av energisentral i ESBO plan med luft/vann varmepumpe, spisslastkjel og kjølemaskin mot tørrkjøler. Systemgrenser er vist i rødt.

Som det framkommer av Figur 2-4 består sentralen av flere akkumulatortanker. Hensikten med akkumulatortankene og denne oppbygningen av energisentralen er å gjøre styringen av energisentralen enklest mulig. Tankene fungerer som systemgrenser. Dette gjør at energiopptakssystemet kan defineres fra tørrkjøler og fram til akkumulatortanken. Tørrkjøleren styres da kun opp mot behovet i akkumulatortanken og ikke direkte opp mot effektbehovet til kjølemaskinen.

Tilsvarende er systemet for energiproduksjon som er fra akkumulatortanken mot tørrkjøleren og til akkumulatortankene for varmt og kaldt vann, og da inkludert varmepumpe, kjølemaskin og spisslastkjel. Her produserer kjølemaskinen og varmepumpa kaldt og varmt vann mot

akkumulatortankene uten at de er koblet mot alle sluttbrukerne og de variasjonene som kontinuerlig vil komme her.

Det siste systemet er sluttbrukerne, som er de 5 kursene for oppvarming og kjøling. Her hentes energi til for eksempel radiatorne fra varmtvannstanken uten at denne styres direkte mot grunnlast og topplastkilden. Denne oppbygningen av energisentralen gjør at hvert system kan jobbe mot en tank, uten å måtte ta hensyn til de øvrige systemene. Dette gjør beregningmodellen lettere og reduserer simuleringstid.

2.3 Beregnet energibehov for bygget.

Ut fra årssimuleringen gjennomført på basismodellen, beskrevet i kapittel 2.1, er følgende energibehov for oppvarming og kjøling beregnet:

- Levert energi oppvarming: 41,9 kWh/m²år
- Levert energi kjøling: 5,4 kWh/m²år

Energibehovene er for levert energi, men da effektfaktorene for varme og kjøling er 1,0 er dette tilsvarende netto energibehov for bygget. Energibehovene vil videre benyttes for sammenligning mot levert energi for forskjellige varianter av energisentralen i kapittel 0. Merk at energibehovet videre sammenlignes mot levert energi for sentralen.

Videre i kapittelet er det sett på hvilken betydning størrelsen på akkumulatortankene har. I tillegg er det sett på hvordan beregningstiden for årssimulering påvirkes av overgang til ESBO sentral og forskjellige oppbygninger av denne sentralen.

2.4 Størrelse på akkumulatortanker

Akkumulatortankene for varme og kjøling er i utgangspunktet på 1 m³ når en ESBO sentral opprettes. Nødvendig størrelsen på akkumulatortankene vil variere avhengig av byggets effektbehov til varme og kjøling. Ved kjøring av årssimulering for basismodellen kom det opp advarsel om at volumet på akkumulatortankene for varme og kjøling er for lite i forhold til aktuelt BRA for bygget. Det ble derfor gjort en vurdering av nødvendig volum på akkumulatortanker og hvilke innvirkning dette hadde på tidsforbruk for årssimulering.

Ut fra effektbehovet til bygget ville det erfaringsmessig være passe med et vannvolum i anlegget på 6-8 m³. Dette er derfor valgt som størrelse på akkumulatortankene for varme og kjøleanlegget. Ved kjøring av årssimulering med disse tankvolumene kom det ikke opp advarsel om for lite tankvolum.

Simuleringstid for beregningsmodellen ble med økt volum på akkumulatortankene redusert fra 192 til 134 minutter, se Tabell 2-1. Dette er en reduksjon på ca 30 %. Dette skyldes sannsynligvis at endringene i akkumulatortankene blir langsommere ved større volum og beregningstidene i IDA ICE blir lengre. Dette vil føre til kortere beregningstid. Altså har

det vesentlig betydning for simuleringstiden at akkumulatortankene blir dimensjonert store nok.

2.5 Simuleringstid ved tilpasninger av beregningsmodellen

De nødvendige tilpasningene på modellen, som er beskrevet i kapittel 2.1, gjør også at beregningsmodellen blir mer kompleks og simuleringstiden øker. I Tabell 2-1 er simuleringstiden ved årssimulering vist for de forskjellige tilpasningene. Her er det også kjørt ytterligere 2 simuleringer for å se på simuleringstiden for ytterligere justeringer utover den enkleste utgaven av ESBO sentralen:

- **Kjølemaskin:** den elektriske kjøleenheten er byttet ut med en væske/vann kjølemaskin mot tørrkjøler. Det er installert tilstrekkelig effekt på kjølemaskinen.
- **Luft/vann varmepumpe:** det er i tillegg til en kjel som topplast installert en luft/vann varmepumpe, med varmeytelse på 650 kW, som grunnlastkilde.
- **Økt volum på akkumulatortanker:** Volum på akkumulatortanker er økt til 8 m³, se kapittel 2.4.

Tilpasningene og simuleringene er gjort skrittvis, slik at hver av simuleringmodellene også inneholder de overstående punktene.

Tabell 2-1 Simuleringstid ved årssimulering av beregningsmodellen ved de forskjellige tilpasningene som er utført.

Modell	Beregningstid årssimulering [min]	Økning av simuleringstid i forhold til basismodell
Basismodell	39	0 %
Tappevann inn i modell	40	+2,5 %
Radiatorer og kjøleenheter	40	+2,5 %
Implementert ESBO Sentral	67	+72 %
Kjølemaskin mot tørrkjøler	74	+90 %
Luft/vann varmepumpe	192	+392 %
Økt volum på akkumulatortank	134	+244 %

Som det framkommer av Tabell 2-1 gir det kun små endringer i simuleringstid å legge til tappevann, radiatorer og kjøleenheter. Ved å bytte ut standard energisentral med ESBO sentral øker simuleringstiden betraktelig. Ved også å legge til reell kjølemaskin og varmepumpe som grunnlastkilde blir beregningsmodellen svært kompleks, med resulterende lang simuleringstid.

3 ENERGISENTRAL TILSVARENDE SOM FOR NYTT NASJONALMUSEUM

Energisentralen i den enkleste versjonen av ESBO sentral som ble beskrevet i kapittel 2.2 kan benyttes for å simulere energisentraler, men består foreløpig kun av en kjel og en elektrisk kjølemaskin. Videre i dette kapittelet er denne modellen benyttet som basis for å bygge en energisentral som ligner på den som prosjekteres for Nytt Nasjonalmuseum. Energisentralen skal inneholde en varmepumpe og en kjølemaskin, begge med sjøvann som energikilde. Som spisslast benyttes fjernvarme.

Videre skal denne modellen av energisentralen benyttes som grunnlag for å se nærmere på dimensjonering av en rekke enkeltkomponenter, som det gjerne er knyttet usikkerhet til ved dimensjonering av en reell energisentral. Her er det utført simuleringer med følgende:

- Forskjellige effekter på varmepumpa
- Forskjellige effekter på sjøvannsvexleren
- Alternativ styring av varmepumpa.
- Forskjellige temperaturnivåer på distribusjonssystemene
- Varierende temperatur på energikilden
- Tilsvarende energisentral, men med luft/vann varmepumpe og kjølemaskin mot tørrkjøler. Dette gir ofte lavere investeringskostnader for anlegget, men ofte også lavere effektfaktorer for energisentralen.

Hver av simuleringene er vurdert, både i forhold til styrker og svakheter ved systemoppbygning, og hvilke tilpasninger det kan arbeides videre med. Dette er gjort for å verifisere resultatene fra simuleringene opp mot de forhold en virkelig energisentral jobber mot med tanke på temperaturbegrensninger, driftsmessige forhold og lignende. Her kan en da se hvilke muligheter som ligger i beregningsverktøyet, samt hvilke styrker og svakheter det har.

3.1 Energisentral for Nytt Nasjonalmuseum

Videre er det bygget en energisentral som ligner sentralen som vurderes ved Nytt Nasjonalmuseum. Energisentralen er bygget opp av predefinerte enheter i ESBO Sentral og består av varmepumpe og kjølemaskin med sjøvann som energikilde, fjernvarme som spisslast og med korrekt temperaturnivå på distribusjonssystemene. Denne beregningsmodellen omtales i de etterfølgende kapitlene som "Sentral PNN".

Ut fra simuleringsmodellen er følgende effektbehov beregnet for bygget. Dette effektbehovet er benyttet videre for dimensjonering av komponentene i energisentralen.

Tabell 3-1 Beregnet effektbehov for bygningsmassen

	Oppvarming [kW]	Kjøling [kW]
Ventilasjon	1.000	1.950
Rom	400	50
Tappevann	200	-
Sum	1.600	2.000

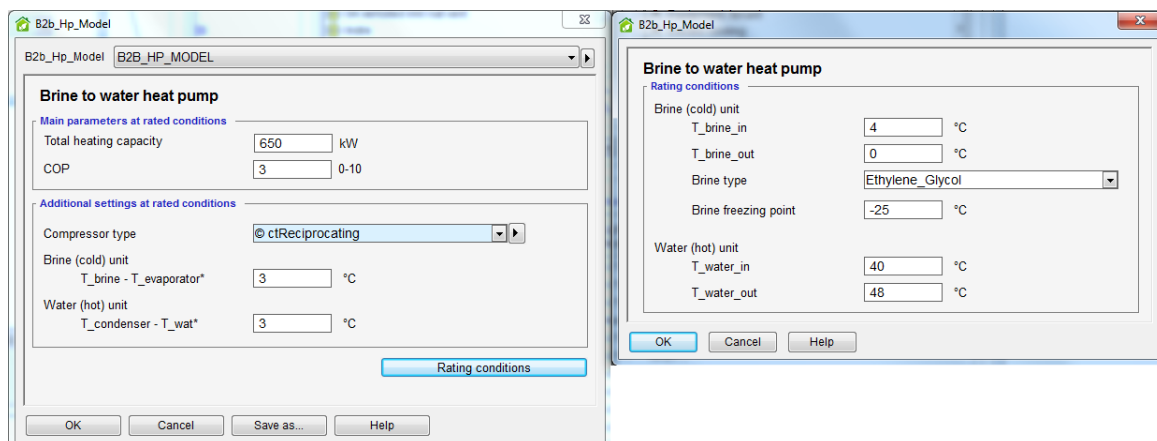
I forhold til de tekniske anleggene ved Nytt Nasjonalmuseum er det i modellen gjort enkelte forenklinger:

- Det er ikke medtatt prosesskjøling. Dette ville bidratt til betydelig mengde overskuddsvarme fra kjølemaskinen på vinteren, samt et betydelig høyere kjølebehov for bygget.
- Det er ikke medtatt energi og effekt for klimatisering av bygget i forhold til befuktning og avfuktning av lokalene. Men for de fleste bygningskategorier vil dette normalt ikke være aktuelt.
- Det er ikke medtatt spesialavtrekk eller klimatisering av kalde magasiner.

Disse forenklingene gjør at energi- og effektbehovet for beregningsmodellen vil bli noe lavere enn for et virkelig bygg. Dette gjelder særlig kjølebehovet, da prosesskjøling og avfuktning ville gitt et betydelig høyere kjølebehov, også i deler av året med stort varmebehov. Dette vil også påvirke de effektfaktorene som femkommer. Særlig vil kjøling framstå med en lavere effektfaktor.

3.1.1 Sentralens oppbygning

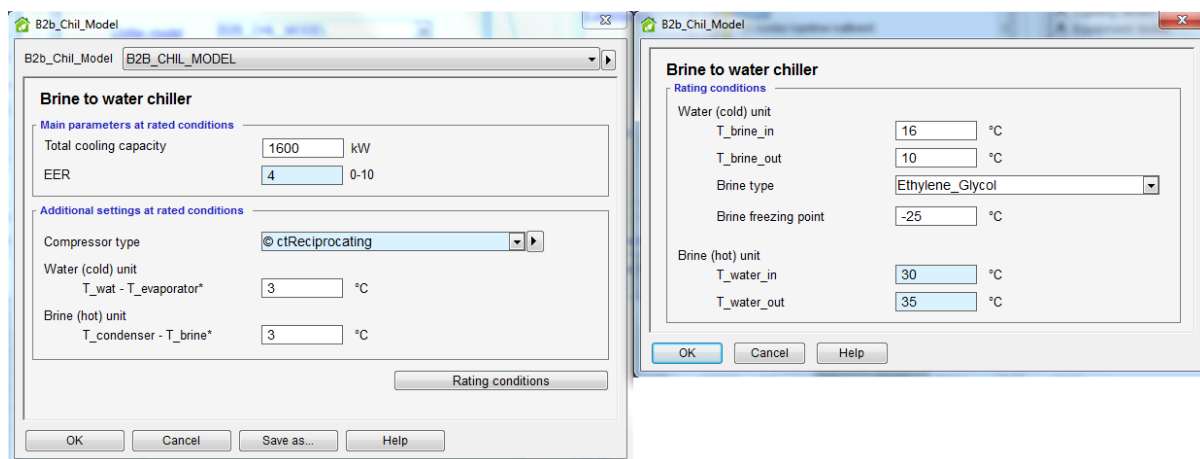
Som grunnlastkilde er det satt inn en væske-vann varmepumpe med varmeytelse på 650 kW. Ut fra beregnet effektbehov i Tabell 3-1, har denne da en effektdkningsgrad på ca 40 % av totalt varmebehov. I Figur 3-1 er inndata for varmepumpa vist.



Figur 3-1 Inndata for væske-vann varmepumpe

Som spisslast er det lagt inn fjernvarme, med installert effekt på 1600 kW som gir 100 % effektdekning. Virkningsgraden for fjernvarme er satt til 0,98. Dette tilsvarer produksjonsvirkningsgraden for fjernvarme i henhold til NS 3031:2007+A12011, tabell B9. Effektfaktorer benyttet for varmpumpe og kjølemaskin er standardverdier som benyttes i de prefabrikkerte modulene i ESBO sentralen. Disse tilsvarer produksjonsvirkningsgraden benyttet for fjernvarme, men kan fritt varieres av bruker innenfor intervallet 0-10. Effektfaktorene er ikke vektet for distribusjons- og reguleringsvirkningsgrad i henhold til NS 3031:2007+A12011, tabell B9, da det videre er valgt å benytte standard effektfaktorer for varmpumper og kjølemaskiner fra IDA ICE, og det er byggets energisentral som vurderes i denne rapporten.

Det er i tillegg lagt inn væske-vann kjølemaskin med installert kjølelytelse på 1600 kW. Denne vil sammen med frikjøling med sjøvann dekke byggets kjølebehov. I Figur 3-2 er inndata for kjølemaskinen gitt.



Figur 3-2 Inndata for væske-vann kjølemaskin

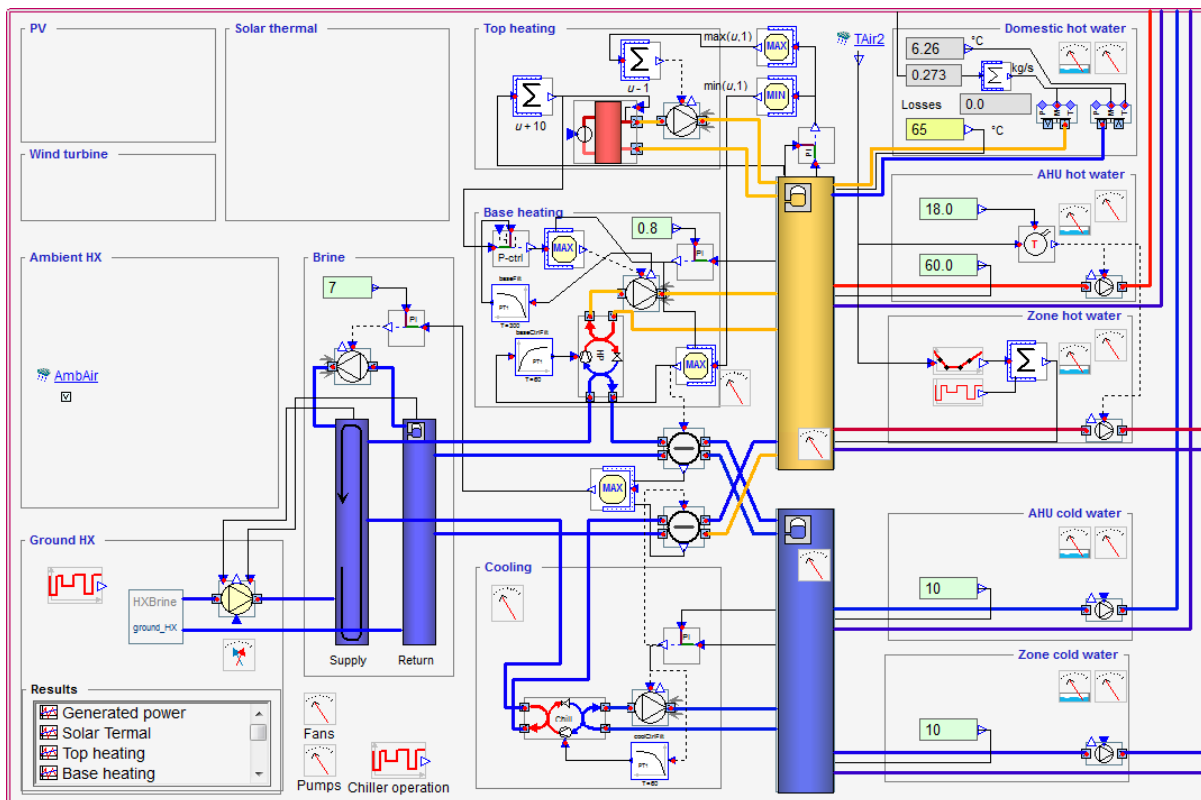
For å simulere sjøvann som energikilde for varmpumpa og frikjøling/dumping av kondensatorvarme, er det i ESBO Sentral lagt inn en varmeveksler mot en gitt kilde. Denne varmeveksleren er lagt inn med en effekt på 2000 kW ved en temperaturdifferanse på 3 °C mellom kilden og opptakskretsen i sentralen. Ved en sjøvannstemperatur på 7 °C vil hele kjølebehovet da dekkes med frikjøling. Videre kan kilden defineres enten med en fast eller en varierende temperatur. For å simulere sjøvann som energikilde er det benyttet måledata fra sjøvannsanlegget på Aker brygge. Det er for hver måned lagt inn middeltemperaturen på sjøvannet på -20 m målt i perioden 1933-92. For å kompensere for temperaturtap i varmeveksleren er temperaturen hevet med 2 °C på sommeren og redusert med 2 °C på vinteren. Temperatur som er lagt inn på energikilden er vist i Tabell 3-2.

Varmedistribusjonssystemet i bygget er definert som 60/40 °C anlegg, mens tappevannet skal varmes opp til 65 °C. For kjøleanlegget settes turtemperaturen til 10 °C.

Tabell 3-2 Temperatur over året for sjøvann

Måned	Middeltemperatur målt på sjøvannsinntak ved Aker brygge (1933-1992) [°C]	Temperatur på energikilde benyttet i simuleringsmodell [°C]
Januar	7,0	5,0
Februar	6,5	4,5
Mars	6,5	4,5
April	5,0	5,0
Mai	6,0	8,0
Juni	5,5	7,5
Juli	7,5	9,5
August	7,0	9,0
September	7,5	7,5
Oktober	8,5	8,5
November	8,5	6,5
Desember	8,0	6,0

I Figur 3-3 er sentralens detaljerte oppbygning vist.



Figur 3-3 Systemoppbygning for energisentralen for PNN. Varmepumpa og kjølemaskinen benytter sjøvann som energikilde, mens fjernvarme benyttes som spisslast.

3.1.2 Energibehov

I kapittel 2.3 ble det beregnet følgende netto energibehov for bygget:

- Energibehov oppvarming: 41,9 kWh/m²år
- Energibehov kjøling: 5,4 kWh/m²år

Ut fra årssimulering for sentralen i dette kapittel blir behovet for levert energi som følger:

- Kjøling:
 - Levert elektrisitet til kjølemaskin: 0,6 kWh/m²år
- Oppvarming
 - Levert energi fjernvarme: 7,5 kWh/m²år
 - Levert elektrisitet til varmepumpe: 13,9 kWh/m²år

For kjølesystemet dekkes ca 2,9 kWh/m²år av kjølemaskinen. Resterende andel av kjøling er frikjøling med sjøvann og kjøleenergi fra varmepumpas fordampere ved varmeproduksjon, og utgjør ca 47 % av årlig energibehov til kjøling. Kjøleanlegget får en total produksjonseffektfaktor på 9.

For varmeanlegget er levert energi for fjernvarme 7,5 kWh/m²år. Med en virkningsgrad for fjernvarme på 0,98, blir energileveranse fra varmepumpa på ca. 35 kWh/m²år. Dette gir varmepumpa en energidekningsgrad på ca. 82 %, mens fjernvarmen dekker de resterende 18 % av årlig energibehov. Varmepumpa får en årlig effektfaktor på 2,5, mens varmeanlegget totalt sett får en produksjonseffektfaktor på 2,0.

3.1.3 Evaluering av simuleringsmodell

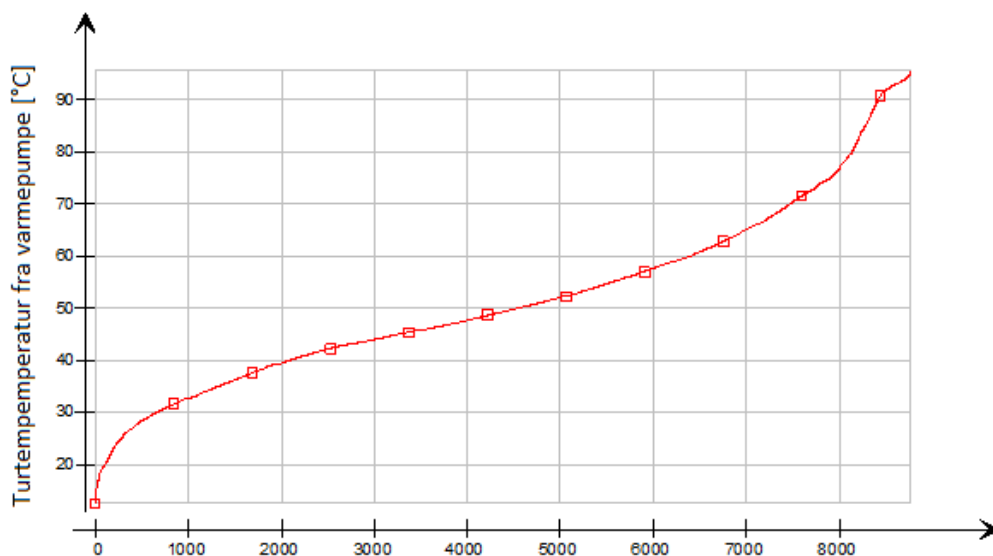
Som det fremkommer i kapittel 3.1.2 er det ved å benytte ESBO sentral mulig å simulere energisentralen, og enkeltkomponenter i denne, samtidig med at bygget og dets tekniske systemer simuleres. Her er det mulig å få ut mye informasjon, som for eksempel hvor mye av energibehovet som dekkes av varmepumpe og spisslast, samt av kjølemaskin og frikjøling. I tillegg er det også mulig å simulere temperaturer over året, både fra varmepumpa, kjølemaskinen og på distribusjonssystemene.

De veiledende systemvirkningsgrader i NS 3031 er beregnet iht. NS-EN 15316:2007, og det er mulig å dokumentere egne systemvirkningsgrader ved å benytte metodikken i NS-EN 15316. Systemvirkningsgradene er oppdelt i produksjons- distribusjons- og reguleringsvirkningsgrad. IDA ICE er i utgangspunktet godt egnet for å beregne alle delelementer i systemvirkningsgradene, og vil ved korrekt implementering gi mer presise resultater enn metodikken i NS-EN 15316. Oppsettet i ESBO beregner produksjonsvirkningsgraden for energiforsyningsløsningen på en god måte, men pumpeenergi undervurderes sannsynlig. Distribusjonsvirkningsgrad er ikke implementert i ESBO, men det finnes komponenter for dette slik det burde være mulig. Reguleringsvirkningsgrad er implementert på sonebasis, men representerer en ideell eller

teoretisk tilnærming mens NS-EN 15316 innehar en mer praktisk tilnærming. Vi ser at det er mulig å benytte IDA ICE for å dokumentere systemvirkningsgrader til bruk i blant annet energimerkeberegninger, men det vil kreve en kombinasjon av utbygging av ESBO sentralen og en etterbehandling av resultatene. Fremgangsmåten for slike arbeider vil trenge en egen utredning, som sannsynligvis bør være rettet mot etterfølgeren av NS-EN 15316:2007, men denne foreligger pt. kun som en prEN-standard.

Mulighetene man har ved å benytte ESBO sentral er unike i forhold til å dimensjonere de tekniske anleggene ut fra forenklete analyser og tommelfingerregler. Informasjonen som fremkommer av simuleringene er svært nyttig for å kunne prosjektere en energisentral med størs mulig lønnsomhet i forhold til økonomi og energibesparelse.

Ved gjennomgang av simuleringresultatene fremkommer det at det ikke ligger inne begrensning av kondenserings- og fordampningstemperaturen i den predefinerte varmepumpe modellen, som det vil være ved reelle varmepumper. Som vist i Figur 3-4 leverer varmepumpa i simuleringmodellen i perioder temperaturer over 90 °C. Ca 4000 timer per år leverer varmepumpa temperaturer over 50 °C.



Figur 3-4 Utgående vanntemperatur fra varmepumpas kondensator over året.

Ut fra effektvarighetskurven for bygget vil effektbehovet til oppvarming ligge på 650 kW (tilsvarende varmepumpas varmeytelse) ved en utetemperatur på -3 til -4 °C. Ved denne utetemperaturen vil nødvendig turtemperatur for et typisk 60/40 °C anlegget, ligge i området 45-50 °C. Dette er innenfor den utgående vanntemperaturen de fleste varmepumpene klarer å levere. Det skal likevel bemerkes at ved lavere effektbehov vil varmepumpa klare å dekke hele effektbehovet, mens den på et reelt anlegg likevel ikke vil klare å ta hele

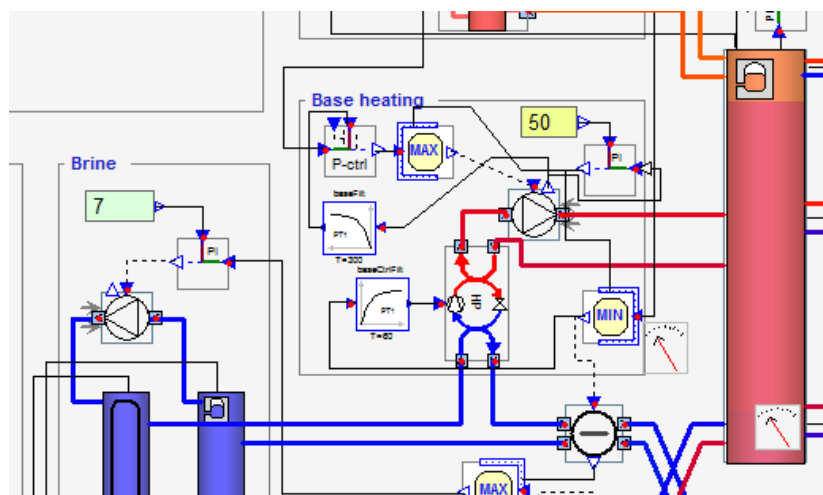
temperaturløftet, på grunn av oppvarming av varmt tappevann til 65 °C. Da utgående vanntemperatur fra varmepumpa ikke blir begrenset, vil den reelle energidekningsgraden for varmepumpa og anleggets effektfaktor ligge noe lavere enn det som er beregnet i kapittel 3.1.2. Dette er viktig å ta med i betraktningen når energisentralen simuleres med tanke på levert energi og effektfaktorer.

I den simulerte energisentralen er temperaturnivået på varmeanlegget satt til 60/40 °C. Det skal også legges til at man i andre tilfeller, typisk eksisterende bygg, kan ha varmeanlegg med høyere temperaturnivåer, for eksempel 70/50 °C eller 80/60 °C anlegg. Her vil det være særlig aktuelt å vurdere om den beregnede energidekningsgraden for varmepumpa er korrekt i forhold til hvilke temperaturer varmepumpa vil kunne levere.

3.2 Implementert temperaturbegrensning på varmepumpemodell

Som det ble belyst i kapittel 3.1.3 er det i basismodellen for varmepumpa i ESBO sentral, ikke lagt inn temperaturbegrensning som tilsvarer de temperaturene varmepumper normalt klarer å levere. Det er derfor i dette kapittelet, med grunnlag i basismodellen for varmepumpe, gjort noen justeringer på styringen slik at maksimalt utgående vanntemperatur begrenses.

I basismodellen for varmepumper i ESBO Sentral styres varmepumpa mot å holde en fyllingsgrad på 80 % i akkumulatortanken for varme. Den nye styringen som er implementert i varmepumpemodellen går ut på at varmepumpa styrer mot en viss utgående vanntemperatur til varmtvannstanken. I Figur 3-5 fremkommer den nye styringen av varmepumpa, her med høyeste utgående vanntemperatur satt til 50 °C. Videre er det utført simuleringer med maksimal utgående vanntemperatur fra varmepumpa på 50, 55 og 65 °C med tanke på energidekningsgrad for varmepumpa og levert energi til systemet.



Figur 3-5 Ny styring implementert på varmepumpemodellen. Maks utgående vanntemperatur begrenset til 50 °C.

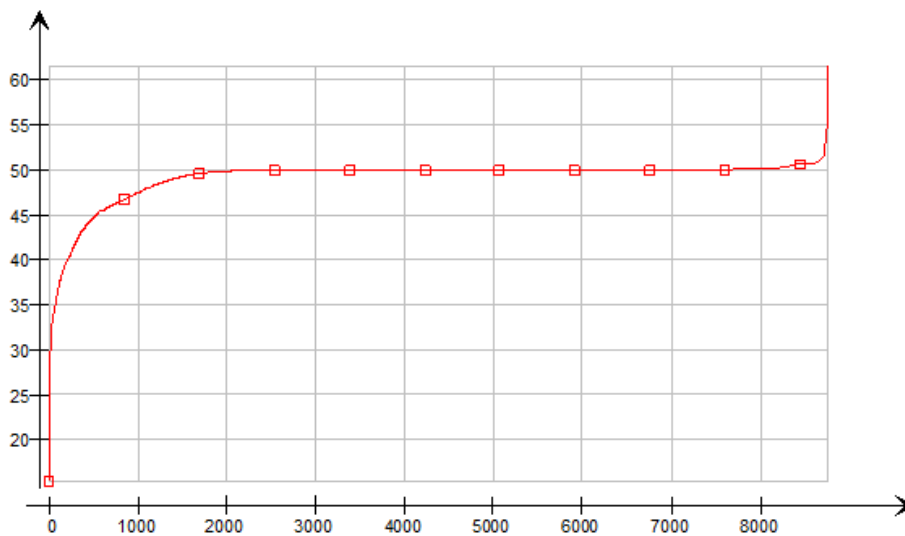
3.2.1 Energibehov

I Tabell 3-3 er resultatene fra simuleringen med maksimal utgående vanntemperatur vist. Merk at ved beregning av energidekningsgrad for varmepumpa er det for fjernvarme tatt hensyn til produksjonsvirkningsgrad på 0,98.

Tabell 3-3 Levert energi, samt energidekningsgrad for varmepumpa ved forskjellige maksimalt utgående vanntemperaturer fra varmepumpa.

Maks utg. temperatur. [°C]	Kjøling (el) [kWh/m ²]	Fjernvarme [kWh/m ²]	Varmepumpe (el) [kWh/m ²]	Dekningsgrad varmepumpe [-]
Modell PNN	0,6	7,5	13,9	82 %
50	0,6	14,7	10,4	66 %
55	0,6	10,5	12,4	75 %
65	0,5	7,5	13,6	83 %

I Figur 3-6 er utgående vanntemperatur fra varmepumpas kondensator vist for beregningsmodellen der temperaturen er begrenset til 50 °C. Som det kommer frem her begrenses nå temperaturen til ca 50 °C



Figur 3-6 Utgående vanntemperatur fra varmepumpas kondensator over året, for beregningsmodellen der temperaturen er begrenset til 50 °C.

3.2.2 Evaluering av simuleringsmodell

Som det fremkommer av Tabell 3-3 blir varmepumpas energidekningsgrad på 66 % når maksimal utgående vanntemperatur settes til 50 °C. Varmepumpa har en varmeytelse på 650 kW. Byggets effektbehov er likt varmepumpas varmeytelse ved en utetemperatur på -3 til -4 °C. Ved denne utetemperaturen vil nødvendig turtemperatur for et typisk 60/40 °C varmeanlegget ligge på 45-50 °C, altså innenfor varmepumpas begrensning på 50 °C. Energidekningsgraden på 66 % virker dermed lav i forhold til dekningsgraden beregnet med

modellen sentral PNN, siden varmepumpa selv med temperaturbegrensning skal klare temperaturløftet ved maksimal varmeytelse. Den delen av energibehovet til tappevannsberedning som varmepumpa nå ikke klarer (oppvarming fra 50 til 65 °C) skal utgjøre maksimalt 2,5 kWh/m²år og vil gi en reduksjon i energidekningsgraden på $\approx 6\%$.

Det at varmepumpas energidekningsgrad reduseres såpass betraktelig ved å begrense utgående vanntemperatur skyldes sannsynligvis oppbygningen av energisentralen som benyttes i ESBO sentral. Ved denne systemoppbygningen får man ikke simulert at varmepumpa kan forvarme tappevann og at spisslasten kun tar det siste temperaturløftet. Ved å endre styringen på varmepumpa slik det her er gjort, vil spisslastkilden jobbe mot en større del av tanken og dermed få en høyere dekningsgrad. Dette blir ikke korrekt da kjelen brukes hele året for å holde øvre del av tanken på min 65 °C pga tappevann. Dette gir igjen varmepumpa en lavere energidekningsgrad enn det som normalt forventes.

Det kan derfor i eventuelt nye studier arbeides videre med en styring av varmepumpa som gjør at maksimal utgående vanntemperatur fra kondensatoren begrenses, uten at det gir varmepumpa for lav energidekningsgrad. I tillegg bør det vurderes om oppvarming av tappevann skal skje i en egen tank, med forvarming fra varmeanlegget og med spissing med elektrisk varmeelement eller med spisslastkilden.

I Tabell 3-3 fremkommer det at varmepumpa ved å styres mot 65 °C får noe høyere dekningsgrad enn for modell PNN, uten begrensning på temperaturene. Dette skyldes sannsynligvis at varmepumpa nå jobber mot å dekke en større andel av akkumulatortanken med 65 °C vann enn for modell PNN, som styrer mot å dekke 80 % av tanken.

I de videre simuleringene er det derfor tatt utgangspunkt i beregningsmodellen sentral PNN, beskrevet i kapittel 3.1, hvor det ikke er noen temperaturbegrensning fra varmepumpa.

3.3 Simuleringer med forskjellig størrelse på sjøvannsvexleren.

Mye av energibehovet til kjøling dekkes av frikjøling med sjøvann. I løpet av året er det kun noen få timer med maks kjølebehov. Ved dimensjonering av en energisentral er det ofte spørsmål om hvor stor effekt sjøvannsvexleren skal dimensjoneres for. Videre er det derfor gjort noen simuleringer for å se på dekningsgraden for frikjøling med varierende størrelse på sjøvannsvexleren.

3.3.1 Energibehov

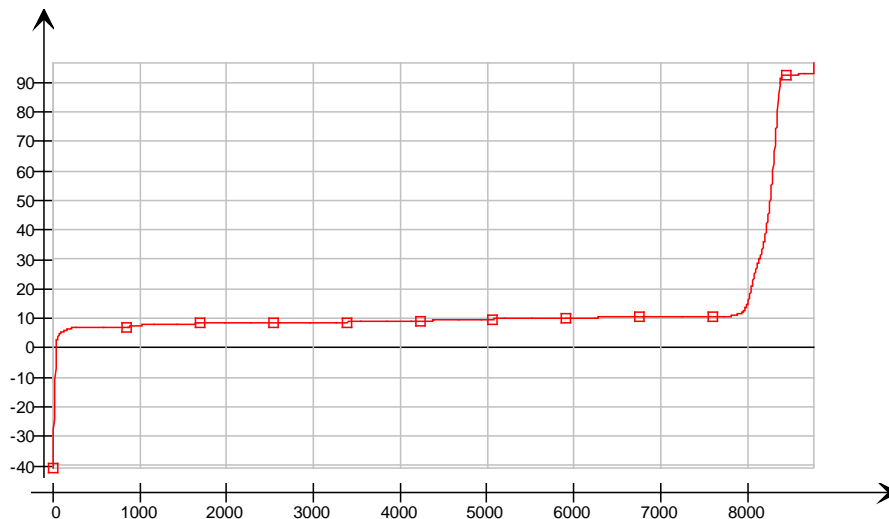
Det er utført simuleringer med sjøvannsvexler med effekt på 100, 500, 1000 og 2000 kW (sentral PNN). Det er klart at en sjøvannsvexler med effekt på 100 kW vil være for liten for energisentralen, men den er medtatt for å se på utfallet ved feildimensjonering. I Tabell 3-4 er resultatene fra simuleringene vist.

Tabell 3-4 Levert energi for de forskjellige energikildene, samt produksjonseffektfaktor for varmepumpa, varme- og kjøleanlegget, ved forskjellige effekter på sjøvannsvexler.

Effekt sjøvann	Kjøling (el)	Fjernvarme	Varmepumpe (el)	Produksjonseffektfaktor kjøleanlegg	Produksjonseffektfaktor varmeanlegg	Produksjonseffektfaktor varmepumpe
[kW]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[-]	[-]	[-]
2000	0,6	7,5	13,9	9,0	1,96	2,48
1000	0,7	7,8	14	7,7	1,92	2,45
500	0,9	8,2	13,9	6,0	1,90	2,44
100	3,6	13,6	12,3	1,5	1,62	2,32

3.3.2 Evaluering av simuleringsmodell

Som det framkommer av Tabell 3-4, så reduseres effekt faktoren for kjøling betydelig når effekten på sjøvannsvexleren reduseres til under 25 % av byggets dimensjonerende kjølebehov. Spesielt gjelder dette ved effekt på sjøvann på 100 kW. Dette skyldes delvis at andelen frikjøling reduseres, slik at kjølemaskinen må dekke størsteparten av kjølebehovet. Men det skyldes også at effekten på sjøvannsvexleren blir for liten til å kunne dumpe overskuddsvarme fra kjølemaskinen. Dette fremkommer i Figur 3-7, hvor kondenseringstemperaturen for kjølemaskinen er vist over året. Her vises det at kjølemaskinen i perioder må heve kondenseringstemperaturen til over 90 °C for å kunne dumpe overskuddsvarmen.

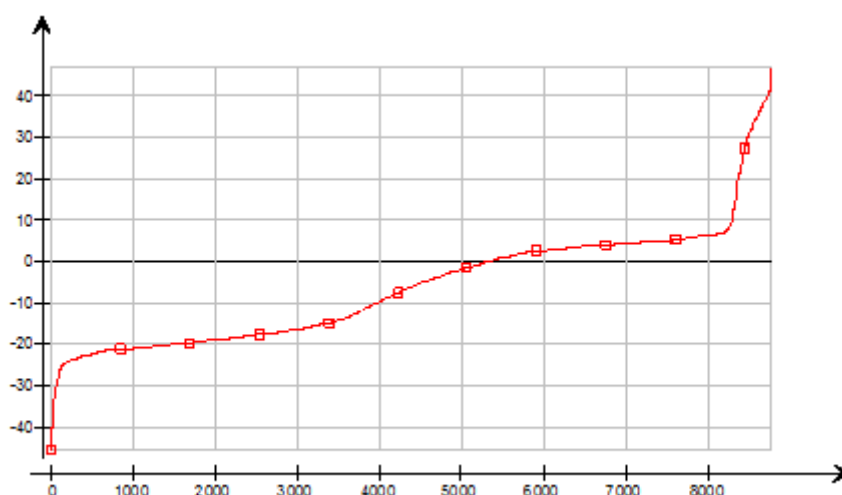


Figur 3-7 Kondenseringstemperatur for kjølemaskinen over året, ved effekt på sjøvannsvexler på 100 kW.

I IDA ICE gir dette kjølemaskinen en svært lav effekt faktor, mens en reell energisentral ikke ville klart å levere nok kjøleeffekt til bygget. Da det ikke er en temperaturbegrensning på kjølemaskinens kondenseringstemperatur, vil det ved simuleringer bli viktig at laveste mulige effekt på energikilden på forhånd dimensjoneres ut fra behovet for dumping av

overskuddsvarme ved reelle kjølemaskiner. Variasjonen på vekslereffekten kan så varieres innenfor disse begrensningene.

Når det gjelder varmebehovet framkommer det også av Tabell 3-4 at effektfaktoren reduseres betraktelig ved effekt på sjøvannsveksleren på 100 kW. Dette skyldes delvis at fjernvarme må dekke en større andel av energibehovet, men også at varmepumpa får lavere effektfaktor. Dette fordi varmepumpa må jobbe mot lavere fordampningstemperatur for å kunne hente opp tilstrekkelig effekt fra energikilden. Som det fremkommer av Figur 3-8 må varmepumpa i ca 4000 t/år jobbe med fordampningstemperaturer mellom -10 og -40 °C. Ved en reell energisentral ville ikke varmepumpa klart å jobbe mot så lave temperaturer og energidekningsgraden for varmepumpa ville blitt vesentlig lavere. Det framkommer også her at det er viktig at minimumseffekt på energikilden på forhånd dimensjoneres ut fra reelle parametere for varmepumpa.



Figur 3-8 Fordampningstemperatur for varmepumpa over året, ved effekt på sjøvannsveksler på 100 kW.

Også ved effekt på sjøvann på 1000 kW vil varmepumpas fordampningstemperatur i deler av året være ned mot -20 °C. Som vist over er det en svakhet ved slike simuleringer at temperaturene fra varmepumpa og kjølemaskinen ikke begrenses. Her er det viktig at minimumseffekten på energikilden dimensjoneres separat, ut fra reelle forhold i prosjektet og på ønsket utstyr. Men så lenge man passer på at laveste effekt på energikilden er riktig i forhold til reelle forhold, vil slike simuleringer med IDA ICE gi et meget godt grunnlag for dimensjonering av veksleren og sjøvannssystemet. Som det framkommer av Tabell 3-4 gir en økning av sjøvannsveksleren fra 1000 til 2000 kW kun en moderat økning i effektfaktorene for varme og kjøleanlegget. Og kanskje vil kostnadsøkningene for sjøvannsinstallasjonen ikke spare seg i forhold til den moderate økningen på effektfaktorene. Her vil simuleringresultatene, sammen med en vurdering av kostnadene, gi svært verdifull informasjon.

Simuleringsresultatene over er kun delvis overførbare til prosjekt Nytt Nasjonalmuseum, da det der er med effektbehov for både prosesskjøling, avfukting og kjøling av kalde magasiner.

3.4 Simulering av frikjøling ved forskjellige sjøvannstemperaturer.

Når sjøvann benyttes som energikilde, vil kildetemperaturen variere fra år til år. Det vil komme enkelte år med høyere og med lavere temperaturer enn de temperaturene som er benyttet i energisentralen for PNN, vist i Tabell 3-2. Som følge av dette vil andelen frikjøling og varmeleveransen fra varmepumpa kunne bli både høyere og lavere enn for det som er beregnet i kapittel 3.1. Det vil derfor være nyttig å se på hvordan andelen frikjøling varierer fra år med lave eller høye sjøvannstemperaturer, til et normalår. Videre er det derfor kjørt noen simuleringer for å se hvordan IDA ICE kan benyttes for å belyse denne problemstillingen. Det er kjørt simuleringer på følgende forhold:

- År med ugunstige kildetemperaturer; lave temperaturer på vinteren og høye på sommeren.
- År med lave kildetemperaturer hele året.

Kildetemperaturene som er benyttet er vist i Tabell 3-5.

Tabell 3-5 Temperatur over året for energikilden sjøvann som er benyttet i simuleringene.

Måned	Middeltemperatur målt på sjøvannsinntak ved Aker brygge (1933-1992) [°C]	Temperatur på energikilde benyttet for energisentral PNN fra kap 3.1 [°C]	Temperatur på energikilde i år med ugunstige temperaturer [°C]	Temperatur på energikilde i år med lave temperaturer [°C]
Januar	7,0	5,0	3,0	6,0
Februar	6,5	4,5	3,0	5,0
Mars	6,5	4,5	3,0	5,5
April	5,0	5,0	3,0	4,0
Mai	6,0	8,0	12,0	4,0
Juni	5,5	7,5	12,0	4,5
Juli	7,5	9,5	12,0	5,0
August	7,0	9,0	12,0	5,5
September	7,5	7,5	12,0	6,5
Oktober	8,5	8,5	3,0	7,0
November	8,5	6,5	3,0	7,0
Desember	8,0	6,0	3,0	6,5

3.4.1 Energibehov

Ut fra kildetemperaturene gitt i Tabell 3-5 er det beregnet følgende levert energi og produksjonseffektforhold for anlegget.

Tabell 3-6 Levert energi og produksjonseffektforhold ved forskjellige kildetemperaturer over året.

Modell	Kjøling (el)	Fjern- varme	Varmepumpe (el)	Produksjons- effektforhold kjøleanlegg	Produksjons- effektforhold varmeanlegg
	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[-]	[-]
Basismodell kapittel 3.1	0,6	7,5	13,9	9,0	1,96
Ugunstige kildetemperaturer	1,1	8,8	13,7	4,9	1,86
Lave kildetemperaturer	0,4	7,9	13,9	13,5	1,92

Som det fremkommer av Tabell 3-6 er levert elektrisitet til kjølemaskinen høyere for år med ugunstige kildetemperaturer, dette fordi andelen frikjøling blir lavere. Motsatt tilfelle ser man for år med lave kildetemperaturer. Da går andelen frikjøling opp og effektforholdet øker. For varmeanlegget kommer det frem at effektforholdet da reduseres på grunn av økt andel fjernvarme.

3.4.2 Evaluering av simuleringsmodell

Som det er påpekt tidligere er det ingen begrensning på temperaturene fra varmpumpe- og kjølemaskinmodellene. Ved lave kildetemperaturer kan dette føre til at fordampningstemperatur på varmepumpa blir lavere enn det en reell varmepumpe klarer å jobbe mot. I tillegg kan det oppstå frostproblematikk på væskebaserte opptakssystemer hvis glykolkretsen mot varmepumpas fordampner får for lave temperaturer. Disse problemstillingene vil gjøre at varmepumpa ved reelle forhold, under visse betingelser, vil kunne levere noe lavere effekt og mindre energi enn det som er beregnet over.

På den andre siden er det nyttig å faktisk kunne beregne hvordan levert energi og effekt fra energisentralen påvirkes av forskjellige kildetemperaturer, og da særlig for kjøleanlegget og andel frikjøling. Dette vil gi et bedre grunnlag for dimensjonering av for eksempel temperaturdifferanse over sjøvannsveksleren og andre energikilder, samt hvordan energileveransen fra de forskjellige energikildene vil kunne variere for sentralen.

3.5 Simulering med forskjellige størrelser på varmepumpa

Ved prosjektering av energisentraler er det viktig at varmepumpa dimensjoneres med rett effekt i forhold til dimensjonerende effektbehov. Varmepumpa har en høy kostnad pr installert kW i forhold til spisslast, men gir lave energikostnader i driftstiden. Dimensjonering av varmepumpa skjer ofte på grunnlag av erfaringstall og det er derfor svært nyttig med et

verktøy hvor energisentralen og varmepumpa kan simuleres opp mot byggets reelle energibehov. Det er derfor kjørt simuleringer med forskjellig varmemytelse på varmepumpa for å se hvordan energidekningsgraden påvirkes.

3.5.1 Energibehov

I Tabell 3-7 er beregnet energi og effektdekningsgrad beregnet for varmepumpa ved forskjellige varmemytelser.

Tabell 3-7 Beregnet energi og effektdekningsgrad, samt levert energi, ved forskjellige varmemytelse på varmepumpa.

Effekt Varmepumpe	Kjøling (el)	Fjernvarme	Varmepumpe (el)	Effektdekningsgrad varmepumpe	Energi-dekningsgrad varmepumpe
[kW]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[-]	[-]
200	0,6	21,2	7,0	13 %	50 %
400	0,6	12,7	11,1	25 %	70 %
500	0,6	10,3	12,4	31 %	76 %
650	0,6	7,5	13,9	40 %	82 %
800	0,6	5,1	15,2	50 %	88 %
1200	0,6	1,5	17,7	75 %	96 %
1600	0,5	0,6	18,8	≈100 %	99 %

Som det fremkommer av beregningsresultatene vil det oppnås en høy energidekningsgrad for varmepumpa, selv ved lav effektdekningsgrad. Selv en varmepumpe med effektdekningsgrad på 25 % vil være godt innenfor kravet til energiforsyning i TEK10, at minimum 60 % av netto varmebehov skal dekkes av annen energiforsyning enn direktevirkende elektrisitet eller fossile brensler. Ved økning av effektdekningsgraden over 50 % får man en relativt begrenset økning i energidekningsgraden.

3.5.2 Evaluering av simuleringsmodell

Som det framkommer av Tabell 3-7 er energidekningsgraden for varmepumpa tett på 100 % ved effektdekningsgrader på over 75 %. I foregående kapitler er det diskutert problemstilling rundt at det ikke er begrensinger for varmepumpemodellen med tanke på kondenseringstemperatur. Dette er gjeldende også for disse simuleringene.

En typisk varmepumpe som klarer temperaturer opp til ca 50 °C på utgående vann fra kondensatoren, vil selv ikke ved 100 % effektdekningsgrad klare å levere hele energibehovet til oppvarming. Dette fordi varmeanlegget på de kaldeste dagene skal ha 60 °C turtemperatur, i tillegg til at varmepumpa ikke vil klare det siste temperaturløftet for oppvarming av tappevann til 65 °C. Varmepumpa vil dermed ved reelle forhold få en lavere energidekningsgrad enn det som er beregnet i Tabell 3-7, særlig ved høye effektdekningsgrader. Det er derfor viktig at en er bevisst på de temperaturbegrensningene som vil være på reelle varmepumper ved slike simuleringer.

Men selv med begrensningene diskutert over er IDA ICE et beregningsverktøy som gir et meget godt grunnlag for vurdering og dimensjonering av energisentralen. Det er selvsagt ikke ukjent at en varmepumpe, selv ved lav effektdekningsgrad, gir en stor energidekning. Men det er svært nyttig å faktisk kunne simulere dette opp mot byggets energibehov, temperaturnivåer og stedlige forhold, istedenfor å basere dimensjoneringen på bruk av forenklete analyser og tommelfingerregler. En luft/vann varmepumpe i kaldt klima vil for eksempel ha lavere energidekningsgrad enn en væske/vann varmepumpe med sjø-/innsjøvann som energikilde og tilsvarende effekt. Alternativt vil en luft/vann varmepumpe i mildt kystklima gi vesentlig høyere energidekningsgrad enn tilsvarende anlegg i kaldt innkaldsklima. Med bruk av IDA ICE får man beregningsresultater ved varierende forhold, og dermed et svært godt grunnlag for å kunne designe systemløsninger som er optimalisert både i forhold til energieffektivitet og lønnsomhet i byggets levetid.

3.6 Simulering med forskjellig temperaturnivå på distribusjonssystemene

Ved prosjektering av energisentraler er en av problemstillingene som dukker opp, å bestemme temperaturnivåene på distribusjonssystemene for varme og kjøling. For en varmepumpe er det gunstig med lave temperaturer på distribusjonssystemet, slik at denne kan levere nok effekt og ved best mulig effektfaktor. Men lavere temperaturer på distribusjonssystemet fører til økte anleggskostnader grunnet behov for større radiatorer, varmebatterier og lignende. Tilsvarende har man også for kjøleanlegget. Høyere temperaturnivå på kjøleanlegget gir større andel frikjøling og bedre effektfaktor for kjølemaskinen, men også økte kostnader som følge av større kjølebatterier og fancoiler.

Ved hvilke temperaturnivåer får man anlegget med de laveste kostnadene, totalt for bygging og kjøp av energi i driftsperioden? Videre er det utført simuleringer ved forskjellige temperaturnivåer på varme og kjøleanlegget for å belyse denne problemstillingen.

3.6.1 Energibehov

I energisentralen for PNN fra kapittel 3.1, er temperaturnivået satt til 60/40 °C for varmeanlegget og 10/16 °C for kjøleanlegget. Videre er det utført simuleringer med temperaturnivåene 70/50 og 55/40 °C for varmeanlegget, samt 8/14 og 12/18 °C for kjøleanlegget. I Tabell 3-8 er resultatene fra simuleringene vist.

Tabell 3-8 Beregnet energidekningsgrad og produksjonseffektfaktor for varmepumpe og kjøleanlegg, ved forskjellige temperaturnivåer på varme og kjøleanlegget.

Temperatur varmeanlegg	Temperatur kjøleanlegg	Energi-dekninggrad varmepumpe	Produksjonseffektfaktor varmepumpe	Produksjonseffektfaktor kjøling
[°C]	[°C]	[-]	[-]	[-]
60/40	10/16	82 %	2,48	9,0
70/50	10/16	81 %	2,26	9,0
55/40	10/16	83 %	2,53	9,0
60/40	8/14	83 %	2,49	6,8
60/40	12/18	83 %	2,49	18,0

Som det framkommer av Tabell 3-8 resultatene over vil varmepumpas energidekningsgrad og effektfaktor reduseres noe dersom det velges høyere temperaturnivå på varmeanlegget. Ved lavere temperaturnivå vil vi få motsatt effekt; energidekningsgraden og effekt faktoren øker.

For kjøleanlegget ser man at ved å heve temperaturnivået fra 10/16 til 12/18 °C blir elektrisitetsbehovet til kjølemaskinen halvert, som gir en økning på kjøleanleggets effektfaktor fra 9 til 18. Dette er en betydelig økning og vil få ennå større påvirkning dersom kjølebehov til prosess og avfukting også legges inn i modellen.

3.6.2 Evaluering av simuleringmodell

Ut fra simuleringresultatene i framkommer det at produksjonseffekt faktoren for varme- og kjøleanlegget er helt avhengige av temperaturnivået på de respektive distribusjonssystemer. Dette gjelder særlig for kjøleanlegget, da andelen frikjøling i stor grad påvirkes. Denne informasjonen er svært nyttig ved dimensjonering av anleggene. Ved å benytte simuleringresultatene her sammen med kostnadsendringen for røranleggene ved lavere eller høyere temperaturnivå, vil man få et meget godt verktøy for å dimensjonere anlegget slik at lavest mulige kostnader oppnås for byggets levetid.

Det skal bemerkes at det også her er en svakhet i forhold til at temperaturnivået fra varmepumpa ikke begrenses. Ved å dimensjonere varmeanlegget for 70/50 °C er det store muligheter for at varmepumpa ikke klarer å levere varmt nok vann, selv om byggets effektbehov skulle være lavere enn varmepumpas varmelytelse. Varmepumpas energidekningsgrad vil da ved reelle forhold kunne bli noe lavere enn det som er beregnet i Tabell 3-8. Her må det gjøres en uavhengig vurdering av temperatur på varmedistribusjonssystemet i dimensjoneringspunktet for varmepumpe opp mot de temperaturene den valgte varmepumpa reelt sett klarer å levere.

3.7 Simulering av energisentral med uteluft som energikilde

Energisentraler med sjøvann som energikilde karakteriseres ved at de har en relativt høy investeringskostnad, men stabilt høy temperatur på energikilden gir ofte gode driftsbetingelser for sentralen og lavere kostnader for kjøp av energi. Som alternativ til sjøvann som energikilde kan uteluft benyttes. Dette gir normalt lavere investeringskostnader, men også lavere effektfaktorer for energisentralen, lavere energidekningsgrad for basislast og høyere energikostnader. Videre er det gjort simuleringer med uteluft som energikilde, for å se hvordan IDA ICE kan benyttes i slike vurderinger. Her er væske/vann varmepumpa byttet ut med luft/vann varmepumpe, mens sjøvannet er byttet ut med tørrkjøler for dumping av overskuddsvarme fra kjølemaskinen.

3.7.1 Energibehov

I Tabell 3-9 er energidekningsgrad for varmepumpa og produksjonseffektfaktorer for varme- og kjøleanlegget fra simuleringene, vist.

Tabell 3-9 Beregnet energidekningsgrad for varmepumpe og produksjonseffektfaktor for varme- og kjøleanlegget, ved henholdsvis sjøvann og uteluft som energikilde.

Modell	Installert effekt varmepumpe	Energi-dekningsgrad varmepumpe	Produksjons-effektfaktor varmeanlegg	Produksjons-effektfaktor kjøleanlegg
	[kW]	[-]	[-]	[-]
Energisentral for PNN med sjøvann	650	82 %	2,0	9,0
Energisentral med tørrkjølere	650	78 %	1,9	2,3

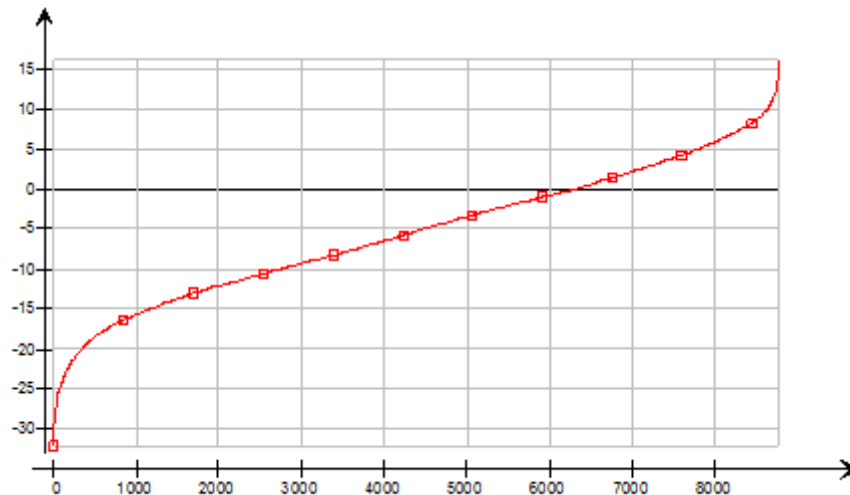
Som det framkommer av simuleringresultatene blir effektfaktor for både varme og kjøleanlegget redusert ved overgang til uteluft som energikilde. Dette gjelder særlig kjøleanlegget, da andelen frikjøling blir sterkt redusert. Dersom kjølebehovet økes ytterligere ved å legge til energibehov for prosesskjøling og avfukting, bli forskjellen enda større mellom sjøvann og uteluft som energikilde.

3.7.2 Evaluering av simuleringmodell

Som det fremkommer i kapittel 3.7.1 er særlig effektfaktoren for kjøling svært påvirket av energikilden, da man ved å benytte uteluft som energikilde får liten grad av frikjøling og høye fordampningstemperaturer på sommeren. Også varmepumpas energidekningsgrad og effektfaktor blir noe lavere med uteluft som energikilde, dog noe høyere enn forventet.

Ved å se på fordampningstemperaturen, vist i Figur 3-9, og effektvarighetskurven for luft/vann varmepumpa over året, fremkommer det at denne leverer maksimal varmeytelse også ved de laveste utetemperaturene. Varmepumpas fordampningstemperatur er i ca 400

t/år på mellom -20 og -35 °C. I praksis vil varmepumper slike temperaturer gått med svært lav COP, hatt hyppige stans for avriming og de ville hatt problemer med å levere vann ved 50 °C. Under reelle forhold ville dette resultert i en lavere energidekningsgrad for varmepumpe og en lavere effektfaktor for varmeanlegget enn det som er beregnet i Tabell 3-9.



Figur 3-9 Fordampningstemperaturen for luft/vann varmepumpe over året.

Beregningene utført med IDA ICE gir likevel meget verdifull informasjon om anlegget, og da særlig for kjøleanlegget. Sammenlignet med bruk av normtall og andre forenklete analyser vil resultatene her ha vesentlig høyere nøyaktighet. Resultatene her vil, sammen med kostnadsberegninger for de forskjellige systemløsningene, dermed være et meget godt vurderingsgrunnlag for å velge den systemløsningen som er mest optimal med tanke på energieffektivitet og totale kostnader i byggets levetid.

Beregningens nøyaktighet ville økes betydelig hvis en enkel temperaturløsningsbegrensning ble satt på drift av varmepumpe. En tilnærming kunne vært å angi maksimal levert effekt som funksjon av utetemperaturen ved 3-4 punkter.

4 KONKLUSJON OG PERSPEKTIVERING

Generelt

Formålet med undersøkelsene beskrevet i denne rapporten har vært å løfte dynamiske simuleringer av energisentraler fram som en mulig teknikk for optimalisering av energiforsyningsløsninger med hensyn til valg av komponenter, systemløsninger, temperaturnivåer med mer. Det er ikke vanlig at energisentralen simuleres, og all prosjektering skjer typisk på basis av forenklede analyser og tommelfingerregler. Muligheten for integrert simulering av energiforsyning og bygg er forholdsvis ny og er blant annet implementert i IDA ICE.

Det er i utgangspunktet to mulige fremgangsmåter for å simulere energiforsyningssystemer i IDA ICE. Den ene er å benytte prefabrikkerte energiforsyningsmoduler for å bygge opp en sentral som ligner den en ønsker å arbeide med. Den andre er å bygge energisentralen fra bunnen av, med alle komponenter og styringssekvenser som fremkommer av systemskjemaet. I dette prosjektet er det valgt å benytte de prefabrikkerte modulene for å bygge opp en sentral som ligner på den tenkte energisentralen ved Nytt Nasjonalmuseum, for så å jobbe med enkeltkomponentene i energisentralen.

Vurdering av simuleringstid

For å kunne utføre simuleringer av energisentralen i IDA ICE byttes standardversjonen av energisentralen ut med ESBO sentral, som er en mer kompleks modell for energisentralen. Dette gir også lengre simuleringstid, og ved overgang fra standard energisentral til den enkleste utgaven av ESBO sentral blir simuleringstiden ca 70 % lengre. Ved også å integrere en varmepumpe som grunnlastkilde og kjølemaskin mot tørrkjøler, blir simuleringstid ca 240 % lengre. Det er her viktig at akkumulatortankene i energisentralmodellen dimensjoneres store nok, idet for små dimensjoner medfører unødig lang simuleringstid.

Simuleringstiden for standard sentral var for modellen ca 40 minutter, mens den for modell PNN i ESBO sentralen var på ca 1 time og 50 minutter. Ved praktisk anvendelse virker denne simuleringstiden noe lang, da det ofte trengs en del simuleringer for testing av beregningsmodellen før de reelle simuleringene kjøres. Ved praktisk anvendelse kan dette løses ved å benytte versjonshåndtering i IDA ICE. Da kan flere versjoner av energisentralen klargjøres og kjøres etter hverandre sekvensielt, for eksempel på nattestid.

Simuleringer med ESBO sentral

I ESBO sentral er det bygget en energisentral som ligner på den som vurderes ved Nytt Nasjonalmuseum. Modellen for energisentralen er benyttet for å simulere energiforbruket for de forskjellige delene i sentralen, samt til å simulere enkeltkomponenter det ofte er knyttet usikkerhet til ved optimalisering av energisentraler.

Energisentralen er bygget opp ved hjelp av prefabrikkerte enheter for kjeler, varmpumper, kjølemaskiner og lignende. Grensesnittet med å kunne velge mellom ulike prefabrikkerte komponenter gjør at det er enkelt og lite tidkrevende å bygge en sentral som blir svært lik systemløsningen som er tenkt for prosjektet. Kvalitet på de prefabrikkerte komponenter i modell er også god og det er mulig å legge inn relevant inndata. Det er også mulig å bygge opp sentralen fra bunnen med alle nødvendige styringssekvenser, men dette er vesentlig mer tidkrevende og krever svært høy kompetanse for brukeren. Det virker dermed mest fornuftig å benytte de prefabrikkerte modulene, dersom IDA ICE skal benyttes ved optimalisering av energiforsyningsløsningen i reelle prosjekter.

Styringssekvensene i ESBO ved å benytte prefabrikkerte moduler virker lovende, men noe unyansert. Her kom det ved simuleringene fram noen svakheter. Det ble blant annet observert at det ikke ligger inne temperaturbegrensninger for varmpumper og kjølemaskiner, verken på fordampere eller kondensatoren, som tilsvarer de begrensningene reelle produkter har. Det ble ved simuleringene registrert fordampertemperaturer ned mot -35 °C og utgående vanntemperatur fra kondensatorene på over 90 °C , både for varmpumpa og kjølemaskinen. Dette vil gjøre at varmpumpas beregnede energileveranse vil bli noe høy i forhold til reelle forhold, da den i modellen klarer hele temperaturløftet på tappevannet ved lavt effektbehov.

Dette gjør også at det må utføres egne vurderinger av laveste og største mulige størrelse på komponenter, og at simuleringene med IDA ICE må utføres innenfor disse grensene. Dette gjelder for eksempel for installert effekt for energikilden, eller om det benyttes varmeanlegg med høye temperaturer. Simuleringsresultatene må derfor vurderes nøye opp mot reelle forhold og det kreves høy brukerkompetanse, både i forhold til bruk av beregningsprogrammet og i forhold til prosjektering av slike energisentraler.

Systemvirkningsgrader

De veiledende systemvirkningsgrader i NS 3031 er beregnet iht. NS-EN 15316:2007, og det er mulig å dokumentere egne systemvirkningsgrader ved å benytte metodikken i NS-EN 15316. Systemvirkningsgradene er oppdelt i produksjons- distribusjons- og reguleringsvirkningsgrad. IDA ICE er i utgangspunktet godt egnet for å beregne alle delelementer i systemvirkningsgradene, og vil ved korrekt implementering gi mer presise resultater enn metodikken i NS-EN 15316. Vi ser at det er mulig å benytte IDA ICE for å dokumentere systemvirkningsgrader til bruk i blant annet energimerkeberegninger, men det vil kreve en kombinasjon av utbygging av ESBO sentralen og en etterbehandling av resultatene. Fremgangsmåten for slike arbeider vil trenge en egen utredning.

Perspektivering

Etter å ha gjennomført en rekke simuleringer framstår IDA ICE som et godt verktøy som gir mulighet for å simulere alle deler av energisentralen. Her kan de energiproduserende enhetene kobles sammen med byggets energibehov, temperaturforhold på energikilden og

distribusjonssystemer, og med samspill med andre komponenter i energisentralen. Resultatene kan benyttes for å optimalisere temperaturnivåer og komponenter slik at en oppnår best mulig samspill og lavest mulig energibehov. Ved også å knytte resultatene opp mot kostnader for forskjellige alternativer, kan energisentralen dimensjoneres riktigst mulig i forhold til både byggekostnader og kostnader ved kjøp av energi i driftsfasen. Beregningene utført med IDA ICE er teoretiske, ideelle beregninger. Men den store mengden informasjon som ligger inne i modellen, samt svært godt forståelse av prosessene for tekniske anlegg i bygg, gir beregningene stor grad av nøyaktighet sammenlignet med bruk av tommelfingerregler og varighetskurver for typiske bygg.

5 VIDERE ARBEIDER

Det er behov for å følge opp på det arbeidet som er fremlagt her, dvs. å benytte dynamisk simulering av energisentraler som en mulig teknikk for optimalisering av energiforsyningsløsninger. I dette arbeidet er det viktig å arbeide mer med hvilke muligheter og begrensninger som ligger i metodikken, og hvordan den kan videreutvikles slik den blir mer praktisk anvendelig.

Vi ser følgende emner som særlig aktuelle for oppfølgingsprosjekter:

- Tilsvarende simuleringer av en energisentral utføres på en lettere beregningsmodell for å se hvordan dette påvirker brukervennlighet i forhold til simuleringstid.
- Behov for dataromskjøling og eventuelt andre energibehov implementeres i simuleringmodellen, slik at energibehovet over året blir mer reelt.
- Det jobbes videre med å lage egne styringssystemer for enkeltkomponenter som varmepumpe og kjølemaskin, slik at reelle temperaturbegrensninger kan implementeres.
- Sammenligning av dokumentasjon av systemvirkningsgrader opp mot NS-EN 15316, slik at simuleringverktøyet kan brukes til beregning av levert energi i energimerkeberegninger. I dette arbeidet bør det være fokus på den foreløpige NS-EN 15316:2015

I tillegg vil det være ønskelig at enkelte av funnene gjort i dette arbeidet også implementeres i IDA ICE ESBO, av programutvikler Equa:

- Det bør legges temperaturbegrensning på varmepumpe og kjølemaskin. Her kan minimal og maksimal temperatur enten settes inn av bruker, eller det kan gjøres ved å velge kuldemedium for maskinen, samt om det er en ettrinns- eller totrinnsvarmepumpe.
- Det bør legges inn mulighet for alternativ systemoppbygning av tappevannsberedning og innkobling av spisslasten. Systemet kan bygges opp ved at det kun er grunnlastkilden på varmeanlegget som kobles opp mot akkumuleringstanken. Spisslastkilden kan da kobles direkte inn på kursene for radiatorer, ventilasjon og tappevann. Dette kan implementeres etter at det er lagt inn temperaturbegrensning på grunnlastkilden, og vil sørge for at spisslastkilden kun tar det siste nødvendige temperaturløftet på hver av varmekursene.
- Videreutvikling av beregningsmetodikk, slik at simuleringstiden reduseres. Simulering av energisentraler vil i praksis være mest relevant for komplekse sentraler og undersøkelsene i denne rapporten viste at komplekse sentraler øker simuleringstiden betraktelig.

RÅDGIVERE MED SPISSKOMPETANSE

Erichsen & Horgen er Norges største rådgiverselskap med spisskompetanse innen VVS, energi og klimateknikk, særlig for bygg i kaldt klima. Våre ingeniører leverer i tillegg et bredt spekter av tilgrensende spesialiserte tjenester for bygge- og eiendomsbransjen.

Vi yter rådgivning og prosjektering for alle prosjektfaser fra utvikling og utredning av muligheter, via detaljering av planer til bygging/implementering og drift.

Vi deltar aktivt i utvikling av vårt fag, både ved deltakelse i komiteer, arbeidsgrupper og ved forskning og utvikling innenfor de fag vi har spisskompetanse i.

Årlig utføres flere hundre store og små oppdrag innenfor følgende områder:

- Inneklima
- Dagslys
- Energibruk
- Miljø
- Bygningsfysikk
- Brannteknikk
- Sanitær og utendørs VVS
- Energiforsyning
- Varmeanlegg
- Gass varmeanlegg
- Medisinsk gass og trykkluft
- Kuldeanlegg
- Luftbehandlingsanlegg
- Luftkjøleanlegg
- Automatikk og SD-anlegg
- Avfallsug og støvsugeranlegg