

# Sammenligning av beregnet og målt energibruk i energieffektive skolebygninger

**Britt Comfort Hvinden**

Master i energi og miljø

Innlevert: juni 2016

Hovedveileder: Hans Martin Mathisen, EPT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for energi- og prosesseteknikk



EPT-M-2016-60

**MASTEROPPGAVE**

for

Student

Britt Comfort Hvinden

Våren 2016

**Sammenligning av beregnet og målt energibruk i energieffektive skolebygninger***Comparison of calculated and measured energy use in energy efficient school buildings***Bakgrunn og målsetting**

Gjennom bruk av data fra prosjekter som har fått investeringsstøtte fra ENOVA og annen informasjon skal oppgaven bidra til å avdekke årsaker til det ofte forekommende avvik mellom målt og prosjektert energibruk i næringsbygg.

Drift av energisystemer, driftstid for anlegg, bruk av formålsdelt energibruk for å avdekke feil osv er viktig for energibruken. Eventuelle avvik mellom forutsetninger i energiberegninger og utførelse av byggene bør også avdekkes. Aktuelle bygninger er Marienlyst skole i Drammen og Nardo skole i Trondheim.

Oppgaven utføres i samarbeid med ENOVA. Arbeidet er en fortsettelse av fordypningsprosjektet.

**Mål**

Målet er å avdekke hvilke avvik som finnes mellom beregnet og målt energibruk på energipostnivå for to skoler og hva som kan være årsaken til eventuelle avvik.

**Oppgaven kan bearbeides ut fra følgende punkter**

1. Litteraturstudie. Supplere litteraturstudien som ble gjort i prosjektoppgaven.
2. Innhente måledata fra Nardo skole i Trondheim og Marienlyst skole i Drammen.
3. For Nardo er det tidligere utført et grundig studentarbeid med sammenligning mellom simulert og brukt energi. I denne masteroppgaven begrenses arbeidet til å undersøke om det har vært endringer i energibruk i forhold til simulert etter 2010.
4. Sammenligning av simulert og målt energibruk for Marienlyst skole
5. Gjennomgå designgrunnlaget for bygningene og sammenligne med utførelsen
6. Vurdere behov for detaljerte simuleringer for å avdekke eventuelle avvik.
7. Eventuelt etablere modell og utføre simuleringer med IdaIce eller Simien.

Senest 14 dager etter utlevering av oppgaven skal kandidaten levere/sende instituttet en detaljert fremdrift- og eventuelt forsøksplan for oppgaven til evaluering og eventuelt diskusjon med faglig ansvarlig/veiledere. Detaljer ved eventuell utførelse av dataprogrammer skal avtales nærmere i samråd med faglig ansvarlig.

Besvarelsen redigeres mest mulig som en forskningsrapport med et sammendrag både på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, innholdsfortegnelse etc. Ved utarbeidelsen av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velkrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelsen legges det stor vekt på at resultatene er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte, og at de er diskutert utførlig.

Alle benyttede kilder, også muntlige opplysninger, skal oppgis på fullstendig måte. For tidsskrifter og bøker oppgis forfatter, tittel, årgang, sidetall og eventuelt figurnummer.

Det forutsettes at kandidaten tar initiativ til og holder nødvendig kontakt med faglærer og veileder(e). Kandidaten skal rette seg etter de reglementer og retningslinjer som gjelder ved alle (andre) fagmiljøer som kandidaten har kontakt med gjennom sin utførelse av oppgaven, samt etter eventuelle pålegg fra Institutt for energi- og prosesssteknikk.

Risikovurdering av kandidatens arbeid skal gjennomføres i henhold til instituttets prosedyrer. Risikovurderingen skal dokumenteres og inngå som del av besvarelsen. Hendelser relatert til kandidatens arbeid med uheldig innvirkning på helse, miljø eller sikkerhet, skal dokumenteres og inngå som en del av besvarelsen. Hvis dokumentasjonen på risikovurderingen utgjør veldig mange sider, leveres den fulle versjonen elektronisk til veileder og et utdrag inkluderes i besvarelsen.

I henhold til "Utfyllende regler til studieforskriften for teknologistudiet/sivilingeniørstudiet" ved NTNU § 20, forbeholder instituttet seg retten til å benytte alle resultater og data til undervisnings- og forskningsformål, samt til fremtidige publikasjoner.

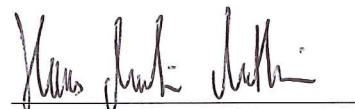
Besvarelsen leveres digitalt i DAIM. Et faglig sammendrag med oppgavens tittel, kandidatens navn, veileders navn, årstall, instituttnavn, og NTNUs logo og navn, leveres til instituttet som en separat pdf-fil. Etter avtale leveres besvarelse og evt. annet materiale til veileder i digitalt format.

- Arbeid i laboratorium (vannkraftlaboratoriet, strømningsmekanisk, varmeteknisk)  
 Feltarbeid

NTNU, Institutt for energi- og prosesssteknikk, 13. januar 2015



Olav Bolland  
Instituttleder



Hans Martin Mathisen  
Faglig ansvarlig/veileder

Medveileder(e):  
Tor Brekke  
Monica Berner

## FORORD

---

Denne masteroppgaven er skrevet for faget «TEP4935 Energiplanlegging og miljøanalyse, masteroppgave» og er avsluttende oppgave for det femårige sivilingeniørstudiet Energi og miljø på NTNU. Oppgaven er skrevet ved Institutt for Energi- og prosesssteknikk.

Da tiden var kommet for å begynne å tenke på hva jeg ville skrive prosjekt- og masteroppgave om på vårparten 2015, tenkte jeg at jeg ville skrive om noe viktig og nyttig. Masteroppgaven skal jo være krona på verket etter hele 18 års skolegang, så her var det bare å sikte høyt. Jeg kontaktet derfor Enova og spurte om de hadde noen gode forslag til tema de gjerne ville at skulle belyses i en masteroppgave. Det var startskuddet for et år med mye lesing, modellering, skrivning, korrekturlesing, omskriving og ikke minst læring. Resultatet er blekka du har i hendene nå.

Jeg har fått mye hjelp underveis i arbeidet med oppgaven og vil gjerne takke alle som har bidratt.

Veilederen min Hans Martin Mathisen vil jeg gjerne takke for gode råd og veiledning det siste året, og for å alltid være tilgjengelig når jeg har trengt hjelp til både stort og smått.

Hos Enova vil jeg rette en stor takk til medveilederne mine Tor Brekke og Monica Berner, for muligheten til å skrive denne oppgaven og for gode tips og råd underveis med arbeidet.

Ivar Ørnes ved Erichsen & Horgen har hjulpet meg med IDA ICE, uten den hjelpen hadde jeg sikkert sittet med modellen enda.

Drammen Eiendom, ved Geir Andersen, fortjener også en stor takk for å ha satt av tid til å hjelpe meg med befaringer ved, og møter om Marienlyst skole flere ganger denne våren.

Pappa, takk for at du tålmodig korrekturleste både prosjekt- og masteroppgaven.

Og til slutt tusen takk til alle mine medstudenter som jeg har hatt lange faglige relevante og totalt irrelevante samtaler med i år. Spesielt vil jeg takke Jentene for fabelaktige år som studenter sammen her i Bartebyen, dere vet hvem dere er!



Britt Comfort Hvinden

Trondheim, juni 2016

(Forsidebildet er gjengitt med tillatelse av div.A Arkitekter)



## SAMMENDRAG

---

Denne masteroppgaven har som mål å avdekke hvilke avvik som finnes mellom målt og beregnet energibruk i energieffektive skoler, og hva som kan være årsaken til eventuelle avvik. Det ble valgt å undersøke to energieffektive skoler i forbindelse med oppgaven. Skolene som ble valgt er Norges første passivhusskole Marienlyst skole i Drammen, og lavenergiskolen Nardo skole i Trondheim.

Avvik mellom målt og beregnet energibruk ble avdekket ved å sammenligne data innhentet fra energioppfølgingssystemene med resultat fra energimodellene av skolene laget da de ble bygget. For å finne årsakene til avvik ble dataene analysert og satt i sammenheng med en litteraturstudie om brukeratferd og energieffektiv drift av bygninger. Tidligere studentarbeid om energibruken ved Nardo skole har blitt benyttet for å avdekke eventuelle årsaker til avvik mellom målt og beregnet energibruk. For Marienlyst skole har en modell i energisimuleringsverktøyet IDA ICE blitt brukt til å gjennomføre en parameterstudie med følgende parametere:

- Samtidighet i sonen
- Maksimal tillatt CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i sonen
- Virkningsgrad til varmegjenvinner
- Settpunkttemperatur i sonen
- Maksimal luftmengde til sonen.

Ved begge skolene, ble det funnet to hovedårsaker til avvik mellom målt og beregnet energibruk: feildrift av tekniske anlegg og brukeratferd som ikke er energieffektiv. Et velfungerende og oversiktlig energioppfølgingssystem bør installeres. Driftspersonell må få ordentlig opplæring i hvordan data fra energioppfølgingssystemet innhentes og analyseres, for å sikre energieffektiv drift av bygget. For å fremme energieffektiv brukeratferd må brukerne opplyses om hvordan deres handlinger påvirker byggets tekniske anlegg, og dermed energibruken. Feil antagelser om brukerbehov, og dermed drift når beregningene utføres kan medføre en økning i avvik mellom målt og beregnet energibruk.





## ABSTRACT

---

This master's thesis aims to uncover and substantiate deviations between measured and calculated energy use in energy efficient school buildings. Two energy efficient schools were chosen to be evaluated with respect to their energy use; Norway's first school with passive-house standard, Marienlyst School in Drammen, and a low-energy school in Trondheim, Nardo School.

Deviations between measured and calculated energy use have been identified by comparing data collected from the schools' energy monitoring systems and results from energy models made of the schools. To find the causes of the deviations, data have been analyzed and put into context with a literature study on user behavior and energy efficient operation of buildings. Findings from an extensive student report on the energy efficiency of Nardo School have been used as a basis to uncover the cause of deviations between measured and calculated energy use there. At Marienlyst School, a model made in the energy simulation program IDA ICE has been used to conduct a parameter study where the following parameters have been investigated:

- Simultaneity in the zone
- Maximum permitted CO<sub>2</sub> concentration in the zone
- Heat exchanger efficiency
- Set point temperature in the zone
- Maximum airflow to the zone.

At both schools, two main factors have been found to cause deviations between measured and calculated energy use: incorrect operation of technical systems, and user behavior that is not energy efficient. A well-functioning and orderly energy monitoring system should be installed and staff properly trained to collect and analyze data, in order to provide energy efficient operation of the building. To promote energy efficient user behavior, users must be informed how their actions affect the technical systems and thereby the energy use. In addition, wrong assumptions about user demands and thereby building operation can be made in calculations, which can result in increased deviations between measured and calculated energy use.



# INNHold

---

Forord .....	i
1 Sammendrag .....	iii
2 Abstract .....	v
Innhold .....	vii
Tabelliste .....	xi
Figurliste.....	xiii
1 Innledning .....	1
1.1 Bakgrunn .....	1
1.2 Sammendrag av prosjektoppgaven.....	2
1.3 Problemstilling.....	3
1.4 Rapportens oppbygning .....	3
1.5 Avgrensninger .....	4
2 Simuleringsverktøy .....	5
2.1 Energi i Bygninger.....	5
2.2 SIMIEN .....	5
2.3 IDA ICE.....	6
3 Energikrav, beregningsmetoder og etterprøving av energibruk .....	7
3.1 Energikrav til bygninger .....	7
3.1.1 Minstekrav til bygninger .....	7
3.1.2 Passivhus og lavenergibygninger .....	8
3.2 Beregning av bygningers energiytelse, metode og data .....	8
3.2.1 NS 3031 .....	8
3.2.2 Beregningsmetoder for energibruk i bygninger .....	10
3.2.3 Værkorrigerings i beregninger.....	11
3.2.4 Virkningsgradskorrigerings for varmesystemer .....	12
3.3 Etterprøving av energibruk i bygninger.....	12
3.3.1 Metodikk .....	12
3.3.2 Korrigerings av væravhengig energibruk .....	13
3.3.3 Målerstruktur og målertype.....	15

4	Avvik mellom energiberegninger og målt energibruk.....	17
4.1	Drift av bygninger i energibruksperspektiv.....	17
4.1.1	Generelt om drift av bygninger med hensyn på energibruk.....	18
4.1.2	Verktøy for energieffektiv drift av bygninger.....	21
4.2	Energirelatert brukeratferd i bygninger.....	23
4.2.1	Generelt om energirelatert brukeratferd.....	23
4.2.2	Brukeratferd i energiberegninger og -simuleringer.....	25
5	Presentasjon av skolene.....	27
5.1	Marienlyst skole.....	27
5.1.1	Generelt om Marienlyst skole.....	27
5.1.2	Klima i Drammen.....	29
5.1.3	Tekniske anlegg.....	30
5.1.4	Energioppfølgingssystem.....	30
5.1.5	Målerstruktur.....	31
5.1.6	Materialer og konstruksjon.....	33
5.1.7	Inneklima ved Marienlyst skole.....	33
5.2	Nardo skole i Trondheim.....	35
5.2.1	Generelt om Nardo skole.....	35
5.2.2	Klima i Trondheim.....	37
5.2.3	Tekniske anlegg.....	37
5.2.4	Energioppfølgingssystem.....	38
5.2.5	Målerstruktur.....	38
5.2.6	Materialer og konstruksjon.....	41
5.2.7	Innemiljø ved Nardo skole.....	43
5.2.8	Evaluering av energibruk i 2009/2010.....	44
6	Energisimuleringsmodell av Marienlyst skole.....	47
6.1	Generelt.....	47
6.2	Soneinndeling.....	47
6.3	Vinduer og dører.....	50
6.4	Standardverdier i IDA ICE.....	51
6.5	Ventilasjonsaggregat.....	51

6.6	Varmesentral.....	52
6.7	Settpunkter i sonene.....	52
7	Beregninger.....	53
7.1	Parameterstudie .....	53
7.1.1	Valg av metode.....	53
7.1.2	Valg av parametere.....	54
7.2	Temperaturkorrigering.....	56
7.3	Virkningsgradkorrigering .....	59
8	Data fra energioppfølgingssystem .....	61
8.1	Energibruk ved Marienlyst skole.....	61
8.1.1	Generelt om energibruk ved Marienlyst skole .....	61
8.1.2	Energibruk oppvarming.....	63
8.1.3	Varmt tappevann .....	65
8.2	Energibruk ved Nardo skole.....	66
8.2.1	Generelt om energibruk ved Nardo skole .....	66
8.2.2	Energibehov til oppvarmingsformål.....	69
9	Resultat .....	71
9.1	Tidligere modeller .....	71
9.1.1	Marienlyst skole: SIMIEN .....	71
9.1.2	Nardo skole: Energibruk i bygninger .....	72
9.2	IDA ICE.....	73
9.2.1	Basemodellen .....	73
9.2.2	Resultat fra IDA ICE til regresjonsanalyse .....	77
9.3	Regresjonsanalyse av parametere.....	79
9.3.1	Levert fjernvarme.....	79
9.3.2	Romoppvarming.....	82
9.3.3	Ventilasjonsvarme.....	84
9.3.4	Ventilasjonsvifter .....	88
9.3.5	Gjenvunnet ventilasjonsvarme .....	91
9.4	Sammenligning av resultat og data fra energioppfølgingssystem .....	93
9.4.1	Sammenligning av energiregnskap .....	93

9.4.2	Sammenligning av levert energi.....	95
10	Diskusjon.....	97
10.1	Avvik mellom målt og beregnet energibruk.....	97
10.1.1	Marienlyst skole .....	97
10.1.2	Nardo skole .....	100
10.2	Drift og brukeratferd.....	102
10.3	Parameterstudie .....	103
10.4	Modellen i IDA ICE .....	105
11	Konklusjon .....	107
12	Videre arbeid .....	109
	Bibliografi .....	111
	Vedlegg .....	I
1.	Opphavsrettsnotis Hvinden .....	I
2.	Energiflytskjema Marienlyst skole.....	II
3.	Digitalt vedlegg: Modell av Marienlyst skole.....	V

## TABELLISTE

---

Tabell 3-1 Liste over de ulike bygningskategoriene .....	7
Tabell 3-2 Oppdeling av levert energi i energivarer basert på Tabell 7 i NS 303 .....	9
Tabell 3-3 Netto energi budsjett basert på Tabell 5 i NS 3031 .....	10
Tabell 5-1 Fakta om Marienlyst skole.....	29
Tabell 5-2 Sammenligning av tekniske spesifikasjoner ved Marienlyst skole .....	29
Tabell 5-3 Generelle fakta Nardo skole .....	37
Tabell 5-4 Tekniske spesifikasjoner ved Nardo skole .....	37
Tabell 5-5 Sammenligning av målt energibruk med prosjektert energibruk fra rådgivende ingeniør VVS Norplan og tredjepartskontroll Isocare AS .....	44
Tabell 6-1 Oversikt type soner og hvor mange soner av hver type modellen inneholder.....	48
Tabell 7-1 Antall $2^k$ faktoriale-eksperiment som må kjøres med hensyn på antall faktorer som skal undersøkes.....	53
Tabell 7-2 Oversikt over parametere og verdier undersøkt i regresjonsanalysen .....	54
Tabell 7-3 Beregnet basetemperatur for ulike varmetekniske standarder. ....	56
Tabell 7-4 Målt utetemperatur ved Marienlyst skole 2012-2015.....	56
Tabell 7-5 Målt utetemperatur Nardo skole 2010-2015.....	57
Tabell 7-6 Utetemperatur oppgitt for referanseklime Oslo. Basert på tabell M.1 i NS 3031 .....	57
Tabell 7-7 Temperaturkorrigeringsfaktorer for Marienlyst skole 2012-2015.....	58
Tabell 7-8 Temperaturkorrigeringsfaktor for Nardo skole 2010-2015. ....	58
Tabell 8-1 Spesifikk temperaturkorrigert energibruk ved Marienlyst skole 2012-2015.....	61
Tabell 8-2 Avvik mellom Fjernvarme og Hovedstokk varmeanlegg oppgitt i kWh. ....	66
Tabell 8-3 Energibruk for Nardo skole 2010-2015.....	66
Tabell 9-1 Simulering av prosjektert energibudsjett for Marienlyst skole.....	71
Tabell 9-2 Simulering av prosjektert levert energi til Marienlyst skole .....	72
Tabell 9-3 Simulering av prosjektert energibudsjett for Nardo skole.....	72
Tabell 9-4 Simulering av prosjektert levert energi ved Nardo skole .....	73
Tabell 9-5 Oversikt over levert energi, delt inn i enkelte energiposter. Skjermdump IDA ICE....	74
Tabell 9-6 Termisk energibehov per måned. Skjermdump IDA ICE. ....	75
Tabell 9-7 Resultater fra IDA ICE: Levert fjernvarme [kWh/m <sup>2</sup> år].....	78
Tabell 9-8 Resultater fra IDA ICE: Romoppvarming [kWh/m <sup>2</sup> år].....	78

Tabell 9-9 Resultater fra IDA ICE: Ventilasjonsvarme [kWh/år]. .....	78
Tabell 9-10 Resultater fra IDA ICE: Vifter ventilasjon [kWh/m <sup>2</sup> år].....	78
Tabell 9-11 Resultater fra IDA ICE: Varme gjenvunnet i ventilasjonsanlegget [kWh/m <sup>2</sup> år]. .....	79



## FIGURLISTE

---

Figur 2-1 Eksempel på hvordan IDA ICE grafisk kan fremstille resultater. IDA ICE.....	6
Figur 3-1 Flytskjema av beregningsprosedyre basert på Figur 1 i NS 3031.....	11
Figur 3-2 Anbefalt målerstruktur for yrkesbygg basert på Dokka og Grini (2013).....	16
Figur 4-1 Prosjektorganisering for Papirbredden 1. Basert på Helmen, (2016). ....	20
Figur 4-2 Prosjektorganisering Papirbredden 3, basert på Helmen, (2016).....	21
Figur 4-3 Kontinuerlig funksjonskontroll sørger for flyt av informasjon gjennom hele livsløpet til bygget, basert på Figur 1 i Nord et al., (2012).....	22
Figur 5-1 Foto av sørvest og nordvest fasaden til Marienlyst skole, Foto: div.A Arkitekter, gjengitt med tillatelse.....	27
Figur 5-2 Nordvest fasaden til Marienlyst skole, innsyn til Amfiet. Foto: div.A Arkitekter, gjengitt med tillatelse.....	28
Figur 5-3 Amfiet sett fra 2. etasje. Foto: div.A Arkitekter, gjengitt med tillatelse.....	28
Figur 5-4 Skjerm bilde av EOS Marienlyst skole.....	31
Figur 5-5 Energiflytskjema termiske kurser ved Marienlyst skole.....	33
Figur 5-6 Nardo Skole. Arkitekt: Eggen Arkitekter Foto: synlig.no, gjengitt med tillatelse.....	35
Figur 5-7 Landskapsplan Nardo skole og barnehage. Illustrasjon Løvetanna Landskap AS, gjengitt med tillatelse.....	36
Figur 5-8 Skjerm bilde EOS Nardo skole.....	38
Figur 5-9 Utsnitt fra EnergiGuiden Pluss som viser Årsrapport.....	40
Figur 5-10 Avvik mellom målt levert elektrisk energi og målt brukt elektrisk energi for 2015....	41
Figur 5-11 Bruk av massivtre i Nardo skole og barnehage illustrasjon Eggen Arkitekter AS, gjengitt med tillatelse.....	42
Figur 5-12 Fellesareal på Nardo skole. Arkitekt: Eggen Arkitekter Foto: synlig.no, gjengitt med tillatelse.....	42
Figur 6-1 Soneinndeling i 3. etasje på Marienlyst skole laget i IDA ICE.....	48
Figur 6-2 Skjerm bilde av 2. etasje som viser soneinndeling i IDA ICE modellen.....	49
Figur 6-3 3D-illustrasjon av Marienlyst skole fra IDA ICE.....	50
Figur 7-1 Sammenligning av antall simuleringer som må kjøres dersom antall verdier per faktor økes.....	54
Figur 8-1 Oversikt over årlig energibruk for 2015.....	62

Figur 8-2 Levert energi til Marienlyst skole 2012-2015.....	63
Figur 8-3 Total temperaturkorrigert spesifikk energibruk til oppvarmingsformål 2012-2015 ved Marienlyst skole.....	63
Figur 8-4 Ukorrigert spesifikk energibruk til oppvarming ved Marienlyst skole 2012-2015.....	64
Figur 8-5 Spesifikk energibruk til oppvarming Marienlyst skole.....	65
Figur 8-6 Energiregnskap for Nardo skole 2015.....	67
Figur 8-7 Levert energi til Nardo skole 2010-2015, fordelt mellom direkte el, el til varmepumpe og fjernvarme.....	68
Figur 8-8 Tilgjengelig energi til drift av skolen og tekniske anlegg 2010-2015.....	68
Figur 8-9 Sammenligning av energibruk med tilgjengelig energi.....	69
Figur 8-10 Sammenligning av energibruk til vifter og ventilasjonsvarme for Nardo skole.....	69
Figur 9-1 Oversikt over levert energi, inndelt i enkelte energiposter per måned. Skjermdump IDA ICE.....	74
Figur 9-2 Effektbehov for termisk energi. IDA ICE.....	75
Figur 9-3 Energiflyt i ventilasjonsaggregatet per måned. IDA ICE.....	76
Figur 9-4 Temperaturer i ventilasjonsaggregatet. IDA ICE.....	76
Figur 9-5 Temperaturer i klasserommet i sørvestlige hjørne av bygget. IDA ICE.....	77
Figur 9-6 Datasett for levert fjernvarme sortert med hensyn på parameteren virkningsgrad for varmegjenvinner.....	80
Figur 9-7 Datasett for levert fjernvarme sortert med hensyn på parameteren settpunkttemperatur i sonen.....	81
Figur 9-8 Settpunkttemperatur har stor innvirkning på energibehovet til romoppvarming.....	82
Figur 9-9 Økt samtidighet i rommet samtidig som settpunkttemperaturen i rommet økes har tydelig sammenheng.....	83
Figur 9-10 Virkningsgrad til varmegjenvinneren har stor innflytelse på energibehovet til ventilasjonsvarme.....	84
Figur 9-11 Ved lavere maksimum grense for tillatt CO <sub>2</sub> -konsentrasjon i rommet er det mulig å oppnå betydelig høyere energibehov.....	85
Figur 9-12 Når maksimal tillatt CO <sub>2</sub> -konsentrasjon i rommet økes samtidig som virkningsgraden til varmegjenvinneren forbedres reduseres energibehovet ytterligere.....	86
Figur 9-13 Dataserier med CO <sub>2</sub> -konsentrasjon som konstant variabel.....	87

Figur 9-14 Økt samtidighet i sonen fører i gjennomsnitt til høyere energibehov til ventilasjonsvarme. ....	88
Figur 9-15 Større luftmengder kan føre til høyere energibruk. ....	89
Figur 9-16 Høyere tillatt CO <sub>2</sub> -konsentrasjon i sonen fører til lavere energibehov. ....	90
Figur 9-17 Mengden personer tilstede har stor innflytelse på hvor mye varme som gjenvinnes i ventilasjonsanlegget. ....	91
Figur 9-18 Økt tillatt CO <sub>2</sub> -konsentrasjon rommet fører til at mindre varme blir gjenvunnet i ventilasjonsanlegget. ....	92
Figur 9-19 Sammenligning av simulert og målt energiregnskap for 2015 for Marienlyst skole ...	93
Figur 9-20 Sammenligning av simulert og målt energiregnskap for 2015 for Nardo skole .....	94
Figur 9-21 Simulert levert energi sammenlignet med målt levert energi for Marienlyst skole .....	95
Figur 9-22 Simulert levert energi sammenlignet med målt levert energi for Nardo skole .....	96
Figur 9-23 Simulert levert energi sammenlignet med målt levert og produsert energi for Nardo skole .....	96



# 1 INNLEDNING

---

I dette kapitlet presenteres bakgrunnen for hvorfor denne masteroppgaven er av samfunnsmessig interesse, samt funnene gjort i forarbeidet i prosjektoppgaven som har bidratt til å forme hva som undersøkes i masteroppgaven (Hvinden, 2015). Rapportens oppbygging gjennomgås, og hvilke avgrensninger som er gjort.

Det er antatt at leseren av denne oppgaven har teknisk forståelse og grunnleggende kunnskap om energibruk i bygninger og begrep knyttet til fagfeltet.

## 1.1 BAKGRUNN

I Norge står bygningssektoren for omlag 40 % av den totale energibruken. For å få ned energibruken i landet har myndighetene klare ambisjoner om å kutte drastisk ned på blant annet energibruk i bygninger (dibk, 2015). Enova SF ble stiftet i Trondheim i juni 2001, og er eid av Olje- og energidepartementet. Formålet med stiftelsen er å samle alle offentlige midler til energiøkonomisering (enøk) og nye fornybare energikilder i én slagkraftig organisasjon (Energi departementet, 2007). Gjennom rådgivning og økonomisk støtte skal Enova stimulere til omlegging til mer effektiv energibruk og energiproduksjon, og utvikling av nødvendig teknologi for å utføre dette. Enova bidrar til utvikling av mer energieffektive bygg gjennom å gi økonomisk støtte til prosjekter som bidrar til utvikling av ny energiteknologi eller har høye miljøambisjoner (Enova, 2015).

I 2013 startet Enova prosjektet *Formålsdelt energibruk i energieffektive yrkesbygg*. Prosjektet har fulgt tre skolebygninger og syv kontorbygg, som alle har fått økonomisk støtte fra Enova og kan klassifiseres som lavenergi- eller passivhusbygg etter standarden NS 3701. Gjennom prosjektet ønsker Enova å dokumentere hva den faktiske energibruken er i disse typer yrkesbygg. Dette skal gjøres ved å fordele energibruken til ulike formål på forskjellige energiposter som belysning, ventilasjon, oppvarming og kjøling (Enova, 2015). Hensikten med formålsdelt etterprøving av energibruk er blant annet å:

- Avdekke driftsfeil.
- Kontrollere om enøktiltak har effekt på energibruken.
- Åpne for muligheten til å etablere et sammenlignbart oppsett for energimålinger i bygninger innen samme bygningskategori.

I tillegg har loggdataene fra formålsdelt energibruk forskningsverdi, da det muliggjør detaljert analyse av energibruk og levert energi over tid.

Studier utført både i Norge og i utlandet viser at det er avvik mellom beregnet og målt energibruk i passiv- og lavenergihus. Bygningene presterer både bedre og dårligere enn forventet med hensyn på energiberegninger gjort under prosjektering. Det er likevel ikke noe som tyder på at avvikene er større for passiv- og lavenergibygninger enn for andre bygninger. En årsak til avvik kan være at

energibruken ofte etterprøves kort tid etter bygget er tatt i bruk og kun over et avgrenset tidsrom. Innreguleringsperioden i bygninger er som regel på ett år, dermed kan en del av avvikene minske betraktelig dersom energibruken følges opp over lengre tid (Klinski et al., 2012a). På grunn av dette er det viktig å følge opp bygningene over lengre tid, slik at energibruken kan undersøkes både under stabiliseringsfasen og etterpå. Byggene i formålsdeltprosjektet har mulighet for å kunne følges opp over flere år.

For å kunne si noe om energibruken til en bygning må energibruken etterprøves. Per dags dato finnes det ikke en felles standard for etterprøving av energibruk i bygninger. Hverken målinger eller sammenligning opp mot energibudsjett utføres likt. Dette fører til at rapportene om energibruken i bygninger ikke er sammenlignbare (Dokka og Grini, 2013). Resultatene fra Enovas formålsdeltprosjekt skal blant annet brukes som bidrag til å utvikle en ny norsk standard som skal ta for seg etterprøving av energibruk i bygninger (Enova, 2015).

## 1.2 SAMMENDRAG AV PROSJEKTOPPGAVEN

Målet for prosjektoppgaven var å avdekke om det er avvik mellom målt og beregnet energibruk ved caseskolene, gjøre seg kjent med litteratur om temaet og å bli kjent med energisimuleringsverktøyene som skulle brukes i masteroppgaven. For å undersøke om det var avvik mellom målt og beregnet energibruk ble energisimuleringsmodeller av skolene laget i SIMIEN og Energi i bygninger (EiB), brukt som sammenligningsgrunnlag for målerdata hentet fra energioppfølgings-systemene til skolene. Måledataene analysert i prosjektoppgaven ble avgrenset til å kun gjelde kalenderåret 2014, og ble månedstemperaturkorrigert i henhold til metoden beskrevet i (Dokka og Grini, 2013). Korrigerte målerdata ble sammenlignet med resultatene fra simuleringene for å avdekke avvik i total energibruk, på energipostnivå og for levert energi til bygningene.

I prosjektoppgaven ble tre hypoteser fremlagt, de var:

1. Total målt energibruk til byggene har ikke store avvik fra beregnet energibruk.
2. Målt levert energi til byggene vil ikke ha store avvik fra beregnet energibruk.
3. På energipostnivå vil det finnes betydelige avvik.

Det ble funnet avvik av ulike størrelser innenfor totalt målt energibruk, levert energi og på energipostnivå ved begge skolene. Avvik på total temperaturkorrigert energibruk var små henholdsvis - 4,5 % og + 7,2 % for Marienlyst skole og Nardo skole. Da energibruken ble undersøkt på energipostnivå kom det frem større avvik. På energipostnivå ble det ved Marienlyst skole funnet avvik på:

- - 68,0 % for varmtvann.
- - 20,9 % for belysning.
- + 707,6 % for ventilasjonsvarme.
- + 14,7 % for romoppvarming.

Ved Nardo skole var avvikene på energipostnivå jevnt over mindre enn ved Marienlyst skole. Det ble funnet avvik på:

- - 18,7 % for belysning.
- + 10,2 % for romoppvarming.

Avvikene mellom beregnet og målt levert energi tilsvarte - 17,3 % for Marienlyst skole og - 4,5 % for Nardo skole.

Hypotese 1 og 3 fra prosjektoppgaven kunne beholdes, mens på grunn av stort avvik mellom målt og beregnet levert energi ved Marienlyst skole måtte hypotese 2 forkastes.

### 1.3 PROBLEMSTILLING

Masteroppgaven tar for seg avviket mellom målt og beregnet energibruk i lavenergiskoler. Målet med masteroppgaven er å avdekke om det er avvik mellom beregnet og målt energibruk i energieffektive skolebygninger, og å undersøke hva årsaken til eventuelle avvik kan være. To skoler fra formålsdeltprosjektet til Enova ble valgt ut som casestudier. Skolebygningene som skal undersøkes er Marienlyst skole i Drammen og Nardo skole i Trondheim. Disse byggene ble valgt fordi de er i samme bygningskategori og har vært i drift en periode og dermed kan forventes å være innregulerte.

For å undersøke hva som kan være årsaken til avvik ble det tatt utgangspunkt i fire spørsmål. Spørsmålene er om avviket mellom målt og beregnet energibruk kan skyldes:

1. Ikke-optimal drift av tekniske anlegg.
2. Utilstrekkelig kunnskap om energieffektivitet hos brukere.
3. Feil antagelser om driftsbehov og brukeratferd i beregninger.
4. Feil antagelser om tekniske anlegg i beregninger.

### 1.4 RAPPORTENS OPPBYGNING

I kapittel 3 presenteres en del relevant informasjon om energikrav til bygninger, beregning av bygningers energiytelse og etterprøving av energibruk i bygninger. Dette baserer seg hovedsakelig på informasjon hentet fra gjeldende teknisk forskrift, Norsk Standard, og rapporter som skal brukes til videreutvikling av relevante standarder.

Kapittel 4 tar for seg funn fra litteraturstudiet. Hovedvekten er lagt på menneskelig påvirkning av energibruk, både med hensyn på brukeratferd og drift av bygninger.

Deretter kommer presentasjon av skolene som ble valgt som case i kapittel 5. Her oppsummeres tidligere forskning ved gjeldende skoler.

I kapittel 6 blir oppbygningen av modellen av Marienlyst skole laget i energisimuleringsverktøyet IDA ICE presentert.

Metode for behandling av data og en parameterstudie blir gjennomgått i kapittel 7.

Relevante data hentet fra energioppfølgingssystemene til skolene blir presentert i kapittel 8. Dataene er korrigert med hensyn på faktorer beregnet i kapittel 7.

Alle resultatene fra simuleringer og fra parameterstudiet er presentert i kapittel 9.

I kapittel 10 blir kapitlene over diskutert med hensyn på å besvare spørsmålene stilt i problemstillingen.

Konklusjonen trukket på bakgrunn av diskusjonen er gitt i kapittel 11.

Tilslutt gis det forslag til videre arbeid knyttet til problemstillingen og tematikken tatt opp i masteroppgaven.

## 1.5 AVGRENSNINGER

Målet for oppgaven ble endret på underveis, da det i oppgaveteksten ble sagt at det skal avdekkes hvilke avvik som finnes mellom målt og beregnet energibruk på energipostnivå ved *to* skoler og hva som kan være årsaken til eventuelle avvik. Det ble i stedet valgt å tolke oppgaven slik at det var avvik mellom målt og beregnet energibruk i energieffektive skolebygg generelt som skulle undersøkes med utgangspunkt i avvik avdekket, og årsaken til disse, ved de to skolene som er nevnt.

Litteraturstudiet er avgrenset til å undersøke menneskelig påvirkning av energibruk i bygninger, og hvordan den menneskelige faktoren tas hensyn til i energisimuleringsmodeller.

På grunn av komplisert målerstruktur og energioppfølgingssystem ved Nardo skole, var det vanskelig å skille mellom energibruk til skolen og barnehagen. Derfor har energibruken ved Nardo skole og barnehage blitt evaluert samlet, og sammenlignet opp mot tidligere studentarbeid.

Gjennomgang av designgrunnlaget var ikke mulig å gjennomføre fordi det som ble gjort tilgjengelig av designgrunnlag og dokumentasjon er «AS-BUILT» for begge skolene. Det gjelder både tegninger fra arkitekt, og energisimuleringer. For å kunne avdekke om det er avvik mellom designgrunnlaget og bygget, hadde det vært nødvendig å gjennomføre tester og målinger av for eksempel tetthet på bygget, eller varmeoverføringskoeffisient.



## 2 SIMULERINGSVERKTØY

---

Dette kapitelet inneholder en kort presentasjon av simuleringsverktøyene som ble brukt i forbindelse med prosjekt- og masteroppgaven. I prosjektoppgaven var det energisimuleringsprogrammene Simulering av Inneklima og Energi (SIMIEN) versjon 5.022 og Energi i Bygninger 3.5 (EiB) som ble benyttet til å kjøre simuleringer av energimodeller laget av skolene da de ble bygget. I masteroppgaven er det hovedsakelig IDA ICE som har blitt benyttet. Versjonen av IDA ICE som er benyttet i denne masteroppgaven er IDA ICE 4.6.2.

### 2.1 ENERGI I BYGNINGER

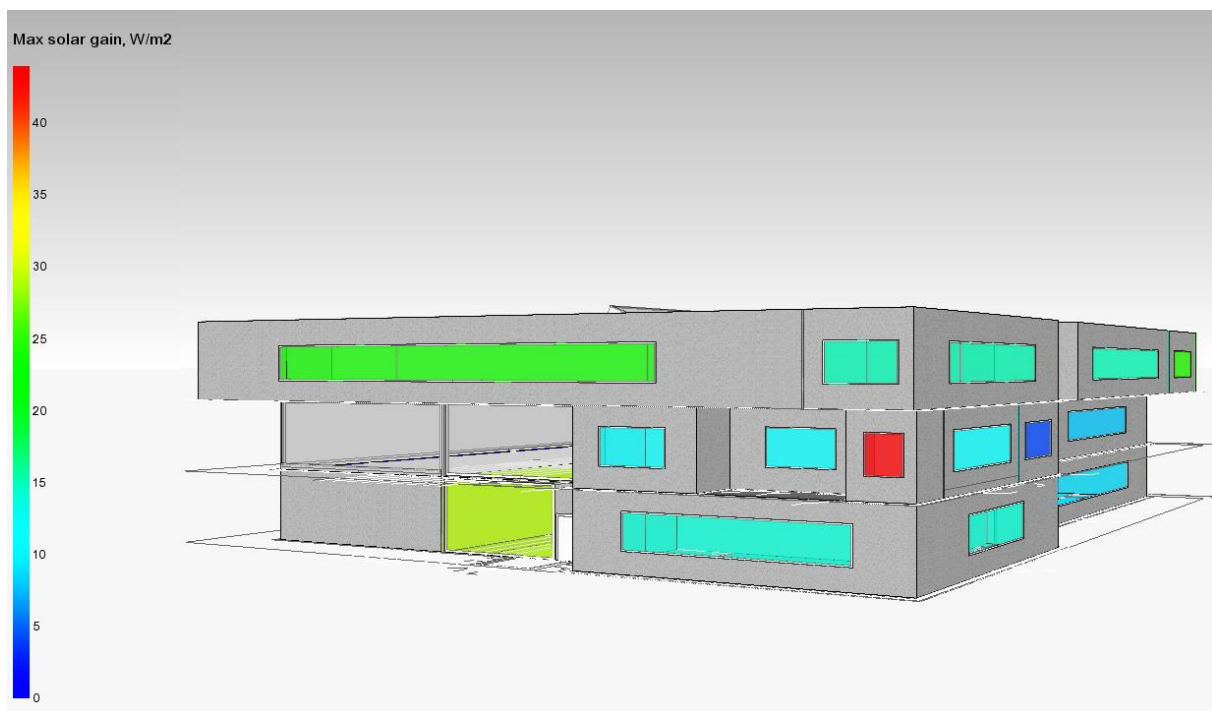
Energi i bygninger er et program for effekt-, energi-, og lønnsomhetsanalyser ved prosjektering, rehabilitering og ombygging av bygninger. Programmet ble utviklet av Programbyggerne, et selskap stiftet i 1993 av Tor Helge Dokka og Kjell A. Dokka. Byggets tilstand med hensyn på energiflyt og inneklima beregnes på timesintervaller i en satt periode, enten sommer-, vinter-, eller årssimulering. Programmet tar hensyn til værforhold som temperatur, vind og soltilskudd. Interne laster som kan påvirke energibruken er inkludert, dette gjelder varmetilskudd fra personer, belysning og teknisk utstyr. Dette i kombinasjon med data om ventilasjonsanlegg, romoppvarming, romkjøling og energiforsyningskilde danner grunnlaget for en simuleringsmodell som gir et helhetlig bilde av energibruken og inneklimaet til bygget (Programbyggerne, 1994). Dette programmet er utdatert, og videreutvikles ikke lenger. Det er ikke det foretrukne simuleringsverktøyet, men ble tatt med i oppgaven fordi det var programmet som ble brukt da Nardo skole ble prosjektert.

### 2.2 SIMIEN

SIMIEN er også utviklet av Programbyggerne, og er en videreutvikling av EiB. Programmet tar hensyn til de samme faktorene som nevnt for EiB når byggets tilstand skal beregnes. SIMIEN er et dynamisk simuleringsprogram som beregner tilstanden til hver sone i bygget med et tidsintervall på 15 min. Programmet baserer seg på beregningsmetoder gitt i NS 3031. SIMIEN brukes for å evaluere bygninger opp mot byggeforskrifter, energimerking, beregning av energibehov, validering av inneklima og dimensjonering av oppvarmingsanlegg, ventilasjonsanlegg og romkjøling (Programbyggerne, 2015).

## 2.3 IDA ICE

IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) er et verktøy for helårs dynamiske multisone-simuleringer som gjør det mulig å studere inn klimaet i individuelle soner, samt analysere energibruken til bygget. Programmet er utviklet av EQUA Simulation AB. I IDA ICE kan bygningstekniske modeller laget i BIM eller AutoCAD importeres. Dette gjør det mulig å lage en detaljert modell av bygget, der man tar hensyn til geometrien av bygget i større grad enn det som er mulig i SIMIEN. IDA ICE fremstiller en grafisk 3D-modell av bygget. 3D-modellen kan brukes til å undersøke det termiske miljøet, eller andre faktorer i 3D, se Figur 2-1 for eksempel. Resultatene fra IDA ICE fremstilles som grafer, som gir et helhetlig bilde av energibruken, ventilasjonen og det termiske miljøet. Energisystemet kan også modelleres i detalj. IDA ICE er et kraftig verktøy som gjør det mulig å analysere inn klimaet og energiflyten i bygget, og gjør det mulig å avdekke kilder til avvik mellom beregnede og målte verdier. (IDA ICE, 2015).



Figur 2-1 Eksempel på hvordan IDA ICE grafisk kan fremstille resultater. IDA ICE

### 3 ENERGIKRAV, BEREGNINGSMETODER OG ETTERPRØVING AV ENERGIBRUK

---

I dette kapitlet blir relevant teori om minstekrav for varmeteknisk standard til bygninger, krav til lavenergi- og passivhus, og beregningsmetoder og metodikk for etterprøving av energibruk presentert. Detaljert beregningsmetode vil ikke bli gjennomgått da dette kan finnes i NS 3031.

#### 3.1 ENERGIKRAV TIL BYGNINGER

For å kunne redusere energibruken i Norge i tråd med klimamålene, er energibruken i bygninger et viktig ledd. Derfor er det satt en rekke krav til byggteknisk standard, og tekniske installasjoner i bygninger. I dette kapitlet presenteres minstekravene til bygninger, samt en kort innføring i konseptene lavenergi- og passivhus.

##### 3.1.1 Minstekrav til bygninger

Byggteknisk forskrift (TEK 10) angir de tekniske minimumskravene for at et byggverk lovlig kan oppføres i Norge (dibk, 2011). Formålet med denne tekniske forskriften er å sikre at tiltak planlegges, prosjekteres og utføres ut fra hensyn til god visuell kvalitet, universell utforming og at tiltaket oppfyller tekniske krav til sikkerhet, miljø, helse og energi (Kommunal- og moderniseringsdepartementet, 2010).

Energikravene i byggteknisk forskrift kan tilfredsstilles på to forskjellige måter: *energitiltaksmodellen* og *energirammemodellen*. Energitiltaksmodellen baserer seg på at hvis spesifiserte energitiltak er gjennomført, er energikravene i teknisk forskrift oppfylt. I denne modellen er varmetapstallet en begrensende egenskap, og energitiltakene kan omfordes innenfor bygningsmessige tiltak. Enkelt forklart betyr det at for eksempel hvis varmeovergangskoeffisientene (U-verdi) på vegger kan forbedres utover minimumskravet, kan kuldebroverdiene være litt dårligere, så lenge det totale varmetapstallet ikke øker. I energitiltaksmodellen er det ikke påkrevd å gjennomføre energiberegninger av bygget. Energirammemodellen på den andre siden baserer seg på beregning av netto energibehov etter NS 3031 med referanseklime for Oslo. Referanseklimate kan finnes i NS 3031. I energirammemodellen oppgis det energirammer for 13 forskjellige bygningskategorier, se Tabell 3-1 (Dokka et al., 2011).

*Tabell 3-1 Liste over de ulike bygningskategoriene (Standard Norge, 2014)*

<b>Bygningskategorier basert på NS 3031</b>	
Småhus	Sykehus
Boligblokk	Sykehjem
Barnehage	Hotellbygning
Kontorbygning	Idrettsbygning
Skolebygning	Forretningsbygning
Universitets- og høyskolebygning	Kulturbygning
Lett industribygning, verksted	

### 3.1.2 Passivhus og lavenergibygninger

Passivhuskonseptet ble først introdusert av *Passivhaus Institut* i Tyskland tidlig på 1990-tallet. På grunn av anerkjennelsen som miljøvennlige bygninger med høy kvalitet, godt inneklima og ekstremt lave energibehov har passivhus fått stor utbredelse i blant annet Tyskland og Østerrike. Passivhaus Institut etablerte på samme tid en definisjon på hva et passivhus er, og hvilke krav som stilles til byggets konstruksjon, energiforsyning og energibruk. Etter hvert ble det et behov for å tilpasse den tyske passivhusdefinisjonen til norske forhold på grunn av forskjeller i klima, konstruksjonsløsninger og byggeskikk. Derfor ble en norsk standard utviklet for passivhus og lavenergibygninger (Standard Norge, 2012). Det er viktig å påpeke at passivhus ikke er en egen energistandard, men et konsept som skal sikre komfortabelt inneklima uten, eller med sterkt redusert, behov til oppvarming og kjøling i forhold til dagens bygningsstandard.

Den norske passivhusstandarden er definert ut i fra to standarder: «*NS 3700 Kriterier for lavenergi og passivhus – boligbygninger*» (Standard Norge, 2013) og «*NS 3701 Kriterier for lavenergi og passivhus – Yrkesbygg*» (Standard Norge, 2012). Standardene angir blant annet krav til varmetapstall, oppvarmings- og kjølebehov, energibehov til belysning og energiforsyning, samt minstekrav til bygningsdeler, komponenter, systemer og lekkasjetall og prosedyre for rapportering, dokumentasjon og attestering av bygget. Årsaken til at det er laget to forskjellige versjoner av standarden for lavenergi- og passivhus er fordi bruksmønsteret av yrkesbygg avviker stort fra bruksmønsteret av boliger, i tillegg til størrelse på prosjekt- og investeringsmuligheter. Standardene er basert på beregninger i henhold til «*NS 3031 Beregning av bygningers energiytelse – Metode og data*» (Standard Norge, 2012).

NS 3701 stiller ikke bare krav til U-verdier, men også til spesifikk energibruk. Kravene til energibruken varierer ut fra bygningskategori, størrelse på bygget og klima på stedet. Beregningsmetode for kravene til lavenergi- og passivhus for skolebygninger finnes i NS 3701, de blir ikke gjennomgått i denne oppgaven.

## 3.2 BEREGNING AV BYGNINGERS ENERGIYTELSE, METODE OG DATA

Bygninger brukes for å beskytte mennesker, dyr og utstyr fra det ytre klimaet. For å skape et behagelig inneklima må det tilføres energi i ulike former til blant annet oppvarming, belysning og ventilasjon. Energiytelsen til et bygg forteller noe om hvor energieffektivt bygget klarer å tilfredsstille kravene til et behagelig inneklima. Dette kapitlet går gjennom noen av de viktigste punktene i NS 3031 som er gjeldende standard for beregning av bygningers energiytelse.

### 3.2.1 NS 3031

For å beregne energiytelsen til en bygning benyttes Norsk Standard «*NS 3031 Beregning av bygningers energiytelse – Metode og data*». Standarden legger til rette for å danne et felles grunnlag for beregning og dokumentering av energiytelsen til en bygning. I NS 3031 finnes det i tillegg til beregningsmetodikk også normerte- og veiledende parametere og inndata for å kunne beregne blant annet varmetapstall, totalt netto energibehov, levert energi og primærenergibehov.

NS 3031 skiller på beregning av totalt netto energibehov og behov for levert energi. NS 3031 definerer disse begrepene som:

*«Totalt netto energibehov: bygningens energibehov uten hensyn til energisystemets virkningsgrad eller tap i energikjeden».* (Standard Norge, 2014)

Og

*«Levert energi: summen av energi, uttrykt per energivare, levert over bygningens systemgrenser for å dekke bygningens samlede energibehov inkludert systemtap som ikke gjenvinnes».* (Standard Norge, 2014)

Beregning av energibudsjettet for totalt netto energibehov og levert energi er angitt i NS 3031. I Tabell 3-2 vises en oppdeling av levert energi i de energivarene som benyttes. Noen ganger kan det være hensiktsmessig å dele opp elektrisitetsforbruket i flere undernivåer. Nedenfor er det gitt eksempel på en slik videre inndeling av energivarene.

*Tabell 3-2 Oppdeling av levert energi i energivarer basert på Tabell 7 i NS 3031 (Standard Norge, (2014) og Dokka et al., (2011)).*

<b>Energivarer</b>		<b>Energivare (undernivå)</b>	
1	Elektrisitet	a	Direkte
		b	Varmepumpe
		c	Solenergisystem
		d	Kjølemaskin
2	Olje/parafin		
3	Gass		
4	Fjernvarme		
5	Biobrensel		
6	Annen energivare		

Totalt netto energibehov fordeles som regel på seks ulike energiposter, som kan deles i flere undernivåer. Tabell 3-3 viser et eksempel på hvordan et energibudsjett kan se ut, og hvilke energiposter som kan tas med. Energipostene som er delt i *a* og *b* slås sammen som én energipost, men dersom målet er oppfølging av energibruken kan det likevel være en fordel at disse er adskilt. Dersom utendørs energibehov til for eksempel snøsmelting og belysning utgjør en stor del av energibudsjettet kan det føres opp som en egen energipost. Utendørs energibehov skal ikke inkluderes i energiregnskapet for totalt netto energibehov.

Tabell 3-3 Netto energi budsjett basert på Tabell 5 i NS 3031 (Standard Norge, 2014).

Energipost			Energibehov [kWh/år]	Spesifikt energibehov [kWh/m <sup>2</sup> år]
Nr	Navn	Symbol		
1a	Romoppvarming	$Q_{H,nd}$		
1b	Ventilasjonsvarme			
2	Varmtvann	$Q_{W,nd}$		
3a	Vifter	$E_{fan}$		
3b	Pumper	$E_p$		
4	Belysning	$E_l$		
5	Teknisk utstyr	$E_{eq}$		
6a	Romkjøling	$Q_{C,nd}$		
6b	Ventilasjonskjøling			
<b>Total netto energibehov, sum 1-6</b>				
<b>Utendørs energibehov</b>				

### 3.2.2 Beregningsmetoder for energibruk i bygninger

NS 3031 omfatter tre forskjellige beregningsmetoder:

- Månedsberegning (stasjonær metode) – NS-EN ISO 13790
- Forenklet timeberegning (dynamisk metode) – NS-EN ISO 13790
- Detaljerte validerte beregningsprogrammer (dynamisk metode)<sup>1</sup> – NS-EN 15265

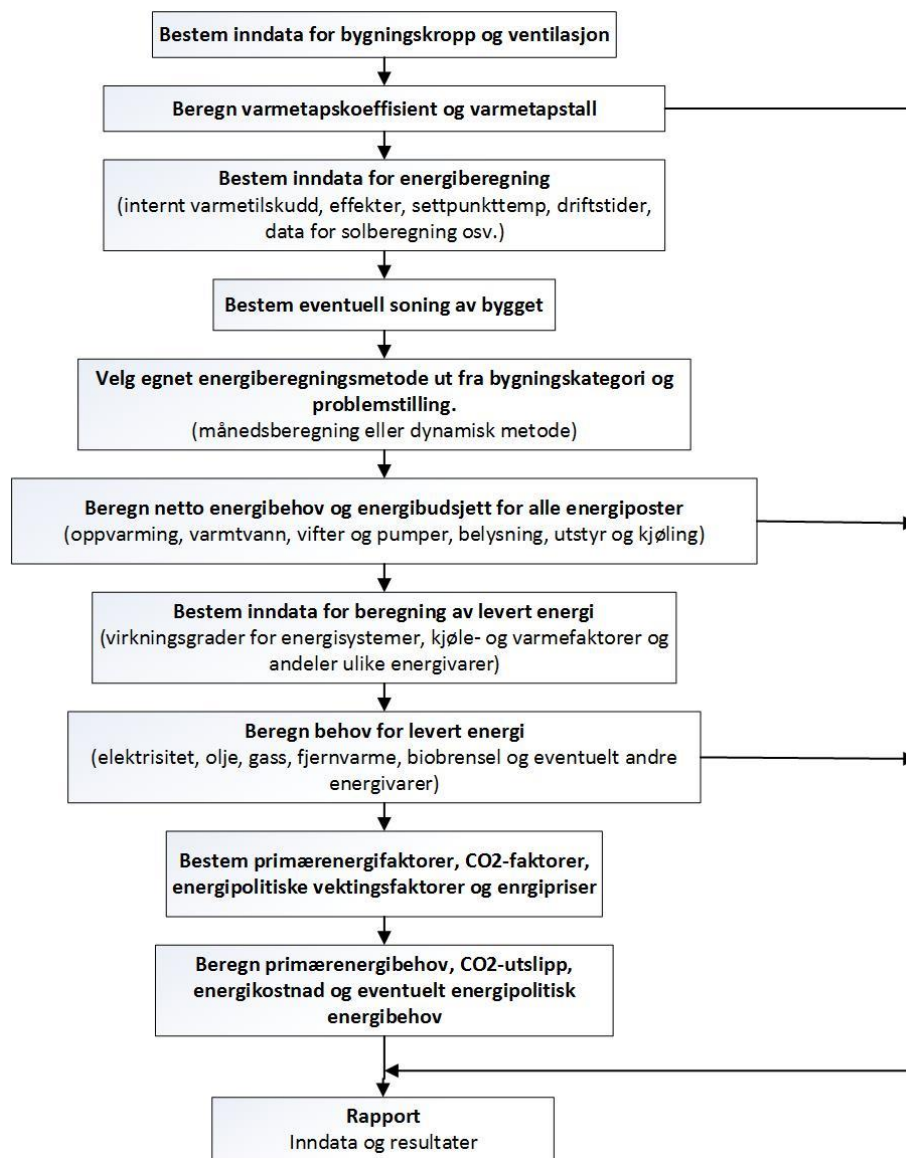
Beregningsmetode bestemmes ut fra kriterier som behov for nøyaktighet, hensiktsmessig detaljeringsgrad, tilgang på inndata, og reproduserbarhet i beregningen. Andre faktorer som påvirker valg av beregningsmetode er (Standard Norge, 2014):

- Kompleksiteten til bygningen og de tekniske installasjonene.
- Formålet med energiberegningen.
- Om det er et eksisterende bygg eller et bygg under prosjektering eller oppføring.

For bygningskategorien *Skolebygning* kan det velges mellom månedsberegning eller dynamisk metode for å beregne energiytelsen. Er det installert ventilasjonskjøling skal det derimot alltid benyttes dynamisk beregningsmetode (Standard Norge, 2014).

I Figur 3-1 er beregningsprosedyren i henhold til NS 3031 fremstilt i et flytdiagram. Denne gir et oversiktlig bilde av fremgangsmåten når det skal gjennomføres energiberegninger eller simuleringer. Gjennomgang av formler for beregning blir ikke gjennomgått her, de kan finnes i NS 3031.

<sup>1</sup> SIMIEN og IDA ICE regnes som validerte beregningsprogrammer for energiytelse i bygninger. (Haase, 2014)



Figur 3-1 Flytskjema av beregningsprosedyre basert på Figur 1 i NS 3031 (Standard Norge, 2014)

### 3.2.3 Værkorrigering i beregninger

De dynamiske simuleringsprogrammene IDA ICE og SIMIEN tar hensyn til blant annet utetemperatur, sol og vindforhold. Det er begrenset med klimadata tilgjengelig for spesifikke lokasjoner i Norge, derfor vil det i noen tilfeller måtte gjøres en tilnærming og velges en klimasone som ligner på klimaet bygningen befinner seg i. Det er mulig å lage egne klimafilere, det er omfattende arbeid som forutsetter at det er en værstasjon i nærheten som måler alle nødvendige inndata.

NS 3031 oppgir normert klimadata for Oslo som kan benyttes dersom det skal gjennomføres beregninger. Oslo-området er standard referanseklima for Norge og denne klimasonen skal brukes når det er behov for å dokumentere og sammenligne en bygnings energiytelse opp mot offentlige

krav (Standard Norge, 2014). Oslo klimaet benyttes som referanse klima i TEK 10. Dette gjøres for å kunne sammenligne den varmetekniske standarden til bygninger uavhengig av hvor i landet de befinner seg. Når energibruken for lavenergi- og passivhus skal værkorrigeres velges spesifikke data for lokalt klima på stedet, eventuelt en tilnærming som nevnt ovenfor.

#### 3.2.4 Virkningsgradskorrigerings for varmesystemer

Virkningsgraden til varmesystemet i en bygning viser hvor stor del av energien som er levert til bygningen brukes på stedet. Årlig systemvirkningsgrad, eller årsvarmefaktor, består av tre ledd; produksjonsvirkningsgrad, distribusjonsvirkningsgrad og romvirkningsgrad. For å beregne systemvirkningsgraden multipliseres virkningsgradene for produksjon, distribusjon og rom sammen (Standard Norge, 2014):

$$\eta_{system} = \eta_{produksjon} \cdot \eta_{distribusjon} \cdot \eta_{rom} \quad (1)$$

Produksjonsvirkningsgraden angir forholdet mellom energien levert til produksjonsenheter i bygningen, og den energien som leveres videre til distribusjonssystemet i bygget. Eksempler på produksjonsenheter er abonnentsentralen for fjernvarme, eller en biokjel. Distribusjonsvirkningsgraden angir forholdet mellom energien mottatt i distribusjonssystemet, og energien avgitt i varmeavgivende system som radiatorer eller gulvvarme. Romvirkningsgraden gir informasjon om de termiske effektene i rommet, altså tap fra det varmeavgivende systemet. Tapene for romvirkningsgraden er tredelt; skjev temperaturfordeling, tap gjennom bygningskroppen på grunn av plassering, og unøyaktighet og termisk respons fra det regulerede systemet (Standard Norge, 2014).

Det er ventilasjonsvarme og romoppvarming som virkningsgradkorrigeres etter metoden beskrevet ovenfor. Varmtvann korrigeres ikke for distribusjonstap. (Dokka og Grini, 2013).

### 3.3 ETTERPRØVING AV ENERGIBRUK I BYGNINGER

For å kunne sammenligne energibruken i forskjellige bygninger, er det nødvendig med sammenlignbare data. Flere faktorer må tas hensyn til når det skal sammenlignes data fra flere forskjellige bygninger. Disse punktene vil gjennomgås i dette kapitlet. Rapporten «Etterprøving av bygningers energibruk» er utarbeidet av Entro og SINTEF Byggforsk og er forfattet av Tor Helge Dokka og Cathrine Grini. Standard Norge jobber med å utarbeide en ny norsk standard for etterprøving av energibruk, og denne rapporten presenterer en foreløpig metodikk for hvordan det skal gjøres. Det er informasjon fra denne rapporten kapittel 3.3 er basert på (Dokka og Grini, 2013).

#### 3.3.1 Metodikk

I Dokka og Grini (2013) er det lagt opp til at etterprøving av energibruk i bygninger skal følge samme oppbygging som beregning av energibruken, slik at det blir enklest mulig å sammenligne dataene. Derfor bør presentasjon av resultatene for måledata følge samme oppdeling i energiposter som presentert i Tabell 3-2 og i Tabell 3-3.



Selv om det er teknisk mulig å måle formålsdelt energibruk, er det knyttet noen utfordringer til dette. En av de største utfordringene er om de elektriske og termiske kursene er logisk fordelt slik at energibruken til forskjellige energiposter enkelt kan skilles fra hverandre. Et eksempel på et vanlig problem kan være at et ventilasjonsaggregat kun har én elektrisk kurs. Da kan ikke elektrisk energi som har gått til vifter og til for eksempel et elektrisk varmebatteri skilles fra hverandre. For å få til gode målinger er det derfor viktig at målersystemet blir tatt med i betraktning allerede når termiske og elektriske kurser prosjekteres.

En annen utfordring knyttet til sammenligning av målt og beregnet energibruk er at det beregnes varme avgitt i rommet, mens energibruken ut fra varmesentralen er det som måles. Dermed kan det bli et avvik mellom målt og beregnet energibruk, fordi det ikke er blitt tatt hensyn til produksjons-, distribusjons- og romvirkningsgrad. Den enkleste måten å ta hensyn til dette er å bruke veiledende virkningsgrader fra NS 3031, tillegg B. Eventuelt kan tap beregnes ut i fra gjeldende standarder.

Ifølge Dokka og Grini (2013) er det to metoder for å sammenligne målt og beregnet energibruk etter at distribusjons- og avgivelsestapene er funnet. Metode 1 er å regne om netto beregnet energibehov til levert energi fra energisentralen per energipost, ved å dele på nevnte virkningsgrader. Resultatene av dette kan da sammenlignes direkte med målt varmemengde fra energisentralen. Metode 2 er å regne om målt energi fra sentralen ved å multiplisere med virkningsgradene. Da regnes «målt» netto energibruk, som kan sammenlignes med beregnet energibehov for hver energipost. Kort oppsummert kan det forklares som at enten korrigeres beregnede verdier eller målte verdier.

Foreløpig er det anbefalt å benytte seg av metode 2 for sammenligning av målt og beregnet energibruk. Dette er fordi metode 1 er i konflikt med NS 3031, og det ønskes å være konsekvent med hensyn på NS 3031. Ved utarbeidelse av ny norsk standard for etterprøving av energibruk, vil det argumenteres for en oppdatering av NS 3031 med hensyn på dette. (Dokka og Grini, 2013)

### 3.3.2 Korrigerings av væravhengig energibruk

En del av energibruken i et bygg vil være avhengig av klimaet og været. Været varierer fra år til år, for å kunne sammenligne måledata fra forskjellige år trenges derfor en metode for å korrigere væravhengig forbruk. Energiforbruk som påvirkes av klimaet og været er blant annet:

- Oppvarming
- Kjøling
- Belysning
- Varmtvann

Varmtvann påvirkes hovedsakelig av at temperaturen på vannet som tas inn i bygget kan variere. Denne temperaturvariasjonen er vanligvis såpass liten at det vil utgjøre liten forskjell på energibruken fra år til år.

For belysning er det stabilt sesongvariert hvor mye tilgang det er på dagslys, og dermed hvor mye energi som trengs til kunstig belysning. Det er vanlig å se bort fra denne effekten, og derfor korrigeres ikke energibehov til belysning.

Behovet for kjøling i bygninger er sterkt avhengig av:

- Utetemperatur
- Relativ fuktighet
- Solinnstråling.

Det finnes ikke en forenklet metode for å beregne energibruken til kjøling. Ifølge Dokka og Grini (2013) anbefales det derfor ikke å værkorrigere energibruken med mindre det kan foretas en full værkorrigering der det tas hensyn til alle parameterne nevnt over.

Oppvarming vil som kjøling være avhengig av utetemperatur, relativ fuktighet og solinnstråling i tillegg til vindforhold. Vanligvis korrigeres oppvarmingsbehovet kun for temperatur da det anses som den variabelen med størst innvirkning på energibruken. Det hadde vært ideelt å korrigere hele den termiske energileveransen med hensyn på været, men som nevnt for kjøling finnes det ikke forenklete beregningsmetoder som er dekkende.

Korrigerings av vær- og klimaavhengig forbruk kan enten gjøres med formål om å sammenligne energibruken ved bygget fra år til år, da skal klimadata fra den geografiske lokasjonen til bygget brukes. Er formålet å sammenligne to bygninger i forskjellige klima, må det foretas en klimakorrigerings. Da benyttes for eksempel referanseklime Oslo. Det finnes i hovedsak tre metoder for værkorrigering:

1. Årlig graddagskorrigering
2. Månedstemperaturkorrigering
3. Full værkorrigering, avansert metode

### ***Årlig graddagskorrigering***

Årlig graddagskorrigering er en enkel beregningsmetode som baserer seg på bruk av graddager. Graddager beregnes ved å summere temperaturen mellom en gitt basetemperatur og utetemperaturen over en tidsperiode. Basetemperaturen er den temperaturen der bygget ikke har behov for tilført energi fra oppvarmingssystemet, men interne laster og soltilskudd klarer å dekke oppvarmingsbehovet. Basetemperaturen settes vanligvis til 17 °C. Graddagskorrigering gjøres på årsbasis. Fordi denne beregningsmetoden er forenklet fører det til at det er et unøyaktig verktøy, og kan kun brukes til å gi en pekepinn på faktisk energibruk. Denne metoden er mest utbredt i dag.

### **Månedstemperaturkorrigering**

Denne metoden er mer detaljert da energibruken til oppvarmingsformål temperaturkorrigeres på månedsbasis. En egen korreksjonsfaktor beregnes for hver måned. Den baserer seg på det proporsjonale forholdet mellom energibruken til oppvarming og differansen mellom basetemperaturen og utetemperaturen. Nedenfor er formelen for beregning av månedstemperaturkorrigeringsfaktoren oppgitt, formel (2).

Basetemperaturen for et bygg vil variere ut i fra hvilken teknisk standard bygget har. Nyere bygg og bygg med høye energiambisjoner vil naturligvis ha lavere basetemperatur enn eldre bygg.

$T_{e, reell}$  kan enten tas fra lokalt målt temperatur, eller kan hentes fra nærmeste værstasjon.  $T_{e, norm}$  kan enten være månedsmiddeltemperaturen brukt i beregningen ved etterprøving av prosjektert energibruk, eller det kan være månedsmiddeltemperaturen for en normalperiode, vanligvis 30 år.

Siden denne faktoren kun gjelder for energibruk til oppvarming settes faktoren til 1 i de månedene der det ikke er behov for oppvarming. Skal målt forbruk korrigeres skal forbruket divideres på faktoren  $f_T(i)$ . Skal beregnet eller simulert forbruk korrigeres multipliseres resultatene med faktoren  $f_T(i)$ .

$$f_T(i) = \begin{cases} \frac{T_{base} - T_{e, reell}(i)}{T_{base} - T_{e, norm}(i)} \\ 1, \text{ hvis } T_{base} - T_{e, reell}(i) < 1 \text{ eller } T_{base} - T_{e, norm}(i) < 1 \end{cases} \quad (2)$$

$f_T(i)$       Temperaturkorrigeringsfaktor for måned  $i$  (1 = januar, ... , 12 = desember).

$T_{base}$       Basetemperaturen for bygget [°C].

$T_{e, reell}(i)$       Målt utetemperatur i måned  $i$  [°C].

$T_{e, norm}(i)$       Normalisert utetemperatur i måned  $i$  [°C].

### **Full værkorrigerings**

Full værkorrigerings er den mest avanserte metoden for værkorrigerings. I denne metoden etableres det en beregningsmodell som tar hensyn til reelle driftsparametere og observert vær. Det tas i denne metoden hensyn til solinnstråling og vind i tillegg til utetemperaturen, noen ganger er relativ fuktighet også inkludert i modellen. Siden disse parameterne er inkludert vil energibruken til både oppvarming og kjøling kunne værkorrigeres. Denne metoden er lite brukt per i dag, fordi den er svært omfattende. Metoden brukes for noen forsøksbygg og pilotbygg der det er lagt inn mye ressurser på prosjektering og etterprøving av energibruken i bygningen.

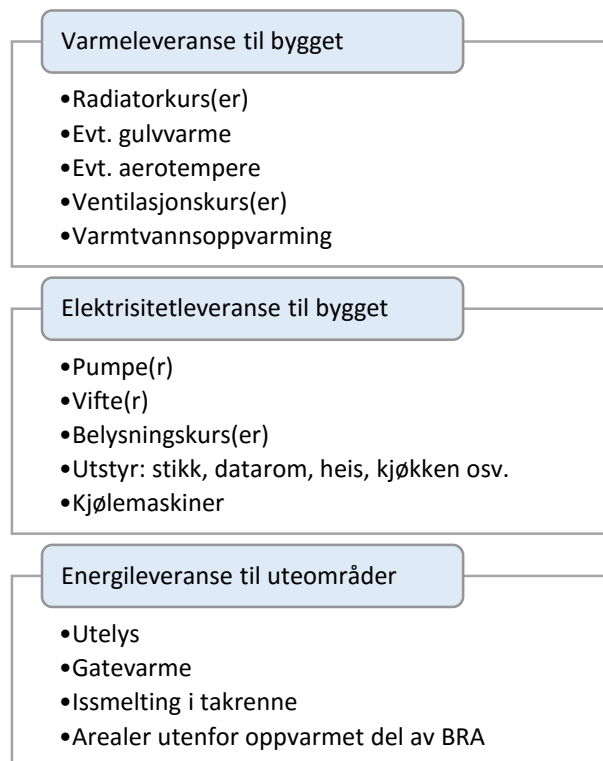
#### **3.3.3 Målerstruktur og målertype**

Når målersystemet til bygningen skal planlegges er det viktig å starte med å kartlegge behovet for instrumentering. Viktige faktorer å ta hensyn til er at informasjonsmengden må være passe stor i forhold til ønsket nøyaktighetsnivå, og at drift og vedlikehold av instrumentene er håndterbart. En

god målerstruktur kan i de fleste bygg oppnås med rundt 10-30 målere, men det forutsetter at målerstruktur må tas hensyn til i prosjekteringen av elektriske og termiske kurser.

Det bør velges målere som kan kommunisere digitalt med et datasystem som samler og lagrer data på en hensiktsmessig måte. Målere bør kunne lagre måledata i måleren ved et eventuelt strømbrudd eller kommunikasjonsbrudd. Vedlikehold og drift av måleinstrumentene bør gjøres like regelmessig som vedlikehold av andre tekniske installasjoner. Dette krever spesiell kompetanse av driftsoperatør.

Oppdelingen av energipostene fra NS 3031 bør tas hensyn til når målerstrukturen settes opp. Det vil være flere utfordringer knyttet til dette i eldre bygg enn i nyere bygg. Det må blant annet tas hensyn til hvordan de elektriske og termiske kursene er oppdelt og om det er mulighet for å montere målere på disse. Om det er økonomisk forsvarlig å installere det nødvendige antall målere for å få nødvendig detaljering av målingene må også vurderes. Figur 3-2 viser anbefalt målerstruktur for yrkesbygg basert på Dokka og Grini (2013). De blå rutene viser hovedmålere, mens punktene listet under er eventuelle undermålere. Hovedmålerene for energileveranse monteres av netteieren og av varmeleverandøren. For bygninger der det er behov for eller ønske for detaljert oppfølging av energibruken, bør det være en måler på hver elektriske og termiske kurs. Kurs med samme funksjon kan slås sammen, for eksempel dersom det er flere radiatorkurser i bygget.



Figur 3-2 Anbefalt målerstruktur for yrkesbygg, basert på Dokka og Grini (2013).

## 4 AVVIK MELLOM ENERGIBEREGNINGER OG MÅLT ENERGIBRUK

---

Det er valgt å fokusere på to temaer i litteraturstudiet; hvordan drift og brukeratferd påvirker energibruken i bygninger. Dette er to faktorer det er vanskelig å ta høyde for i simuleringer av energibruken, og er dermed ofte en kilde til avvik. Nyere studier viser at menneskelige handlinger er en viktig påvirkningsfaktor med hensyn på energibruk. Mangel på forståelse av hvordan energibruken påvirkes av drift og brukeratferd kan i verste fall føre til at energisparepotensialet grunnet forbedret varmeteknisk standard og bedre tekniske løsninger ikke blir utnyttet. Derfor har ulike involverte som jobber med fagfeltet det være som designere, driftspersonale, forskere eller politikere innsett at det må rettes mer fokus mot driftsfasen av bygningers levetid og hvordan mennesker påvirker denne (Azar og Menassa, 2014).

Lavenergi- og passivhuskonseptet har eksistert siden tidlig nittitallet, men er i byggebransjens perspektiv fremdeles et forholdsvis ferskt konsept, spesielt her i Norge. Derfor finnes det få norske yrkesbygg som oppfyller de strenge kravene til passivhusstandarden. Det er enda færre lavenergi- og passivhus-skoler som det er skrevet rapporter om. Litteratursøket er derfor blitt utvidet til å inkludere både norske og internasjonale rapporter om skoler og kontorbygninger, andre næringsbygg og boliger. Ikke alle funn vil være direkte relevante i forhold til skolebygninger, men noen av faktorene som er funnet å påvirke energibruken i andre typer bygninger vil også gjelde for skoler. Det gjøres oppmerksom på at resultater fra forskningsrapporter gjort utenfor Norge ikke nødvendigvis baserer seg på bygninger lokalisert i sammenlignbare klima.

### 4.1 DRIFT AV BYGNINGER I ENERGIBRUKSPERSPEKTIV

I kapittel 4.1 blir drift av bygninger og verktøy benyttet til energieffektivisering av drift gjennomgått. Først skal noen sentrale begrep innen drift av bygninger forklares og settes i perspektiv før det drøftes hvordan drift av bygninger kan påvirke energibruken.

Facilities Management (FM) eller fasilitetsstyring på norsk defineres i NS-EN 15221 som «*Integrasjon av prosesser i en organisasjon for å opprettholde og utvikle avtalte tjenester som støtter og forbedrer effektiviteten til organisasjonens primære aktiviteter*» (Standard Norge, 2006). FM setter altså brukerne i fokus ved å legge arbeidsplassen til rette slik at kjernevirksomheten kan utføres på en optimal måte. FM ved en skole ville med andre ord ha fokus på å tilrettelegge for et godt fysisk læringsmiljø. FM kan deles inn i flere hovedområder, der man i Norden stort sett bruker disse; økonomi og finansiering, forvaltning, drift, vedlikehold og utvikling (FDVU), service og tjenester, og helse-, miljø og sikkerhet (HMS) (Mørk et al., 2008).

Oppgavene som faller inn under tradisjonell FDVU er beskrevet som følgende i boken «Enøk i bygninger – Effektiv energibruk»: *Forvaltning* brukes om alle oppgaver knyttet til administrasjon og ledelse av en eiendom. Rutinemessige oppgaver som sørger for at bygget og byggets tekniske installasjoner fungerer funksjonelt, teknisk og økonomisk faller inn under begrepet *drift*.

*Vedlikehold* gjøres for å sikre at bygningens kvalitet, og kvaliteten til de tekniske installasjonene opprettholdes. Det skal sørge for at bygget som helhet fungerer etter hensikten innenfor en gitt brukstid. Vedlikehold omfatter også utskiftning av bygningsdeler og komponenter som har kortere levetid enn bygningen generelt, for eksempel utskiftning av vinduer og belysning. *Utvikling* brukes om de oppgavene som bidrar til å øke en bygnings verdi over tid. For eksempel oppgradering i henhold til nye krav fra brukere, marked og myndigheter (Novakovic et al., 2007).

#### 4.1.1 Generelt om drift av bygninger med hensyn på energibruk

Det har de siste tiårene blitt forsket på å finne tiltak som reduserer energibruken i bygningsmassen både her i Norge og internasjonalt. Til nå har hovedvekten av forskningen på feltet dreid seg om å forbedre den varmetekniske standarden til bygninger, og dermed redusere energibehovet, altså passive tiltak. De siste årene har det blitt mer fokus på at bygningene også trenger å driftes riktig for å kunne utnytte energisparepotensialet fra de passive tiltakene. Livsløpskostnadsanalyser (LCC), brukes som sammenligningsgrunnlag for å vurdere lønnsomheten til investeringer i energivennlige løsninger for nye bygg, eller enøk-tiltak i eksisterende bygg (Novakovic et al., 2007). Kostnadene for forvaltning, drift og vedlikehold (FDV) utgjør en betydelig andel av livsløpskostnadene til en bygning, mellom 25 % - 50 % for henholdsvis boliger og sykehus. For skoler ligger FDV kostnadene rundt 40 % av de totale livsløpskostnadene. Disse verdiene er beregnet med 7 % kalkylerente og levetid på 60 år (Bjørberg et al., 2007). I livsløpet til et yrkesbygg fra «krybbe til grav», står driftsfasen for 90 % av den totale energibruken til bygget. Gode driftsstrategier er derfor ikke bare helt nødvendig for å sikre byggets økonomiske levetid, men også for å sikre effektiv energianvendelse (Bye, 2008). Økonomisk levetid er den forventede levetiden det er lønnsomt å bruke et varig driftsmiddel før det trengs å skiftes ut. Teknisk levetid og økonomisk levetid kan avvike (SNL, 2015).

Ikke optimal- eller feilstyring og drift av bygninger og dets tekniske anlegg er en av hovedårsakene til at bygninger ikke klarer å prestere like godt energimessig som energiberegningene tilsier at de skal. I rapporten «LECO – Energibruk i fem kontorbygg i Norge», av Grini et.al (2009), undersøkes energibruken ved fem nyere kontorbygg rundt om i Norge. Funnene i rapporten viser at det spesielt er energipostene vifter og pumper, teknisk utstyr og kjøling som overskrider standardverdiene som er benyttet ved fastsettelse av energikrav i henhold til teknisk forskrift. Årsaken til avvikene ble blant annet konkludert med at stammer fra ulønnsom og feil styring av anleggene (Grini et al., 2009). I et case-studie av 64 næringsbygg ble det funnet at styringen og driften i omtrent 50 % av byggene ikke var optimal, og at dette førte til økt energibruk (Claridge et al., 1994). Også i masteroppgaven til Frode Paulsen identifiseres drift som en av de viktigste faktorene som påvirker energibruken (Paulsen, 2015).

I Grini et al. (2009) nevnes det flere kriterier som burde oppfylles for å sikre reell energieffektiv drift av kontorbygg. God varmeteknisk standard, fokus på korrekt dimensjonering av ventilasjonsluftmengder og energioppfølging trekkes frem som de viktigste punktene. Energibruken må kunne deles i energiposter, slik at det er mulig å spore hvor energien faktisk blir brukt. I kontorbygg er det gjerne mye teknisk utstyr og store serverrom, disse burde ha en egen

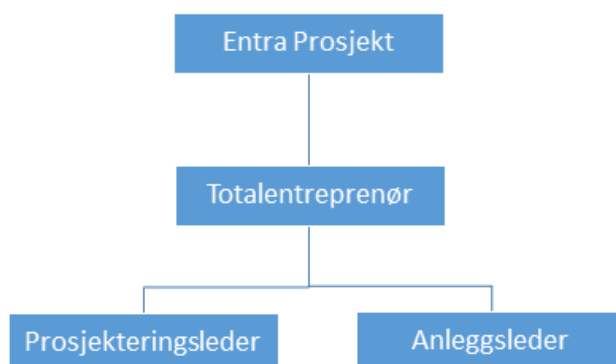
energimåler. På skoler er det sjeldent store serverrom, men moderne skoler har gjerne mye teknisk utstyr. Elever har gjerne tilgang til pc'er, smartboard og prosjektorer i hvert klasserom. En pc trekker omkring 100 W og videoprojektorer omkring 300 W (Thewes et al., 2013). Moderne laptopper trekker typisk mindre, det er ikke uvanlig at det trekkes rundt 65 W per laptop. Også i Claridge et al. (1994) trekkes energioppfølging frem som et avgjørende kriterium for å sikre energieffektiv drift av bygg. Energioppfølgingssystem (EOS) kan brukes både som et diagnostisk verktøy, for å finne problemer, og for å følge opp om tiltak faktisk har hjulpet. Driftspersonellet bør ha god kjennskap til bygget. Dersom bygget styres via sentraldriftskontroll (SD-anlegg) er det viktig at SD-operatørene har god kommunikasjon med driftsoperatør på bygget, eventuelt at arbeidsoppgavene samles i en og samme stilling (Claridge et al., 1994). En rapport om FM i energieffektive skolebygninger konkluderer med at brukeratferd, og endringer i brukeratferd, stadig påvirker hvordan bygget optimalt bør styres. Å drifte et bygg optimalt krever at målerstruktur og EOS er av høy teknisk standard, og at personellet som har ansvar for FDV er kvalifiserte til å kunne analysere og utnytte informasjonen de får fra EOS (Junghans, 2015). For bygninger med EOS trekkes både teknisk og analytisk kompetanse frem som avgjørende for at forvalter og driftsoperatør skal kunne planlegge og lede driften ut fra behovene, og avdekke og korrigere avvik (Paulsen, 2015).

Det er en utfordring å få driftspersonellet godt nok kjent med de tekniske installasjonene i bygget og hvordan valg av innstillinger påvirker energibruken. Problemet oppstår ofte fordi mye av kunnskapen om anleggene i bygget kun sitter hos de som har prosjektert og bygget anleggene. Kompetanseoverføringen fra prosjektfasen til driftsfasen av bygget ivaretas ikke godt nok, slik at viktig kunnskap om anleggene ikke blir videreformidlet. En mulig løsning er å innføre en prøvedriftsperiode som kjøres parallelt med innregulering av de tekniske installasjonene. Prøveperioden skal inkludere både utførende fra prosjektfasen samt driftsforvaltningen. Dette skal sikre at innreguleringen skjer i samsvar med inne- og uteklimaforholdene (Paulsen, 2015).

Fredrik Helmen, prosjektsjef for Entra, holdt et innlegg under Enovakonferansen 2016 der han tok opp flere av de samme punktene som også Paulsen tok opp i sin masteroppgave. Innlegget hadde tittelen «Samspill gir energieffektive bygg» og handlet om utviklingen av prosjektorganisasjonen under utbyggingen og idriftsettingen av Papirbredden 1, 2 og 3. som er Høgskolen i Buskerud sine nye lokaler i Drammen. Papirbreddenbyggene er en del av Enovas formålsdeltprosjekt (Helmen, 2016).

Helmen viste hvordan de fra prosjektstart i 2005 frem til den siste av de tre byggene sto ferdig i 2015, utviklet prosjektorganisasjonen. I starten var det Entra Prosjekt som satt som byggherre, med totalentreprenør under seg, som igjen hadde prosjekteringsleder og anleggsleder under seg. Se Figur 4-1 for et forenklet prosjektorganisasjonskart for Papirbredden 1. Entra drift var ikke en naturlig del av prosjektorganisasjonen. Papirbredden 1 fungerte ikke optimalt i det første driftsåret fordi driftsorganisasjonen ikke hadde blitt inkludert i byggefasen. Entra Drift hadde lite kjennskap til de tekniske anleggene da de tok over ansvaret for driften. Det var heller ikke satt opp optimale rutiner for rapportering og oppfølging av feil, mangler og reklamasjoner av tekniske anlegg. Entra

hadde på denne tiden mindre fokus på opplæring og støttefunksjoner for driftsorganisasjonen. Likevel klarte drift å få ned energibruken i første fulle driftsår 2008 fra 222 kWh/m<sup>2</sup> til 195 kWh/m<sup>2</sup> i 2009.



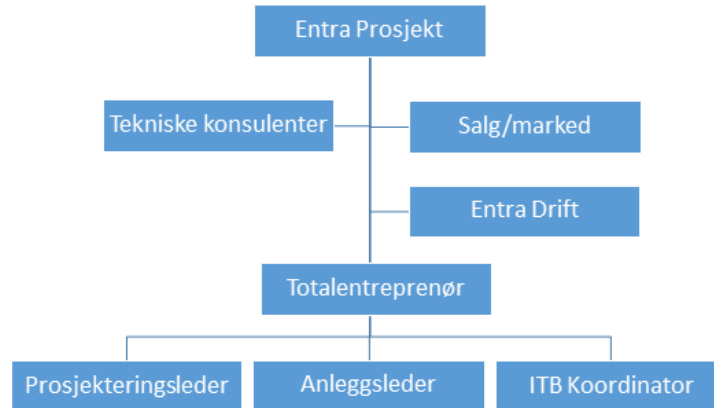
*Figur 4-1 Prosjektorganisering for Papirbredden 1, basert på Helmen, (2016).*

Ved oppstart av prosjektet Papirbredden 2 hadde Papirbredden 1 vært i drift i et par år. Entra Drift hadde mye kunnskap og meninger om de tekniske anleggene. Før prosjektoppstart utarbeidet derfor Entra Prosjekt og Entra Drift et notat som tok hensyn til innspillene drift hadde med hensyn på forbedringsområder. Drift ble nå inkludert i prosjektfasen, men ble ikke fullverdig integrert i prosjektorganisasjonen. Selve byggefasen gikk svært bra med null bygningsmessige feil, og null feil på komponenter i det tekniske anlegget. Idriftsettelsen avdekket derimot at blant annet SD-anlegget ikke var optimalt tilpasset oppfølging av energibruk. SD-anlegget måtte oppgraderes slik at det viste mer informasjon og ga bedre reguleringsmuligheter. Etter omtrent 10 måneders driftstid ble det avholdt et møte der deltagerne var; Entra Prosjekt, Entra Drift, totalentreprenør, teknisk underleverandør og rådgivere. På dette møtet ble gjenstående feil og mangler ved Papirbredden 2 gjennomgått. Det ble satt opp en fast møteserie som ble holdt frem til feilene som var tatt opp i gjennomgangen var blitt utbedret. Den spesifikke energibruken ved Papirbredden 2 var i 2013 104 kWh/m<sup>2</sup>. I løpet av de neste to årene ble energibruken redusert til 78 kWh/m<sup>2</sup>, dette så å si kun takket være optimalisering av drift.

Erfaringene fra Papirbredden 2 ble aktivt brukt under oppstartsmøtet til prosjektet Papirbredden 3. Figur 4-2 viser hvordan prosjektorganiseringen var for Papirbredden 3. Drift var nå en inkludert del av prosjektorganisasjonen, og kunne være med å påvirke utformingen og prosjekteringen av de tekniske anleggene helt fra start. I tillegg fikk totalentreprenør inn en egen ressurs som hadde fokus på energibruk i bygget, denne ressursen fikk tittelen ITB Koordinator. Opplæring og solide støttefunksjoner for Entra Drift har vært høyt prioritert. Fordi drift har vært inkludert siden bygget var på tegnebrettet er også den grunnleggende kunnskapen om bygget og de tekniske anleggene hos dem høy. Beregnet netto energibehov er beregnet til 70 kWh/m<sup>2</sup>, og oppfyller passivhusstandarden. Papirbredden 3 ble ferdigstilt høsten 2015, så det er enda litt tidlig å si noe om hvor vellykket den nye sammensetningen av prosjektorganisasjonen har vært. Signalene fra



Helmen var likevel at det har vært en ytterligere forbedring i planlegging og idriftsetting av de tekniske anleggene i forhold til ved Papirbredden 2.



Figur 4-2 Prosjektorganisering Papirbredden 3, basert på Helmen, (2016).

#### 4.1.2 Verktøy for energieffektiv drift av bygninger

Et verktøy for å vurdere bygningers energiytelse gjennom hele livsløpet er *kontinuerlig funksjonskontroll* eller *lifetime commissioning (LTC)* på engelsk. Begrepet har flere forklaringer, men den nye forståelsen er at kontinuerlig funksjonskontroll tar for seg hele livsløpet til bygninger fra «krybbe til grav», altså fra tidlig prosjektfase og gjennom hele driftsfasen (Nord et al., 2012). Det defineres av Program for kontinuerlig funksjonskontroll for effektiv drift av bygninger (PFK) som:

*«En prosess som skal sikre at tekniske installasjoner er prosjektert, installert og funksjonstestet slik at de er i stand til å oppfylle byggherrens kravspesifikasjoner med hensyn til miljø, energi og ressursbruk gjennom hele livsløpet for bygningen»*  
(PFK, 2013)

Figur 4-3 illustrerer hvordan informasjon flyter fra idéfasen og helt til slutten av byggets levetid (Nord et al., 2012).



Figur 4-3 Kontinuerlig funksjonskontroll sørger for flyt av informasjon gjennom hele livsløpet til bygget, basert på Figur 1 i Nord et al., (2012). Laget av Tale Bærland.

Kontinuerlig funksjonskontroll er et verktøy som skal bidra til å avdekke feil og mangler som kan oversees med dagens standardrutiner for oppfølging av tekniske anlegg og drift av disse. Bygninger blir stadig mer komplekse, som åpner for stadig flere mulige kilder til feil. Optimal kontroll og rask påvisning av eventuelle feil i klimasystemene vil være en av de viktigste faktorene som påvirker energibesparelser. SD-anlegget i samspill med et EOS vil spille en sentral rolle i kontinuerlig funksjonskontroll etter overtagelsen og idriftsettelsen. SD-anlegget kan brukes for å følge opp energiytelsen til bygget og bistå driftsoperatører i å raskt påvise feil og mangler (Nord et al., 2012). Kontinuerlig funksjonskontroll har mange likhetstrekk med funn fra Paulsen (2015), Helmen (2016) og Claridge et al. (1994). Det er viktig med god kunnskap om bygget og dets tekniske anlegg. Det forutsetter at de som er ansvarlig for drift av bygget har god kjennskap til de tekniske anleggene. De prosjekterende og utførende bør ta hensyn til driftsorganisasjonens behov og krav til verktøy slik at de kan følge opp de kravspesifikasjonene som byggherre har satt. Kommunikasjon mellom de forskjellige aktørene som er involvert i byggets levetid er nødvendig å ta hensyn til allerede fra idéfasen.

Ansatte som jobber med drift av bygninger klarer ikke alene å effektivisere energibruken i ett bygg. Det er viktig at ledelsen i organisasjonen som har ansvar for bygget i driftsfasen følger opp energibruken. Dette kan gjøres ved hjelp av *energiledelsessystem* eller bare *energiledelse*. Energiledelsessystem defineres som:

«Et sett av samvirkende elementer i en organisasjon som er forbundet med hverandre for å etablere en energipolitikk og energimål, og for å nå de nevnte mål» (Standard Norge, 2011).

Kort forklart dreier energiledelse i en organisasjon seg om at ledelsen i organisasjonen kartlegger energibruken og hvor det er potensiale for energibesparelser. Ledelsen setter seg klare mål for hvilke energispareambisjoner som skal oppfylles, og setter til side de ressursene som er nødvendig for å klare å oppnå de målene. En tydelig energipolitikk hjelper organisasjonen med å formidle både internt og eksternt hvilke mål de ønsker å oppnå, og hvordan de har tenkt å oppnå det. Når energiledelse er inkorporert som en del av organisasjonens ledelsessystemer, og energi er en faktor som blir rapportert til ledelsen på samme måte som for eksempel økonomi, vil det bli lettere å kunne kontinuerlig avdekke nye muligheter til å redusere energibruken (Enova, 2012).

Forsvarsbygg er en av organisasjonene som har hatt stor suksess med å innføre en tydelig energiledelse. I 2006 igangsatte Forsvarsbygg i samarbeid med Enova et omfattende energiledelsesprogram. Energisparepotensialet i forsvarssektoren er stort, og målet ble satt til å spare 90 GWh og en konvertering til CO<sub>2</sub>-nøytrale energikilder på mer enn 75 GWh (Forsvarsbygg, 2007). Fase 2 av energiledelsesprogrammet avsluttes i 2016. I Forsvarsbyggs årsrapport for 2015 oppgis det at fase 2 vil nå målsettingen om å nå 93 GWh i energibesparelser. Forsvarsbygg trekker frem energiledelse som et viktig ledd i både å forhindre økt energibruk, og for å redusere faktisk årlig energibruk. Derfor vil de fortsette å benytte energiledelse som et verktøy for å nå fremtidige mål om fortsatt redusert energibruk (Forsvarsbygg, 2015).

## 4.2 ENERGIRELATERT BRUKERATFERD I BYGNINGER

I dette kapitlet er det brukerne av bygget og deres innflytelse på energibruken det fokuseres på, altså elever og lærere i et skolebygg eller ansatte i en bedrift i et kontorbygg.

### 4.2.1 Generelt om energirelatert brukeratferd

Som nevnt i starten av kapittel 4.1 har forskningen på energisparing i bygninger så langt dreid seg om tekniske løsninger. Denne teknologien brukes av mennesker, noe som åpner for menneskelige feil. Brukeratferd blir dermed et svakt ledd med hensyn på økt energieffektivitet (Masoso og Grobler, 2009). Effekten av å endre energirelatert brukeratferd har ifølge diverse studier et energisparepotensiale på omtrent 20 % (Gynther et al., 2010).

Energirelatert atferd består hovedsakelig av to typer atferd: *investeringsatferd* og *vaneatferd*. Investeringsatferd oppstår som regel i forbindelse med overgang til ny teknologi og kjøp av nytt utstyr. Vaneatferd er den rutinemessige og automatiske atferden brukere har, uten å tenke over hvilke konsekvenser den handlingen har. For eksempel om de skrur av lys når de forlater et rom. Begge typer atferd er viktige med hensyn på energibruk, og det finnes flere tiltaksprogram for endring i begge typer energirelatert brukeratferd som er gjennomført både i Norge og internasjonalt (Gynther et al., 2010). Enovatilskuddet, som gir økonomisk støtte til å gjennomføre energivennlige tiltak i hjemmet, er et typisk tiltaksprogram som har som formål å endre investeringsatferd. Mens

kampanjer som for eksempel oppfordrer folk til å reise med kollektivtransport i stedet for bil vil være et typisk tiltaksprogram som ønsker å endre vaneatferden til folk.

Hvert individ tjener som regel mer på å handle i egeninteresse enn i fellesinteresse. En gruppe av mennesker vil derimot trekke større fordeler av at alle handler i fellesinteresse og ikke egeninteresse. For å kunne endre atferden til individet må derfor motivasjonen påvirkes, for eksempel ved å innføre insentiver eller nye lover og regler, eller fjerne andre barrierer som hindrer individet i å handle til fordel for gruppens fellesinteresse (Strumse, 2006).

Mangel på informasjon om det aktuelle tema er ofte en barriere som hindrer ønsket atferd. For at energisparepotensialet i en bygning skal utnyttes må byggets brukere og driftsoperatører ha nok kunnskap om energiøkonomi til å foreta energivennlige valg. Ofte har ikke brukerne av bygget noe særlig kunnskap om lavenergi- og passivhus før de begynner å ta i bruk et bygg med denne standarden. Da er det viktig at de opplyses om hvordan deres bruksvaner påvirker effektiviteten av de tekniske installasjonene i bygget. Brukernes valg motiveres som regel av komfort, som er egeninteresse, og ikke av å foreta mest mulig energivennlige valg, som er en fellesinteresse. Etter hvert som brukerne blir mer opplyst om energibruk, og samspillet mellom valgene deres og effektene det har på bygget, økonomien og miljøet blir de også mer opptatt av å ta miljøbevisste valg (Thomsen et al., 2013). Samme konklusjon trekkes av Thunshelle og Hauge (2012) da de intervjuet elever og ansatte ved Norges første passivhus skole, Marienlyst skole. Intervjuene viste at den miljøvennlige profilen skolebygningen har fører til at både elever og lærere tar mer miljøbevisste valg i andre arenaer i livet (Thunshelle og Hauge, 2012). Dette støttes av en studie utført av Galvin og Sunikka-Blank (2013), der funnene viste at folk som selv aktivt gikk inn for å anskaffe et passivhus, gjennomsnittlig hadde lavere energibruk enn folk som ble overtalt av arkitekt til å bygge passivhus, tilfeldigvis leide et passivhus eller lignende. Det antas at de som bevisst velger å bo i passivhus har bedre kjennskap til denne typen bygninger (Galvin og Sunikka-Blank, 2013). Likevel har informasjonskampanjer alene liten effekt, da de kun fjerner de informasjonsrelaterte barrierene. Andre ytre barrierer som for eksempel økonomi blir ikke belyst. Dersom det kun kunnskapsnivået som økes kan det ofte føre til at kun atferd som det ikke er knyttet en kostnad til endres (Strumse, 2006).

Brukeratferd, og hvordan å påvirke den, varierer mellom de forskjellige bygningstypene. Hvordan en bruker forholder seg til energibruken sin hjemme, er ikke nødvendigvis det samme som på arbeidsplassen eller skolen. Blant annet vil det være forskjellige insentiver som motiverer atferden. I sitt eget hjem har brukeren et direkte økonomisk insentiv for å redusere energibruken, mens økonomi ikke nødvendigvis er noe som tas hensyn til på arbeidsplassen. Selv om brukerne på en arbeidsplass er motivert til å spare energi av ikke-finansielle årsaker mangler ofte brukerne informasjonen som er nødvendig for å finne effektive energisparetiltak, som for eksempel å ha tilgang til energiregningen (Carrico og Riemer, 2010). Dermed er det viktig å tilpasse tiltaksprogram og holdnings- og informasjonskampanjer til målgruppen. Forsøk på å nå ut til «alle med alt» har vært lite effektive. Tiltaksprogrammene bør fokusere på et smalere tema og på ett markedssegment, og målrettet markedsføre seg mot den for å oppnå størst mulig effekt. En

prioritert liste over hvilke tiltak som har størst effekt bør lages og følges for å bestemme hvilke temaer som skal tas opp (Gynther et al., 2010).

#### 4.2.2 Brukeratferd i energiberegninger

En artikkel publisert av Azar og Menassa (2012a) tar opp problemstillingen rundt brukeratferd og energiberegninger. Energiberegninger brukes for å optimalisere dimensjoneringen av mekaniske og elektriske systemer i bygninger. Fordi bygninger er komplekse, og det er mange parametere som påvirker energibruken, lages det ofte modeller av bygningene i simuleringsverktøy. De kan enklere beregne energibruken over lengre tid og ta hensyn til en større variasjon av inndata for de forskjellige parametere. Det viser seg i midlertid at det kan være forholdsvis store uoverensstemmelser mellom de beregnede verdiene og reell energibruk. Derfor er det viktig at det gjennomføres sensitivitetsanalyser av inndataparametere. Tekniske komponenter og bygningsfysiske parametere har blitt analysert med hensyn til påvirkning av energimodeller i flere studier. Brukeratferd er påvist å ha en signifikant påvirkning på energibruken Likevel finnes det lite litteratur om hvordan brukeratferd påvirker energibruken i bygninger og hvordan det burde tas hensyn til i energisimuleringer. Økt fokus på brukeratferd i energisimuleringer av bygninger støttes av Hoes et al., (2008) og Bryn, (2016). Under Enovakonferansen 2016 holdt Dr.ing Ida Bryn ved Erichsen & Horgen et innlegg om avvik mellom målt og beregnet effekt- og energibehov. De postene som er vanskelig å beregne er ifølge Bryn; tilstedeværelse, samtidighet og bruk av utstyr. Alle disse tre postene påvirkes av brukeratferd.

I en studie utført i Sverige ble tre bygningssimuleringsprogram sammenlignet, og en case- og parameterstudie utført. Bygningene som ble undersøkt var 20 lavenergirekkehus i Sverige. Modellene og parameterstudiet tok utgangspunkt i disse rekkehusene. Avviket mellom resultatene fra modellene i de tre programmene var på rundt 2 %. Parameterstudiet som undersøkte el-spesifikke internlast, virkningsgrad på varmegjenvinner og på tilluftsmengder fant at varmegjenvinneren var den komponenten som hadde størst påvirkning på energibehov til romoppvarming. Utfra data innhentet over to år fra rekkehusene viste det seg å være store avvik på brukt energi. Der de største avvikene viste at huset med høyest energibruk brukte 50 % mer enn gjennomsnittet, mens huset med lavest energibruk brukte 20 % under gjennomsnittet. Rapporten konkluderte med at brukeratferd var den viktigste faktoren å ta hensyn til i bygningssimulering, men også den vanskeligste å modellere. Hvilket simuleringsverktøy som benyttes til bygnings-simulering hadde mindre påvirkning på resultatet variasjoner i brukeratferd (Karlsson et al., 2007).

I en studie utført av Azar og Menassa (2012a), ble det gjennomført en sensitivitetsanalyse på hvordan noen brukerstyrte parametere påvirket energibruken i næringsbygg av typen kontorbygg med bruttoareal mellom 92,9 m<sup>2</sup> og 464,5 m<sup>2</sup> i et varmt og et kaldt klima i USA. Det ble valgt å se på små næringsbygg fordi disse i større grad ble styrt av brukerne og ikke av sentraldrift, dermed kunne det lettere sees hvordan brukeratferd påvirker energibruken. Denne studien konkluderte først og fremst med at det er viktig å være kritisk og tenke nøye igjennom hvilke inndataparametere som velges når settpunkttemperaturer skal modelleres. I kalde klima fant de at det er oppvarmingsbehov som har størst påvirkning på totalenergibruk. Settpunkter utenom driftstid, ved driftstid menes her

når bygget er i bruk, hadde stor påvirkning på energibruken. Sensitiviteten til energimodellene med hensyn på interne laster utenom driftstiden var mindre i kalde klima enn i varme. Dette antas å skyldes at de interne lastene bidrar til oppvarming av bygget, slik at oppvarmingsbehovet går noe ned (Azar og Menassa, 2012a). Det påpekes at med hensyn på primærenergi burde det å bruke høyverdig energi som elektrisitet til oppvarming unngås, spesielt hvis det er termisk energi tilgjengelig.

Studiet presentert i avsnittet over var innledende funn, og ble senere brukt som basis for en studie som undersøkte modeller av 30 typiske næringsbygg i flere størrelseskategorier og klimasoner. Modellene er basert på 520 næringsbygg i USA. I det utvidede studiet ble det igjen bekreftet at brukeratferd har en signifikant innflytelse på energibruken. I hvor stor grad parametere påvirkes av brukeratferd varierer etter størrelse på bygningen og hvilken klimasone bygget ligger i. Derfor anbefales det at det tidlig i designfasen avdekkes, ved hjelp av detaljerte energisimuleringer, hvilke brukerstyrte parametere som vil ha størst betydning for energibruken gitt størrelse av bygget og beliggenhet. Ved å identifisere hvilke brukerstyrte parametere som har størst innvirkning på energibruken, kan bygningen og dets tekniske systemer designes slik at brukerens mulighet til å justere disse parametere begrenses (Azar og Menassa, 2012b).

## 5 PRESENTASJON AV SKOLENE

---

Dette kapitlet er ment for å gi leseren en oversikt over skolene som ble undersøkt i forbindelse med oppgaven. Først presenteres Marienlyst skole i Drammen, deretter presenteres Nardo skole i Trondheim. Det gjennomgås generell informasjon om skolene, deres beliggenhet og tekniske anlegg samt en gjennomgang av tidligere forskning gjennomført ved skolene.

### 5.1 MARIENLYST SKOLE

I dette kapitlet presenteres Marienlyst skole i Drammen og tidligere forskning gjort på inneklimaet ved skolen.

#### 5.1.1 Generelt om Marienlyst skole

Marienlyst skole i Drammen kommune er den første skolen i Norge bygget til passivhus standard. Den opprinnelige energiambisjonen var å bygge en lavenergiskole. Grunnarbeidet var allerede i gang da det ble besluttet at Marienlyst skole skulle bygges etter passivhusstandarden. Det originale designet av bygget passet svært godt til å nå den nye miljøambisjonen. Bygget var designet for å være kompakt og arealeffektivt. Derfor ble ikke tegningene endret drastisk, det ble i stedet enda større fokus på isolasjon, U-verdier, kuldebroer, lekkasjetall og kvalitet på vinduene (FutureBuilt, 2010). Figur 5-1 viser hvordan Marienlyst skole har en kompakt bygningskropp.



*Figur 5-1 Foto av sørvest og nordvest fasaden til Marienlyst skole. Foto: div.A Arkitekter, gjengitt med tillatelse.*

Skolen er sentralt plassert i Drammen, med tilknytning til Drammen Idrettspark som inkluderer flere store idrettsanlegg, en idrettshall og Drammensbadet. Marienlyst skole er lett tilgjengelig for

kollektivtrafikk og sykkel. Dette gjenspeiles i at det er få parkeringsplasser tilknyttet skolen, da det legges opp til alternative transportmidler både for elever og ansatte. Det er likevel en større parkeringsplass i nærheten i tilknytning til idrettsanleggene, disse kan benyttes dersom det er arrangement på skolen som trekker mange besøkende med bil.

Figur 5-2 og Figur 5-3 viser skolens hovedinngangsparti og amfi utenfra og fra innsiden.



*Figur 5-2 Nordvest fasaden til Marienlyst skole, innsyn til Amfiet. Foto: div.A Arkitekter, gjengitt med tillatelse*



*Figur 5-3 Amfiet sett fra 2. etasje. Foto: div.A Arkitekter, gjengitt med tillatelse.*



I Tabell 5-1 og Tabell 5-2 oppgis generelle fakta om Marienlyst skole og tekniske spesifikasjoner for skolebygget.

Tabell 5-1 Fakta om Marienlyst skole (Hahn, 2015).

<b>Fakta om Marienlyst skole</b>	
<b>Eier</b>	Drammen Kommune
<b>Adresse</b>	Schwartz gate 12, 3043 Drammen
<b>Byggeår</b>	2010
<b>Areal</b>	6454 m <sup>2</sup>
<b>Byggepris</b>	223 000 000,-
<b>Antall ansatte</b>	Ca. 60
<b>Antall elever</b>	Ca. 560

Tabell 5-2 Sammenligning av tekniske spesifikasjoner ved Marienlyst skole (Dokka og Andersen, (2012), Standard Norge, (2012) og dibk, (2011)).

<b>Tekniske spesifikasjoner Marienlyst skole</b>			
	Marienlyst skole	TEK 10	Passivhus
<b>U-verdi yttervegg</b>	0,12 W/m <sup>2</sup> K	≤ 0,22 W/m <sup>2</sup> K	0,10-0,12 W/m <sup>2</sup> K <sup>a</sup>
<b>U-verdi tak</b>	0,10 W/m <sup>2</sup> K	≤ 0,18 W/m <sup>2</sup> K	0,08-0,09 W/m <sup>2</sup> K <sup>a</sup>
<b>U-verdi til grunn</b>	0,05 W/m <sup>2</sup> K	≤ 0,18 W/m <sup>2</sup> K	0,08 W/m <sup>2</sup> K <sup>a</sup>
<b>U-verdi vindu</b>	0,82 W/m <sup>2</sup> K	≤ 1,60 W/m <sup>2</sup> K	≤ 0,8 W/m <sup>2</sup> K
<b>Normalisert kuldebroverdi Ψ''</b>	0,03 W/m <sup>2</sup> K	≤ 0,06 W/m <sup>2</sup> K	≤ 0,03 W/m <sup>2</sup> K
<b>Lekkasjetall n<sub>50</sub></b>	0,6 h <sup>-1</sup>	≤ 3,0 h <sup>-1</sup>	≤ 0,6 h <sup>-1</sup>
<b>Virkningsgrad varmegjenvinner</b>	84 %	≥ 80 %	≥ 80 %
<b>SFP-faktor ventilasjonsanlegg</b>	1,5 kW/(m <sup>3</sup> /s)	≤ 2,0 kW/(m <sup>3</sup> /s)	≤ 1,5 kW/(m <sup>3</sup> /s)

a – disse verdiene er eksempler på hvor lave U-verdier som skal til for å nå passivhusstandard og ikke krav i seg selv.

### 5.1.2 Klima i Drammen

Drammen ligger innerst i Drammensfjorden. Fjorden påvirker klimaet, men ikke like kraftig som for eksempel Oslo påvirkes av Oslofjorden. Drammen faller inn under klimasonen kaldtemperert. Det er kaldt og fuktig om vinteren, men sommermånedene kan bli varme. Buskerud fylke ligger generelt i le av vinden på grunn av fjellene i sørøst, nord, og nordøst, vindstyrken er derfor liten. Om sommeren er vindretningen mellom sør og vest, mens om vinteren kommer vinden fra nordøst (Dannevig, 2009). Årsmiddeltemperatur for Drammen er 5,5 °C (Klimadata Drammen, 1990).

### 5.1.3 Tekniske anlegg

Marienlyst skole er tilknyttet nærvarmeanlegget på Strømsø, og veksler varme og kulde med noen av idrettsanleggene rundt skolen. Valget om å tilpasse varmesentralen ved skolen slik at nærvarmenettet kunne benyttes til å utnytte overskuddsvarme ble tatt etter bygget sto ferdig (Ørnes og Løvlund, 2016). Kunstgressbanen som ligger rett nord for skolen akkumulerer solvarme som benyttes av en varmepumpe som dekker grunnlasten for oppvarming ved skolen, og andre bygg og anlegg tilknyttet nærvarmenettet (FutureBuilt, (2010) og Thunshelle og Hauge, (2012)). Skolens overskuddsvarme, som tilsvarer cirka 8 kWh/m<sup>2</sup>, benyttes i hovedsak til å dekke deler av oppvarmingsbehovet ved Drammensbadet. Fjernvarmenettet er tilkoblet for å dekke spisslasten for energi- og effektbehovet (FutureBuilt, 2010).

Til romoppvarmingsformål er det installert et gulvvarmeanlegg på skolen, i tillegg til et takvarmeanlegg i amfiet. Takvarmeanlegget er egentlig overflødig, men er installert fordi det ble inkludert i anbudsrunderen fra før skolen hadde ambisjoner om å nå passivhusnivå. Gulvvarmeanlegget kan benyttes til kjøleformål i sommermånedene (Andersen, 2016).

Gulvkjølingen ved skolen kan nærmest beskrives som et slags «biprodukt», da skolen heller brukes som varmekilde for andre bygg. Kjølebehovet ved skolen kan dekkes av frikjøling via ventilasjonsanlegget, og automatisk lufting via takluker. Med hensyn på den totale energibruken i nærvarmenettet er det derimot langt mer effektivt å utnytte overskuddsvarmen til bygget til å dekke deler av oppvarmingsbehovet ved Drammensbadet. Gulvkjøling anbefales på bakgrunn av dette å ikke tas med i energiregnskapet. Den eneste tilførte energien til bygget for å dekke kjølebehovet via gulvkjøleanlegget er elektrisitet til drift av pumpene. Gulvkjøling tas i bruk i de varmeste månedene i året, når skolen ikke har et oppvarmingsbehov. Denne perioden strekker seg fra cirka medio mai til medio september. Har skolen et kjølebehov når gulvkjøling ikke er i drift benyttes dumping av varme via ventilasjonsanlegget (Ørnes og Løvlund, 2016 og Andersen, 2016).

Det er balansert ventilasjon på skolen, og det benyttes en roterende varmegjenvinner med høy virkningsgrad på 83 %. Ventilasjonen er behovsstyrt, der reguleringen skjer med hensyn på informasjon innhentet fra temperatur- og CO<sub>2</sub>- sensorer plassert i klasserommene. Om brukerne kan justere på settpunktene til sensorene ble ikke avklart (Thunshelle og Hauge, 2012).

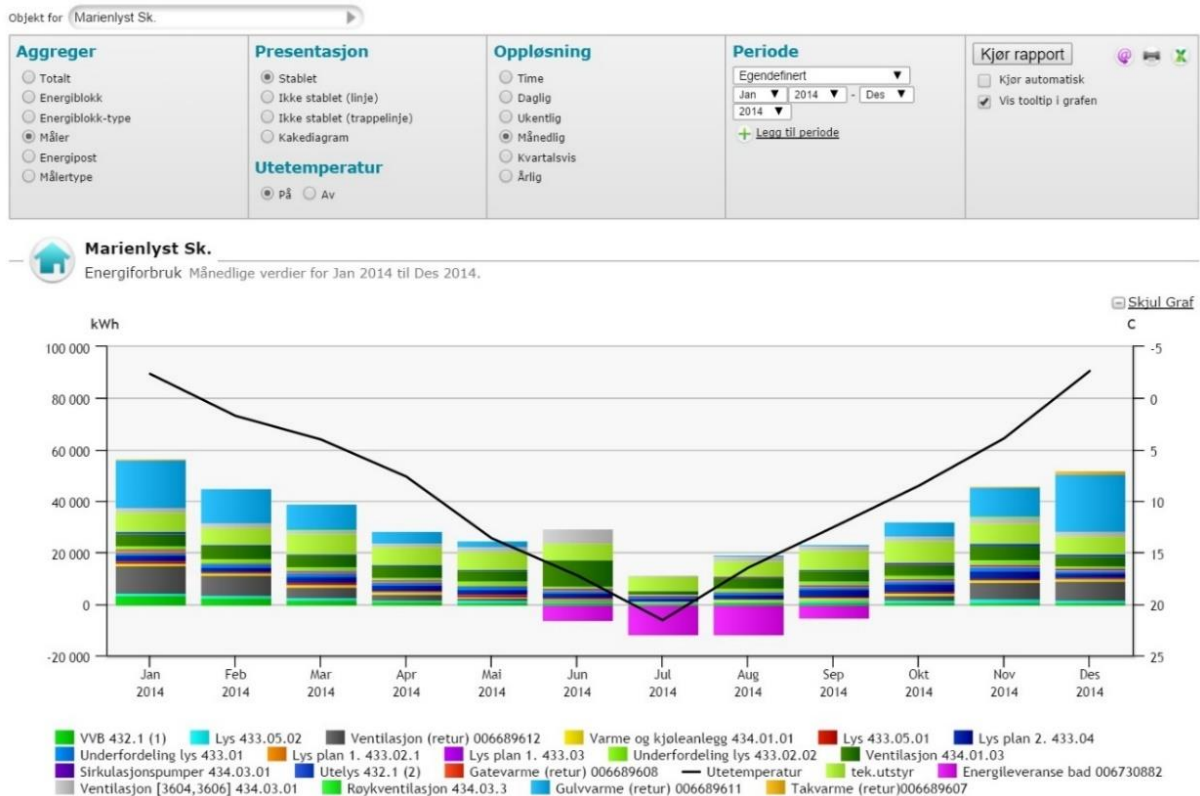
Belysningen ved skolen er behovsstyrt. For å redusere energibruken utløses belysningen av bevegelsessensorer, og reguleres etter tilgang på dagslys. Der det er hensiktsmessig er det valgt å installere energieffektiv LED-belysning (Thunshelle og Hauge, 2012).

For å sørge for behagelig inn klima om sommeren er det valgt å bruke varmeabsorberende glass og automatisk solavskjerming i rom vendt mot sør og vest. Røyklukene i skolen har automatisk luftefunksjon, slik at varm luft kan fjernes via disse når det er behov for kjøling. Ventilasjonsanlegget kan brukes til nattkjøling (Thunshelle og Hauge, 2012).

### 5.1.4 Energioppfølgingssystem

Energioppfølgingssystemet (EOS) ved Marienlyst skole er levert av EvoTek, og er tilgjengelig på energinet.net. Her loggføres og lagres all data fra målerne i bygget, samt utetemperatur for området.

Temperaturmålingene er hentet fra SD-anlegget til et bygg som heter Tribunebygget og ligger cirka 150 meter unna skolen. Temperaturmåleren der måler med en frekvens på én gang i timen. Det er mulig å hente ut rapporter med forskjellig oppløsning; på times-, døgns-, ukes- ellers årsnivå. Dette gir brukeren av EOS muligheten til å avdekke avvik fra år til år, eller dag til dag om det er ønskelig. Tilgang til EOS gis av blant annet Drammen Eiendom KF. Figur 5-4 viser et skjermbilde av EOS for Marienlyst skole. Her vises hvordan forskjellige rapporter kan utformes. Etter en rapport er kjørt er det mulig å laste ned dataene i en Excelfil slik at de kan behandles videre dersom det er nødvendig. Figur 5-4 viser en skjermdump fra EOS som viser hvordan måledata kan presenteres.



Figur 5-4 Skjermbilde av EOS Marienlyst skole (EvoTek, EOS Drammen kommune, n.d.)

### 5.1.5 Målerstruktur

Marienlyst skole er godt utstyrt med målere, det er til sammen 22 målere på termiske og elektriske kurser. Disse er lagt opp slik at energibruken kan måles på energipostnivå slik energibudsjettet i NS 3031 er lagt opp. I tillegg måles elektrisitet og fjernvarme levert til bygget av hovedmålere installert av netteier og varmelieferandør, dette fungerer som en ekstra kvalitetssikring for detaljmålingene gjort av undermålerne installert i bygget (Dokka og Andersen, 2012).

Figur 5-5 viser *Gulvkjøling* og *Energileveranse bad* som to forskjellige poster, noe som ikke medfører riktighet. *Gulvkjøling* og *Energileveranse bad* er samme energipost.

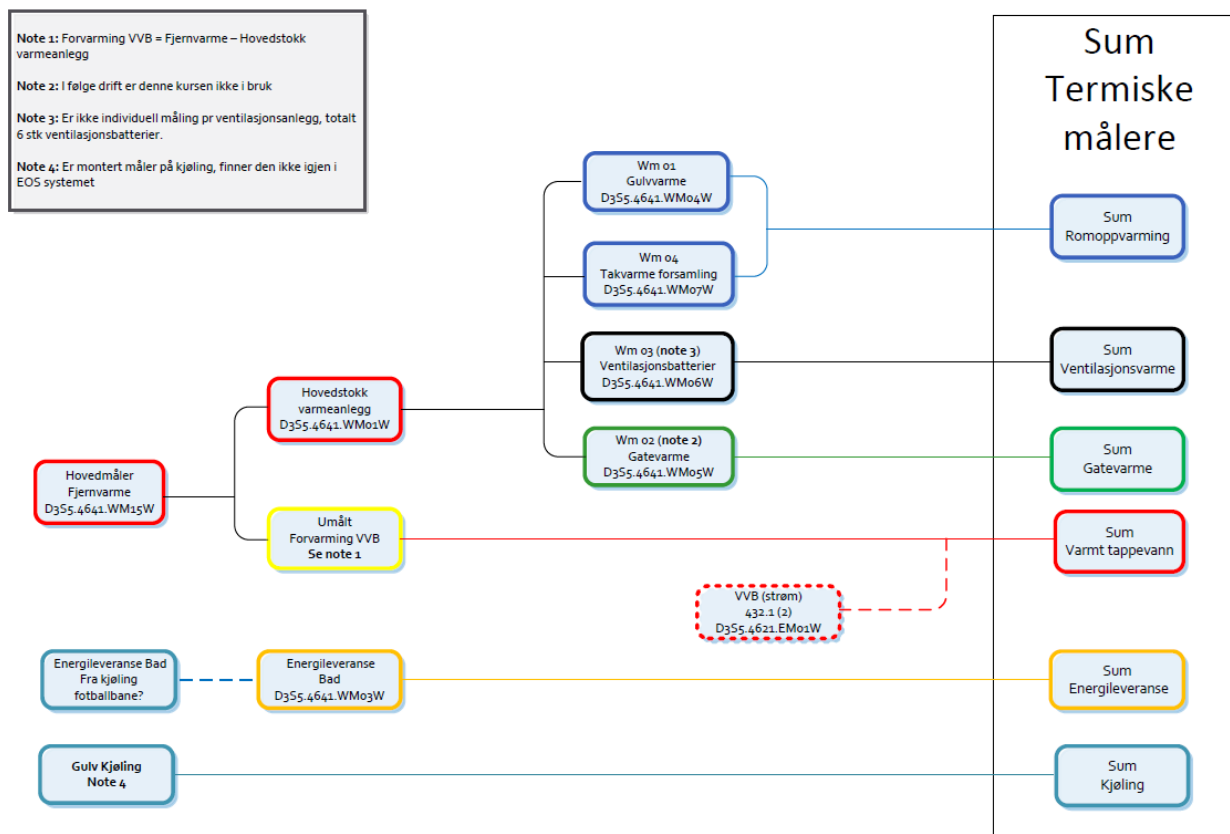
### ***Målerbefaring ved Marienlyst skole***

Følgende underkapittel er en oppsummering av notatet fra målerbefaringen gjennomført ved Marienlyst skole i Drammen 20. april 2016 (Ørnes og Løvlund, 2016). To representanter fra henholdsvis Entro og Erichsen & Horgen hadde ansvar for befaringen på oppdrag fra Enova. Undertegnede var tilstede som observatør under denne befaringen. Oppfølging av målere er et ledd i formålsdeltprosjektet til Enova, der målersystemet ved de aktuelle yrkesbyggene sjekkes før analyse av data i prosjektet gjennomføres. Denne befaringen ble gjennomført på bakgrunn av at energiflytskjemaer og nullsumskontroller fra BKK viste betydelige avvik mellom hovedmåler for elektrisitet og summen av undermålere for elektrisitet. Avvikene på de termiske kursene var i seg selv akseptable, men det var knyttet noe usikkerhet til om energiflytskjemaet var korrekt i forhold til termiske kurser og målere i bygget.

Etter en gjennomgang av elektriske målere på bygget ble en del kilder til avvik avdekket. De viktigste avvikene blir beskrevet videre i dette avsnittet. To målere for utvendig energi viser null energibruk, dette er feil da det brukes elektrisitet til belysning og utvendig varme. Dette vil ikke påvirke energiregnskapet undersøkt i denne masteren nevneverdig da det sees bort fra utendørs energibruk i sammenligningen av beregnet og målt energibruk. Det mangler en måler til å måle energibruken til avbruddsfri strømforsyning (UPS). Det ble ikke funnet noe informasjon om hva UPS'en forsynte eller hvordan den fungerte, derfor er det ikke mulig å estimere energibruken til denne. Det var også noe avvik på de elektriske kursene til teknisk utstyr i nullsumsskjemaene som ble mottatt før befaringen. Den ene måleren viste null energibruk, men data for denne måleren ble oversendt ved et senere tidspunkt. Det antas at avviket på denne måleren dermed kan neglisjeres. Det manglet visstnok en måler i EOS til teknisk utstyr, denne sto i tavlen og måler et månedlig forbruk på ca. 320 kWh. Denne måleren må inkluderes i energiflytskjemaene utarbeidet av BKK.

På de termiske målerne er det noe avvik, men det er innenfor det som forventes av feilmargin for denne type målere. I snitt for perioden som ble kontrollert lå avviket for de termiske energipostene på -7,6 %. I perioder med høyt forbruk var avviket nede i -2,3 %, mens det i måneder med nær null varmebehov var betydelig høyere avvik. Dette skyldes at massestrømmen i rørene i disse månedene er svært lav, noe som fører til større unøyaktighet i målerne. Se Figur 5-5 for oversikt over den termiske energiflyten ved Marienlyst skole. Hele energiflytskjemaet kan finnes i Vedlegg 2 (BKK, n.d.).

Den termiske kursen til forvarming av tappevann tas ut mellom hovedmåler for tilført energi fra nærvarmenettet og hovedmåler varmestokk. Denne kursen har ikke en egen energimåler, men beregnes ut ifra differansen mellom de to hovedmålerne. Det er to varmtvannsberedere koblet i serie. Vannet i den første berederen forvarmes av nærvarmenettet, mens vannet i den andre berederen varmes opp til settpunkttemperaturen av et elektrisk varmeelement. Det er et elektrisk varmeelement i begge berederne, men varmeelementet i den første berederen skal ifølge driftsinstruksjonen være avslått. På befaringen ble det derimot oppdaget at det elektriske varmeelementet sto på i begge berederne. Øvrige termiske energiposter påvirkes ikke av dette.



Figur 5-5 Energiflytskjema termiske kurser ved Marienlyst skole (BKK, n.d.).

### 5.1.6 Materialer og konstruksjon

Da det ble valgt materialer til bygget ble hensyn til vedlikehold, holdbarhet og pris prioritert. Klimahensyn var ikke primærfokus da materialene ble valgt. Arkitekten ønsket først trekledd fasade, men det ble valgt bort på grunn av vedlikeholdsmessige årsaker. I stedet ble glass og puss og tegl brukt til fasaden for å gi et uttrykk av kontrast mellom åpent og lukket. (FutureBuilt, 2010)

Bæresystemet er i plasstøpt betong med utfyllende bindingsverksvegger og et lett tretak som ytterkonstruksjon. Det er ingen kjeller på Marienlyst skole og gulvet er til grunn. Skolen er bygget inn i terrenget, slik at deler av ytterveggene er mot grunn (Thunshelle og Hauge, 2012).

### 5.1.7 Inneklima ved Marienlyst skole

Begrepene inneklima og innemiljø brukes ofte om hverandre, men de betyr ikke helt det samme. Inneklima omfatter ifølge Verdens Helseorganisasjon termisk, atmosfærisk, akustisk, aktinisk og mekanisk miljø. Mens innemiljø i tillegg til inneklima også beskriver estetiske og psykososiale faktorer som påvirker miljøet brukere befinner seg i innendørs (Novakovic et al., 2007).

Innemiljøet ved Marienlyst skole ble evaluert gjennom intervjuer og spørreskjema med brukere i 2011, som et ledd i ett av flere casestudier for brukerevaluering av passivhus i forskningssenteret ZEB, arbeidspakke 4. I dette kapitlet blir de viktigste resultatene angående inn klimaet presentert i ZEB Prosjektrapport 5 – 2012 kort oppsummert. Resultatene er basert på informasjon hentet fra tre intervjuer gjennomført i 2011, med totalt 23 informanter som inkluderer både elever, lærere og driftsansatte. Samt en spørreundersøkelse gjennomført i slutten av 2011 gitt til alle elever og ansatte ved skolen (Thunshelle og Hauge, 2012).

Generelt er elevene og de ansatte ved Marienlyst skole svært fornøyde med skolebygget. Symptomer som kan knyttes til innemiljøet ble kartlagt ved hjelp av en spørreundersøkelse. Resultatene fra denne undersøkelsen viser svært gode resultater når det sammenlignes med referansematerialet benyttet av Thunshelle og Hauge (2012). Luften i skolebygget oppfattes av brukerne som ren og ikke innestengt. Dette støttes av at scoren på symptomer som tørr hud, hoste og trøtthet er lavere enn ved referansematerialet. Selv om ventilasjon og luftkvalitet stort sett ble beskrevet som bra kom det frem at både elever og lærere klagde på mye dårlig luft i auditoriene og de små grupperommene i 3.etg (Thunshelle og Hauge, 2012). Etter telefonintervju med avdelingsleder Geir Forbord 11. april 2016, kom det frem at auditoriene ikke lenger er i bruk fordi luften der anses som for dårlig (Forbord, 2016).

I starten av perioden da intervjuene og undersøkelsene ble gjennomført, altså begynnelsen av 2011, var bygget fremdeles i innkjøringsfasen. Dette kan ha påvirket resultatene fra undersøkelsen. Blant annet klagde en del elever på at det var kaldt den første vinteren 2010/2011. Dette ser det i midlertid ut til at ble forbedret innen neste fyringssesong startet da elevene generelt svarte at de var mer fornøyd med temperaturene i desember 2011 enn i starten av 2011 (Thunshelle og Hauge, 2012).

Lysforholdene i skolen var heller ikke optimale. Det var spesielt problemer med gjenskinn og blanding fra sola som ble trukket frem. I tillegg ble det klaget på varme fra sola. Dette ble satt i sammenheng med ikke optimal regulering av solskjermingen. Det ble satt i gang tiltak for å forbedre styringen av solskjermingen. Bevegelsessensorene installert i rommene var i starten ikke sensitive nok slik at lysene ble slått av selv om brukere oppholdt seg i rommet. Dette ble det satt i gang tiltak for å finjustere (Thunshelle og Hauge, 2012).

## 5.2 NARDO SKOLE I TRONDHEIM

I dette kapitlet presenteres først generell informasjon om Nardo skole, deretter presenteres funn fra to masteroppgaver som tidligere er skrevet om Nardo skole.

Linda Eimhjellen skrev masteroppgave om Nardo skole og barnehage våren 2009 med tittel «Nardo skole – brukererfaringer og energibruk». Grunnet problemer med energimålerne ble ikke energibruk lagt mye vekt på i Eimhjellens oppgave, hovedfokuset var i stedet på inneklima.

Våren 2010 skrev Maria Berg Hestad masteroppgave med tittel «Energibruk og inneklima i lavenergi skolebygning». Denne bygger videre på Eimhjellens funn fra året før. Formålet med masteroppgaven var å analysere energibruken og inneklimaet ved Nardo skole og barnehage. Hestads masteroppgave skulle i utgangspunktet legge omtrent like mye vekt på inneklima og energibruk. Inneklimaet viste seg imidlertid å være forholdsvis bra, mens det var store utfordringer knyttet til energibruken. Derfor ble det valgt å i hovedsak fokusere på energibruken ved skolen.

### 5.2.1 Generelt om Nardo skole

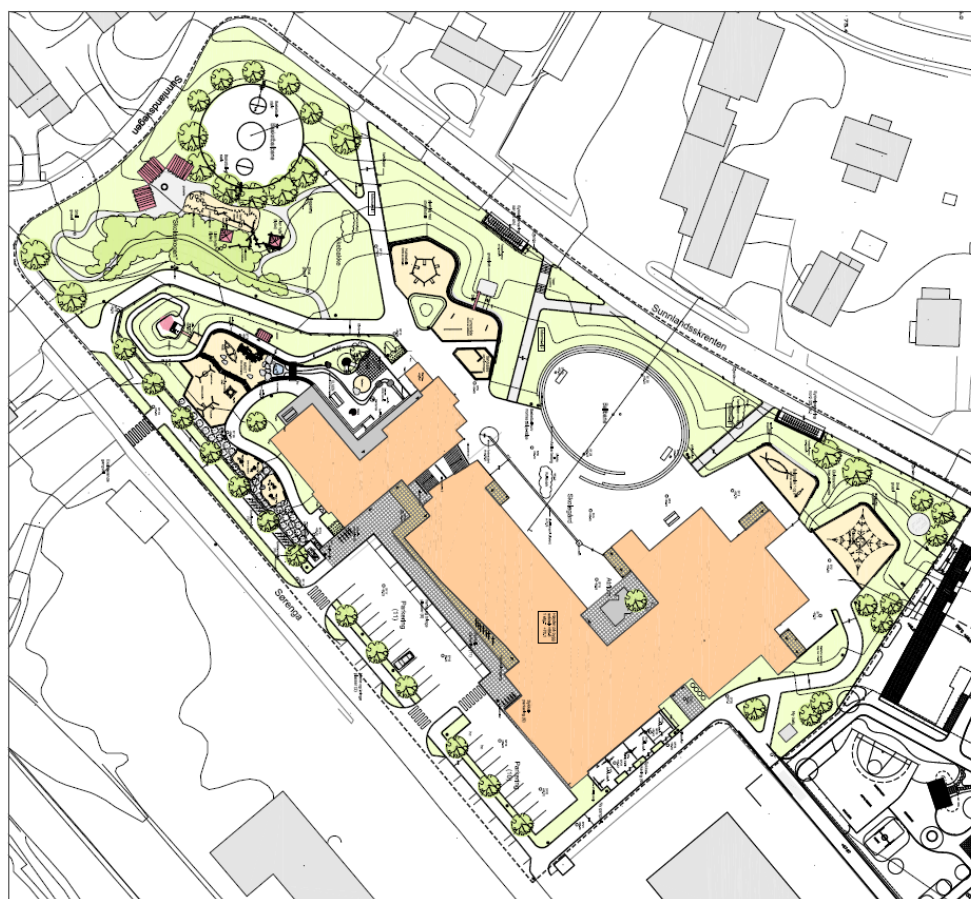
Nardo skole og barnehage sto ferdig i Trondheim høsten 2008. I masteroppgaven var det skoledelen av bygget som skulle undersøkes, men det var vanskelig å skille på energibruken til skolen og barnehagen, derfor har begge blitt inkludert i oppgaven. Barnehagen er et separat bygg, tilknyttet skolen ved hjelp av en gangbro. Videre forkortes *Nardo skole og barnehage* til kun *Nardo skole*, selv om begge delene inkluderes i videre analyse. Figur 5-6 viser skolens hovedinngang.



Figur 5-6 Nardo Skole. Arkitekt: Eggen Arkitekter Foto: synlig.no, gjengitt med tillatelse.

Nardo skole er et pilotprosjekt innenfor to områder. I 2006 valgte Trondheim kommune på bakgrunn av en nasjonal satsning på økt bruk av treverk i bygninger å lansere prosjektet «Trebyen Trondheim». Nardo skole regnes som et pilotprosjekt innen bruk av massivtre som konstruksjonsmateriale, i tillegg til å ha høye miljøambisjoner. Nardo skole oppfyller kriteriene for å være en lavenergiskole etter kravene satt i «Kriterier for passivhus- og lavenergibygg – Yrkesbygg» (Dokka et al., 2009). I denne oppgaven er det valgt å bruke uttrykket lavenergiskole om Nardo skole selv om den teknisk sett ikke oppfyller kravene til NS 3701, siden de har etterstrebet å oppfylle kriteriene som var gitt da den ble bygget.

Skolen ligger om lag 3 km sør for Trondheim sentrum. Det er industriområder sør og øst for skolen, mens det på nord- og vestsiden er boligstrøk. Skolen er plassert helt sørøst på tomten, dette er for å skjerme skolegården som ligger på nordvest siden av bygget fra støy fra E6 som ligger 100m sørøst for skolen (Hestad, 2010).



Figur 5-7 Landskapsplan Nardo skole og barnehage. Illustrasjon Løvetanna Landskap AS, gjengitt med tillatelse.

I Tabell 5-3 og Tabell 5-4 presenteres generelle fakta om Nardo skole og informasjon om de tekniske spesifikasjonene ved bygget. Lavenergikravene oppgitt i Tabell 5-4 er de som gjaldt da skolen ble bygget i 2008.



Tabell 5-3 Generelle fakta Nardo skole.

<b>Fakta om Nardo skole</b>	
<b>Eier</b>	Trondheim Kommune
<b>Adresse</b>	Sørenga 2, 7032 Trondheim
<b>Byggeår</b>	2008
<b>Areal</b>	6097 m <sup>2</sup>
<b>Byggepris</b>	185 000 000,-
<b>Antall elever</b>	Ca. 385

Tabell 5-4 Tekniske spesifikasjoner ved Nardo skole (Eimhjellen, (2009) og TEK, (2007)).

<b>Tekniske spesifikasjoner Nardo skole</b>			
	Nardo skole	TEK 07	Lavenergi
<b>U-verdi yttervegg</b>	0,16 W/m <sup>2</sup> K	≤ 0,18 W/m <sup>2</sup> K	0,18 W/m <sup>2</sup> K <sup>a</sup>
<b>U-verdi tak</b>	0,13 W/m <sup>2</sup> K	≤ 0,13 W/m <sup>2</sup> K	0,15 W/m <sup>2</sup> K <sup>a</sup>
<b>U-verdi gulv</b>	0,13 W/m <sup>2</sup> K	≤ 0,15 W/m <sup>2</sup> K	0,13 W/m <sup>2</sup> K <sup>a</sup>
<b>U-verdi vindu</b>	1,1 W/m <sup>2</sup> K	≤ 1,2 W/m <sup>2</sup> K	≤ 1,2 W/m <sup>2</sup> K
<b>Normalisert kuldebroverdi Ψ''</b>	Ikke angitt	≤ 0,06 W/m <sup>2</sup> K	≤ 0,04 W/m <sup>2</sup> K
<b>Lekkasjetall n<sub>50</sub></b>	1,5 h <sup>-1</sup>	≤ 1,5 h <sup>-1</sup>	≤ 1,0 h <sup>-1</sup>
<b>Virkningsgrad varmegjenvinner</b>	80 %	≥ 70 %	≥ 70 %
<b>SFP-faktor ventilasjonsanlegg</b>	2,0 kW/(m <sup>3</sup> /s)	≤ 2,0 kW/(m <sup>3</sup> /s)	≤ 2,0 kW/(m <sup>3</sup> /s)

a - disse verdiene er eksempler på hvor lave U-verdier som skal til for å nå lavenergi standard og ikke krav i seg selv.

### 5.2.2 Klima i Trondheim

Trondheim ligger nær kysten i Trondheimsfjorden. Den nordlige beliggenheten og nærheten til kysten og Golfstrømmen påvirker klimaet og været i Trondheim. Klimaet er mildt og fuktig, og preges av å ligge i utkanten av vestavindsbeltet. Byen ligger innenfor temperert klimasone, men nær polarsirkelen. Den kalde luften fra nord, og de varmere luftmassene fra sør fører derfor til ustabil vær, og raske værendringer. Dette er typisk for områder som ligger langs polarfronten (trondheim.no, 2015). Årsmiddeltemperatur for Trondheim i perioden 1961-1990 er 4,8 °C (Klimadata Trondheim, 1990).

### 5.2.3 Tekniske anlegg

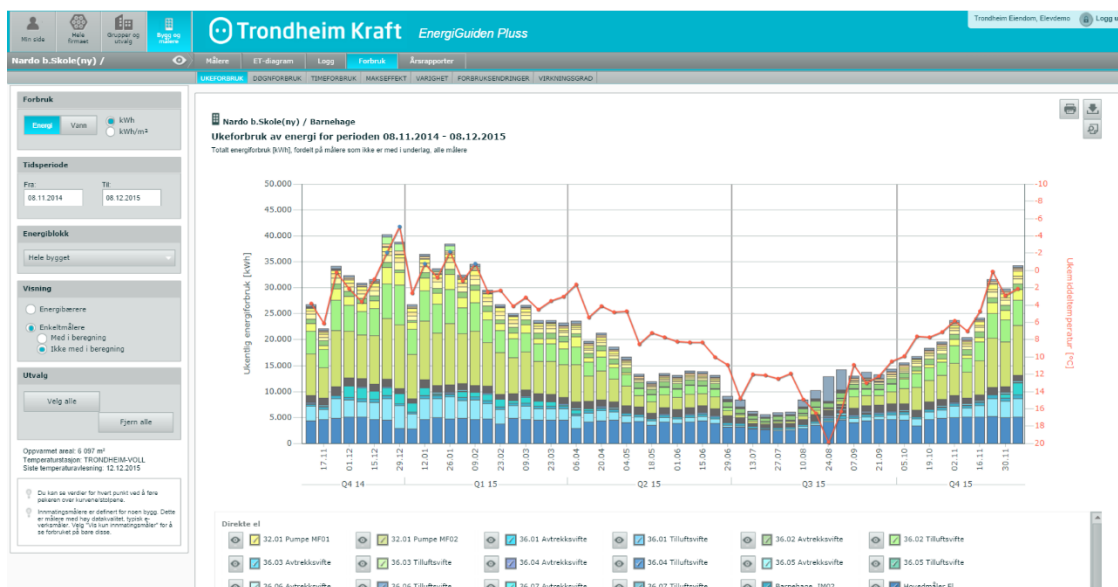
Oppvarmingsbehovet ved Nardo skole dekkes av en bergvarmepumpe og fjernvarme. Varmepumpen har 14 energibrønner. Varmen hentet av varmepumpen dekker grunnlasten for oppvarming av bygget, forvarming av tappevann, og til kjøling når det er behov for det i sommermånedene. Fjernvarme brukes som topplast, og for å sørge for at tappevannet når 70 – 80 °C, for å unngå legionella (Eimhjellen, 2009). Elektrisitet benyttes til varmekabler utendørs og i snøfeller til ventilasjonsanlegg (Hestad, 2010). Bygget varmes opp via et vannbårent

varmeanlegg. Det er gulvvarme i garderober og inngangsparti, mens det er benyttet radiatorer i oppholdsrommene (Eimhjellen, 2009).

Ventilasjonsystemet er oppdelt i soner, og har totalt seks luftbehandlingsanlegg til skoledelen. Det er balansert ventilasjon i alle klimaceller. I sekundære rom som toalett, garderober og lager, er det kun avtrekk. Det blir levert tilluft ved overstrømning av luft fra tiliggende rom. I de fleste soner er det omrøringsventilasjon og CAV (Constant Air Volume). I de større forsamlingslokalene som gymsal og amfi er det brukt fortrenningsventilasjon og VAV (Variable Air Volume) (Hestad, 2010).

### 5.2.4 Energioppfølgingsystem

Energioppfølgingsystemet på Nardo skole heter EnergiGuiden Pluss, er levert av Trondheim Kraft, og utviklet av Entro. Her loggføres levert energi og energibruk. Tilgangen til Nardo skoles EOS er gitt av Trondheim Kommune, og er en elevdemo. Med denne brukertilgangen er det ikke mulig å gjøre noen endringer i dataene, men det er full lesertilgang. EOS gjør det mulig å lage rapporter med forskjellig oppløsning på times-, døgn-, ukes-, måneds-, og årsnivå. For alle rapporter genereres det en graf som viser ønskede data. Grafene gir mye informasjon, da de er interaktive, slik at det er mulig å dra musepekeren over grafen og få ut ekstra informasjon. Det er ikke alltid mulig å laste ned tallmateriale til Excel. Dette er en svakhet ved dette EOS, da mye informasjon blir vanskelig å få i et nyttig format. Figur 5-8 viser typisk arbeidsvindu for EnergiGuiden Pluss.



Figur 5-8 Skjerm bilde EOS Nardo skole (EnergiGuiden Pluss, EOS Trondheim kommune, n.d.).

### 5.2.5 Målerstruktur

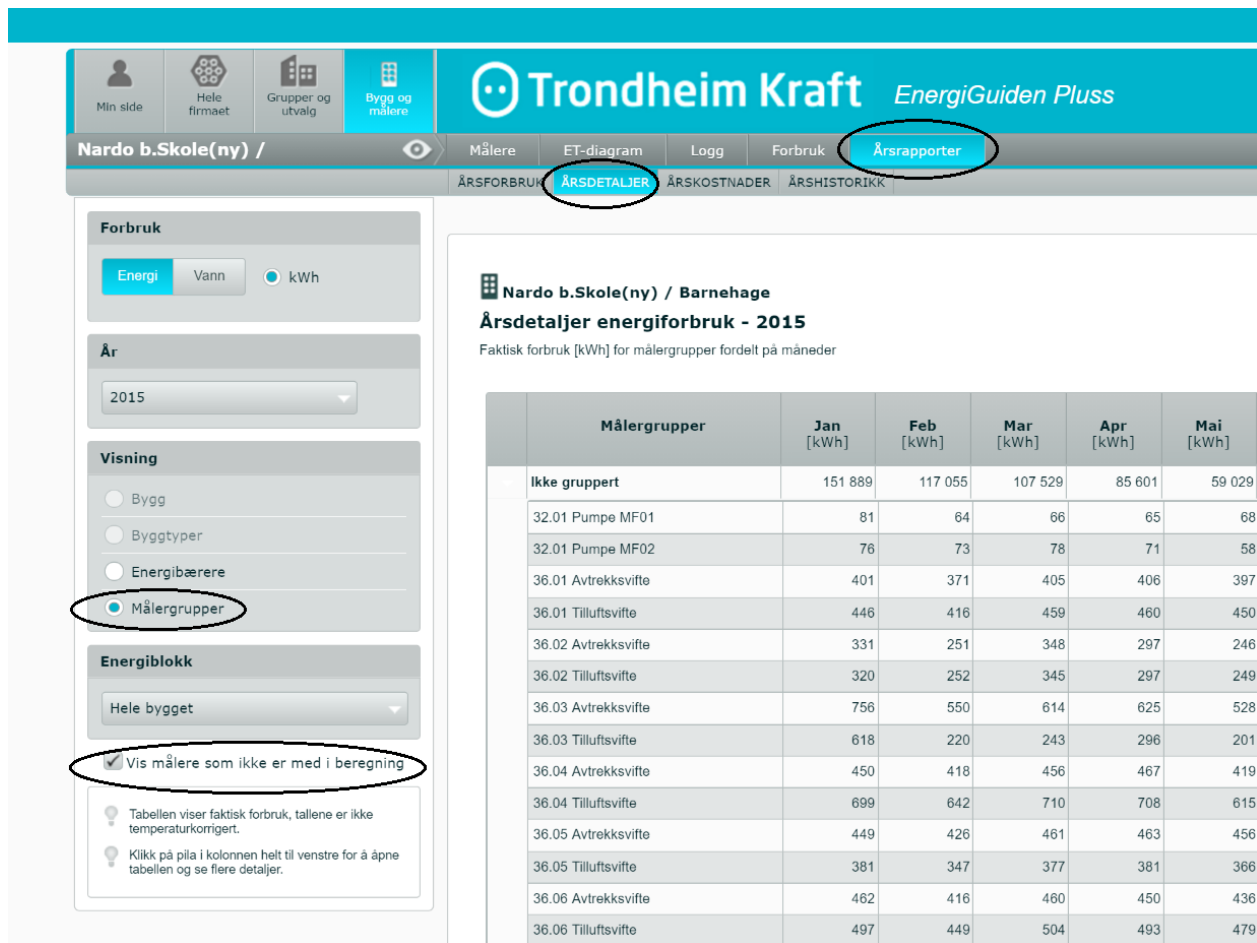
Nardo skole er godt instrumentert med målere som er koblet opp mot et sentralt driftskontrollanlegg og et energioppfølgingsystem. Målerstrukturen ved Nardo skole er ikke optimalt lagt opp med hensyn på å hente ut informasjon om energibruken på energipostnivå. Anlegget bærer tydelig preg

av at målerstrukturen er satt opp etter både termiske og elektriske kurser er lagt. Dermed er viktige energiposter vanskelig å skille ut fra øvrig energibruk. For eksempel er energibruk til belysning ikke skilt ut fra annen bruk av direkte elektrisitet. I tillegg er navnene på enkelte målere gitt i EOS forvirrende.

På grunn av omfattende målerfeil i EOS, SD-anlegg og VVS-tegninger viet Hestad et helt kapittel til gjennomgang av dette. Det er i denne masteroppgaven valgt å gi en forholdsvis grundig oppsummering av feilene funnet av Hestad i 2010, da det viser seg at mange av feilene ikke er utbedret per dags dato. Da Hestad jobbet med mastergraden sin var EOS tilgjengelig via EnergiGuiden, den har siden blitt oppdatert til EnergiGuiden Pluss. Med mindre annet er nevnt er innholdet i disse to sidene likt. Oppdateringen var hovedsakelig for å gjøre siden mer brukervennlig.

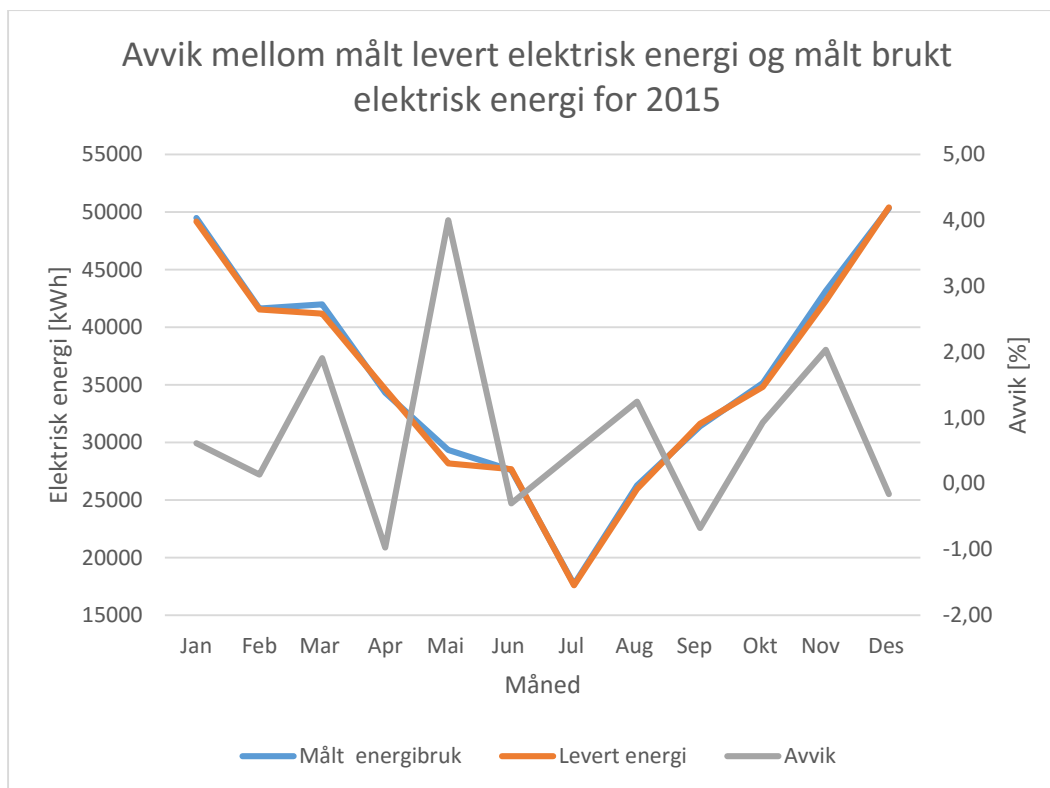
Hvis det på EnergiGuiden Pluss under fanen Årsrapporter, og så Årsdetaljer, hukes av for Målergrupper, og videre hukes av for *Vis målere som ikke er med i beregning* fås det opp noe som tilsynelatende er et energiregnskap. Se Figur 5-9 for hvor i EnergiGuiden Pluss man skal finne dette energiregnskapet. Oppløsningen kan settes til uke, måned eller kvartal. Hvilket år det hentes data fra velges i menyen til venstre.

Energiregnskapet er ukorrekt på flere områder. Spesielt er det posten *Hovedmåler El.* som skaper forvirring da denne overhodet ikke stemmer overens med levert elektrisk energi målt av Trondheim Energiverk (TEV) sin måler. Hestad tok kontakt med Entro, som har ansvar for EOS, og spurte hva avviket kunne skyldes, de foreslo at posten *Hovedmåler El.* i energiregnskapet gitt i Årsdetaljer addert med de resterende el-spesifikke energipostene som vifter og pumper kunne tilsvare levert energi målt av TEV. For enkelte uker stemte det godt, mens Hestad fant forholdsvis store avvik i andre uker. Total differanse i målt levert elektrisitet og målt elektrisk energibruk var på 80 000 kWh for måleperioden, med varighet på ett år.



Figur 5-9 Utsnitt fra EnergiGuiden Plus som viser Årsrapport (EnergiGuiden Plus, EOS Trondheim kommune, n.d.)

For å sjekke om avvikene Hestad fant fremdeles ble det her gjennomført en nullsumskontroll for elektrisk energibruk ved Nardo skole for kalenderåret 2015 for å undersøke om det fremdeles er avvik. I Figur 5-10 er avviket mellom målt levert elektrisk energi og målt el-spesifikk energibruk fremstilt. I denne figuren er samtlige el-spesifikke energiposter summert, det Entro foreslo kunne være løsningen. Avviket er på det meste opp mot 4 % på en måned, og varierer fra + 4,0 % til - 0,97 %. Hadde feilen ligget jevnt for høyt eller lavt, kunne det skyldes en kalibreringsfeil et sted, men siden variasjonene er ujevne skyldes det antageligvis noe annet. Totalt avvik for 2015 er ikke spesielt høyt, og ligger på + 0,76 %, eller 3246 kWh, men med hensyn på at dette er el-målere som skal ha høy nøyaktighet er likevel avviket høyt. Spesielt når energibruken undersøkes i høyere oppløsning enn fra år til år. I tillegg bemerkes det at energibruken målt av Nardo skole jevnt over er høyere enn målt levert energi av TEV. Det er ikke mulig å bruke mer elektrisitet enn det som faktisk er levert til bygget. Dette tyder på at det er noe galt i undermålerne på Nardo skole.

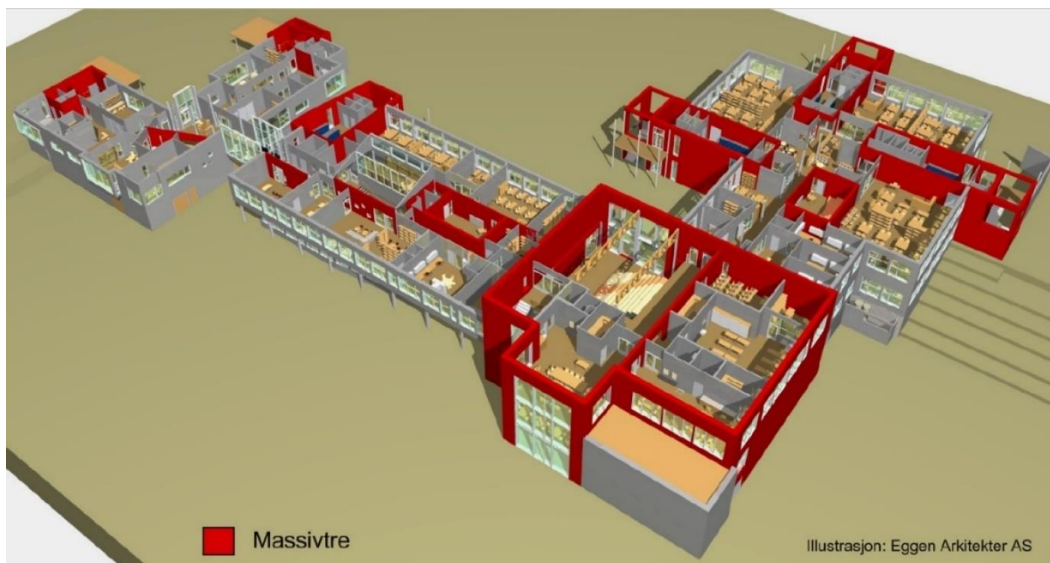


Figur 5-10 Avvik mellom målt levert elektrisk energi og målt brukt elektrisk energi for 2015

Oversikten over det tilsynelatende energiregnskapet gitt i EnergiGuiden Pluss summerer tilførsel og forbruk om hverandre. Dermed blir det vanskelig å summere energibruken korrekt, for å kunne få et klart bilde av hva energibruken faktisk er. Når det da i tillegg er avvik på undermålere slik at summene ikke kan sjekkes opp mot hovedmålerne for levert energi, blir det vanskelig å si noe fornuftig om energibruken. Hestad hadde i 2010 også tilgang på SD-anlegget, og hadde dermed noen ekstra holdepunkter da hun skulle kommentere energibruken ved Nardo skole. Det er likevel knyttet forholdsvis stor usikkerhet til dataene Hestad har analysert, og det er grunn til å betvile nøyaktigheten av dataene som lastes ned fra EOS for perioden 2011-2015.

### 5.2.6 Materialer og konstruksjon

Som nevnt innledningsvis er Nardo skole bygget med utstrakt bruk av massivtre og andre trematerialer. Trematerialene går igjen i både byggkonstruksjonene, kledning og interiør. Sökkelen er laget av betong med hulldekker. Første og andre etasje er konstruert av en kombinasjon av bærende massivtre og en konstruksjon med limtre i dragere og søyler, og massivtre i etasjeskillere og vegger. Totalt er omtrent 10 000 m<sup>2</sup> massivtre brukt i bygget (Eimhjellen, 2009). Figur 5-11 viser bruken av massivtre i rødt. Barnehagen er delen av bygningen øverst til venstre i figuren.



*Figur 5-11 Bruk av massivtre i Nardo skole og barnehage illustrasjon Eggen Arkitekter AS, gjengitt med tillatelse.*

Figur 5-12 viser et av fellesarealene på Nardo skole. Her kommer det tydelig frem hvordan trematerialer er utstrakt brukt innvendig på skolen.



*Figur 5-12 Fellesareal på Nardo skole. Arkitekt: Eggen Arkitekter Foto: synlig.no, gjengitt med tillatelse.*

### 5.2.7 Innemiljø ved Nardo skole

Eimhjellen undersøkte innemiljøet i sin masteroppgave, blant annet ved å gjennomføre intervjuer blant lærere på 5. og 6. trinn ved skolen, samt én lærer ved skolefritidsordningen på skolen. Eimhjellen hadde samtaler med rektor og driftsoperatør ved skolen om innemiljøet, og det ble gjennomført en spørreundersøkelse blant elevene på 5. og 6. trinn.

Det største problemet med inneklimate ved Nardo skole har ifølge Hestad vært knyttet til at det kan bli veldig varmt i enkelte av rommene på grunn av høy solinnstråling. Brukerne klaget på at solskjermingen hverken holder lyset eller varmen ute av klasserommet. Som en løsning på høy temperatur ble vinduene åpnet av brukerne for å bli kvitt overskuddsvarmen. Noen av klasserommene kan ha et overskudd av varme, selv om skolen totalt sett har et varmebehov. I tillegg oppdaget Hestad at vinduene i enkelte klasserom ble åpnet når det var et kjølebehov, men ikke lukket når solen flyttet seg på horisonten og ikke lenger forårsaket overtemperatur i rommet. Romoppvarmingen klarte å kompensere for varmetapet gjennom vinduet, slik at brukerne opplevde inneklimate som behagelig. Dermed vil varme som kunne blitt utnyttet av varmegjenvinneren dumpet ut gjennom vinduene, og det brukes mer energi enn nødvendig på romoppvarming og oppvarming av ventilasjonsluft (Hestad, 2010). Det foreslås at utvendige persienner kan være en løsning på problemet med solinnstråling (Eimhjellen, 2009).

Det var delte meninger om inneklimate ved skolen da Eimhjellen undersøkte dette i 2008/2009. Trinnarealene er like store, og luftmengdene som er tilført via ventilasjonsanlegget er også like store, mens forskjellen i personbelastning mellom 5. og 6. trinn er stor. I 5. trinn kan belastningen komme opp i 60 personer tilsammen, tre lærere og 57 elever. Mens det for 6. trinn er snakk om 43 personer på det meste, med to lærere og 41 elever. Lærerne på 6. trinn var jevnt over mer fornøyd med luftkvaliteten enn lærerne på 5. trinn. Da skolen nylig var tatt i bruk høsten 2008, slet mange med hodepine og kvalme som minnet om sjøsyke. Dette kan ha hatt noe med at skolen ble tatt i bruk kort tid etter ferdigstilling og at det fremdeles var gasser fra maling og lignende som ble avgitt fra materialene. Det kan også nevnes at luftfuktigheten i skolebygget har vært lav. Dette fremkommer fra klager fra brukerne om symptomer som tørr hud i ansiktet, tørre hender og en økning i allergiplager (Eimhjellen, 2009).

### 5.2.8 Evaluering av energibruk i 2009/2010

Dette kapitlet er hovedsakelig basert på Hestads masteroppgave. Da Hestad evaluerte energibruken ved Nardo skole var det både feilmerking og feilmåling på enkelte kurser. Dermed er det knyttet en god del usikkerhet til resultatene som Hestad kom frem til. Disse feilene i målerstrukturen ble det forsøkt tatt høyde for i beregninger og evalueringer av energibruken i bygget gjort av Hestad. Derfor er det likevel valgt å trekke ut generelle funn fra Hestads oppgave om hva som kan være årsaken til avvik mellom målt og beregnet energibruk ved Nardo skole.

Det er viktig å huske på at data som presenteres videre inkluderer en barnehage som har andre energikrav enn en skole. Barnehagen utgjør omtrent 550 m<sup>2</sup> i tillegg til at det er oppvarmet teknisk rom i etasjen under barnehagen som gjør at arealet kommer opp på cirka 1000 m<sup>2</sup>. Beregningsmetoder og fremgangsmåte for funnene blir ikke presentert i denne oppgaven, men kan finnes i Hestad (2010).

#### *Sammenligning av målt og beregnet energibruk 2009/2010*

Den totale energibruken ved Nardo skole ble funnet å stemme godt overens med beregnet energibruk. Hvis energibruken deles inn i energiposter er det derimot en god del avvik fra beregnende verdier. I Tabell 5-5 er korrigerede målte verdier sammenlignet med prosjektert energibruk av VVS Norplan og tredjeparts kontroll utført av Isocare AS. Tabellen oppgir energibruk for hele Nardo skole.

*Tabell 5-5 Sammenligning av målt energibruk med prosjektert energibruk fra rådgivende ingeniør VVS Norplan og tredjeparts kontroll Isocare AS (Hestad, 2010)*

Energipost	Målt		VVS Norplan		Isocare AS	
	[kWh/år]	[kWh/m <sup>2</sup> år]	[kWh/år]	[kWh/m <sup>2</sup> år]	[kWh/år]	[kWh/m <sup>2</sup> år]
<b>Romoppvarming</b>	221 393	36,8	65 520	10,9	183 906	30,6
<b>Ventilasjonsvarme</b>	63 190	10,5	157 500	26,2	107 923	18,0
<b>Varmtvann</b>	44 505	7,4	81 900	13,6	63 610	10,6
<b>Vifter</b>	57 170	9,5	115 920	19,3	100 722	16,8
<b>Belysning</b>	140 000	23,3	147 420	24,5	139 920	23,3
<b>Utstyr</b>	124 233	20,7	69 300	11,5	82 940	13,8
<b>Kjøling</b>	18 960	3,2	0	0	0	0
<b>Totalt</b>	669 451	111,4	637 560	106,1	679 021	113,0

De største avvikene er på behov for romoppvarming og oppvarming av ventilasjonsluft. Målt energibruk til romoppvarming er omtrent tre ganger høyere enn beregnet av VVS Norplan og omtrent 40 000 kWh høyere enn beregnet av Isocare AS. Beregnet behov for oppvarming av ventilasjonsluft er kraftig overdimensjonert i begge beregningene i forhold til målt forbruk. VVS Norplan bommer med nesten 100 000 kWh. Til ventilasjon har det blitt beregnet nesten dobbelt så høyt energibehov til vifter enn det skolen faktisk bruker. Skolen bruker mer elektrisitet



til utstyr enn det som ble beregnet under prosjektering, i snitt 38 % mer enn beregnet. Det er ikke en egen måler til belysning. Derfor ble energibehov til belysning basert på beregningen gjort av Isocare AS, slik at det var mulig å skille på energibehov til utstyr generelt og belysning.

#### ***Årsak til avvik mellom målt og beregnet energibruk ved Nardo skole og barnehage***

Datarommet ble ikke inkludert i beregningene i prosjekteringen og kjølebehovet for dette rommet ble derfor ikke tatt hensyn til. Det ble i ettertid installert en tørrkjøler over tak som bruker om lag 3600 kWh i året. Hadde bruken av datarommet blitt tatt hensyn til i beregningene kunne energibehovet til kjøling vært oppdaget og det kunne blitt planlagt å benytte seg av kjøling fra energibrønnene.

Lysstyringen ved skolen fungerer heller ikke optimalt, da bevegelsesensorene var svært sensitive. Dette førte til at belysning i hele fløyer skrudde seg på om noen bevegde seg gjennom gangen. Dette kunne blitt løst ved å lukke dørene inn til klasserommene som ikke var i bruk. I beregningene ble energibehovet til belysningen redusert med 20 % i henhold til NS 3031 på grunn av lysstyring, men når styringen ikke fungerer som tenkt er det nærliggende å tro at den reduksjonen i energibehov ikke er reell.

Det ble avdekket brukerfeil på avtrekket i kjøkkenet. Avtrekket har en timer som kan trekkes opp når det er behov for avtrekksvifter. Avtrekket ble trukket opp til maksimal tid som er 6 timer, selv om kjøkkenet ikke har driftstid på mer enn 3 timer hver dag. Hestad estimerer at *ekstra* energibruk som følge av dette kan komme opp i 9000 kWh/år.

Eksempelet nevnt i kapittel 5.2.7 med lufting grunnet overtemperatur kan potensielt føre til en økning i energibehov til oppvarming.



## 6 ENERGISIMULERINGSMODELL AV MARIENLYST SKOLE

---

I dette kapitlet presenteres hvordan modellen av Marienlyst skole laget i IDA ICE ble bygget opp, hvilke forenklinger som ble gjort og hvorfor. De verdiene som oppgis i dette kapitlet er de som er brukt i det som videre i denne oppgaven betegnes som basemodellen. Basemodellen er den modellen der energibruken er forsøkt tilpasset reell energibruk i skolebygget. I kapittel 9.2.1 presenteres resultatet fra basemodellen. I kapittel 9.3 presenteres beregning og resultater fra regresjonsanalyse, som baserer seg på 32 simuleringer.

Siden det kun var energibruken som skulle undersøkes i denne rapporten var det mulig å gjøre flere forenklinger enn hvis inn klimaet også skulle evalueres. Flere forenklinger som sammenslåing av flere klasserom vil ikke påvirke den totale energibruken nevneverdig, men gir et feil bilde av inn klimaet. Modellen ble vedlagt masteroppgaven som et digitalt vedlegg, se vedlegg 3.

### 6.1 GENERELT

Som grunnlag ble AutoCAD-filer (.dwg) mottatt fra arkitekt div.A Arkitekter benyttet. Plan-tegninger for 1., 2. og 3. etasje ble importert til IDA ICE.

Bygget ble orientert 330° slik at de forskjellige fasadene har riktig orientering i forhold til omgivelsene. Det er lagt inn en ekstra vegg som objekt på nordvestsiden av bygget for å representere fotballstadionet som eventuelt skaper skygge.

Arealet av bygget i modellen er 6165 m<sup>2</sup>. Dette er omtrent 289 m<sup>2</sup> mindre enn det faktiske bygget. Det er usikkert hvorfor det mangler så stort areal siden AutoCAD filene fra arkitekten ble benyttet og disse skal være korrekt skalert. For å løse problemet ble det valgt å gjøre alle sammenligninger videre i oppgaven med hensyn på spesifikk energi kWh/m<sup>2</sup>.

Klimafilen som ble benyttet for modellen er basert på NS 3031, og har blitt laget av Arnkell Petersen fra Erichsen & Horgen. Lokasjonen ble satt til Blindern, Oslo.

Det ble ikke tatt hensyn til at romoppvarming egentlig består av både en termisk kurs til gulvvarme og til takvarme. Det ble gjort fordi takvarme ikke var i bruk 2012-2013, og kun har vært benyttet i mindre grad de siste to årene.

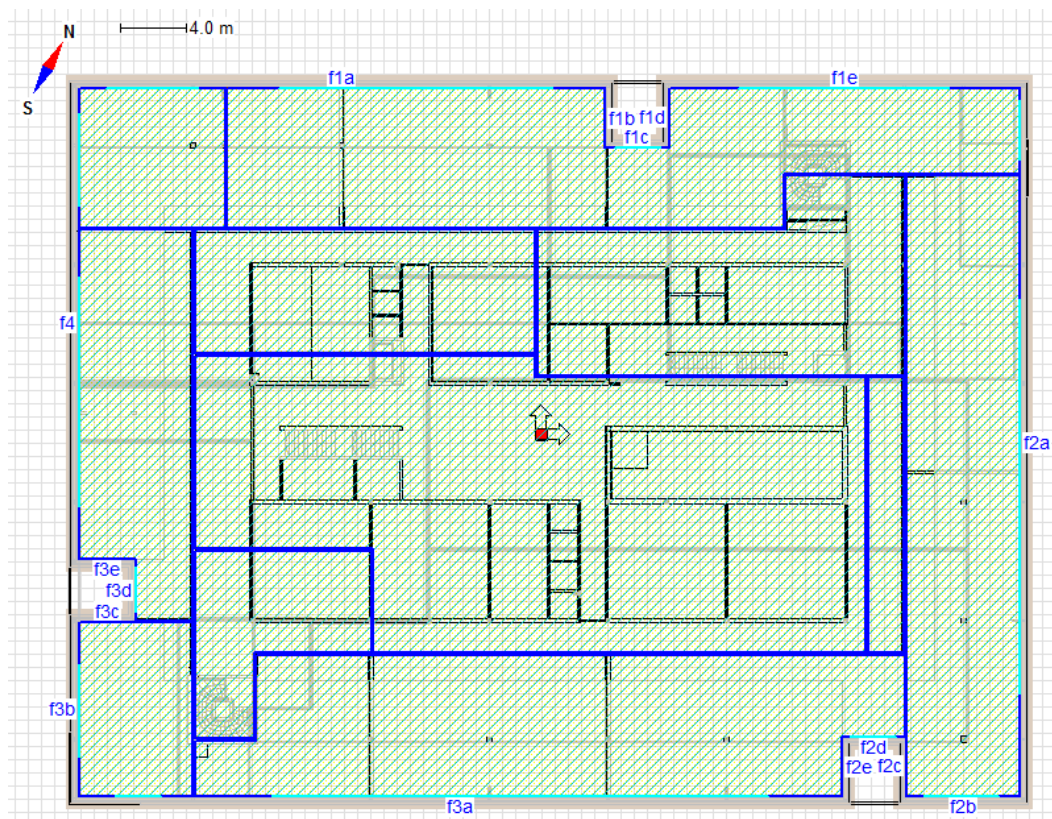
### 6.2 SONEINDELING

Selv om Marienlyst skole ved første øyekast ser ut til å ha en enkel geometri er det mange ulike rom i bygget, med ulik utforming og ulikt bruksmønster. Derfor ble det gjort en del forenklinger da sonene skulle lages. Soneinndelingen ble valgt med bakgrunn i noen kriterier: hvilke og hvor mange fasader de vender mot, type rom og hva slags interne belastninger de har. Modellen av skolen ble delt inn i 26 soner fordelt over de tre etasjene. Tabell 6-1 gir en oversikt over hvilke sonetyper som ble benyttet og antall av hver type.

Tabell 6-1 Oversikt type soner og hvor mange soner av hver type modellen inneholder.

Type sone	Antall soner av denne typen
<b>Klasserom</b>	10
<b>Amfi</b>	2
<b>Kontor</b>	5
<b>Teknisk rom</b>	2
<b>Samleareal</b>	3
<b>Wc</b>	3
<b>Auditorier</b>	1

Figur 6-1 viser hvordan sonene i 3.etasje på Marienlyst skole er delt inn. De blå heltrukne linjene er sonegrenser.

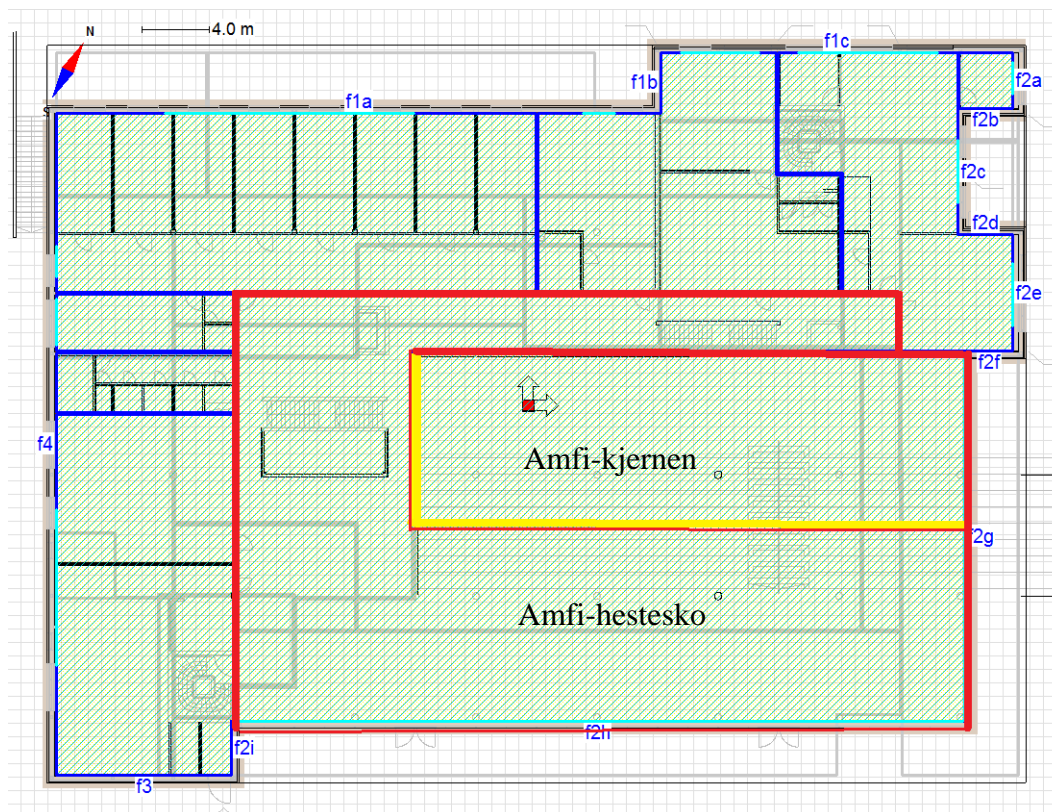


Figur 6-1 Soneinndeling i 3.etasje på Marienlyst skole laget i IDA ICE.

På skolen er de fleste klasserommene lokalisert i 3. etasje langs fasadene. Da sonene skulle deles inn ble klasserommene i så stor grad som mulig slått sammen til større soner. Klasserommene på hjørnene vendt mot sørvest og sørøst har vinduer på begge fasadene. På grunn av sterk solinnstråling i disse himmelretningene ble disse klasserommene lagt inn som egne soner. Dette er det ikke tatt hensyn til på nordsiden av bygget, da solinnstrålingen er betydelig lavere her og ikke

vil påvirke energibehovet i like stor grad. Sonene i midten av bygget er grupperom, auditorier, teknisk rom, toalett og et samleareal som inkluderer blant annet ganger, trapper og lagerrom. Med unntak av klasserommene ble byggets faktiske innvendige geometri ikke tatt hensyn til ved inndeling av soner. Samme fremgangsmåte ble benyttet i inndelingen av soner i 1. og 2. etasje.

En sone som måtte forenkles betydelig var *Amfiet* som strekker seg over to etasjer og har en komplisert geometri å modellere i IDA ICE. *Amfiet* ble delt inn i to soner, *Amfi-kjernen* og *Amfi-hestesko*. *Amfi-kjernen* ble modellert som en kubisk kjerne som strakk seg over to etasjer, mens *Amfi-hestesko* kun ble lagt i andre etasje rundt kjernen. Langs to av veggene i andre etasje mellom kjernen og hesteskoen ble det lagt inn en stor åpning som dekker hele veggene. Disse åpningene kan sees som to tykke gule linjer i Figur 6-2, sonegrensene er merket i rødt. Trappen i amfiet ble det ikke tatt hensyn til, annet enn at størrelsen på *Amfi-kjernen* ble tilpasset slik at volumet av rommet skal være nær korrekt.

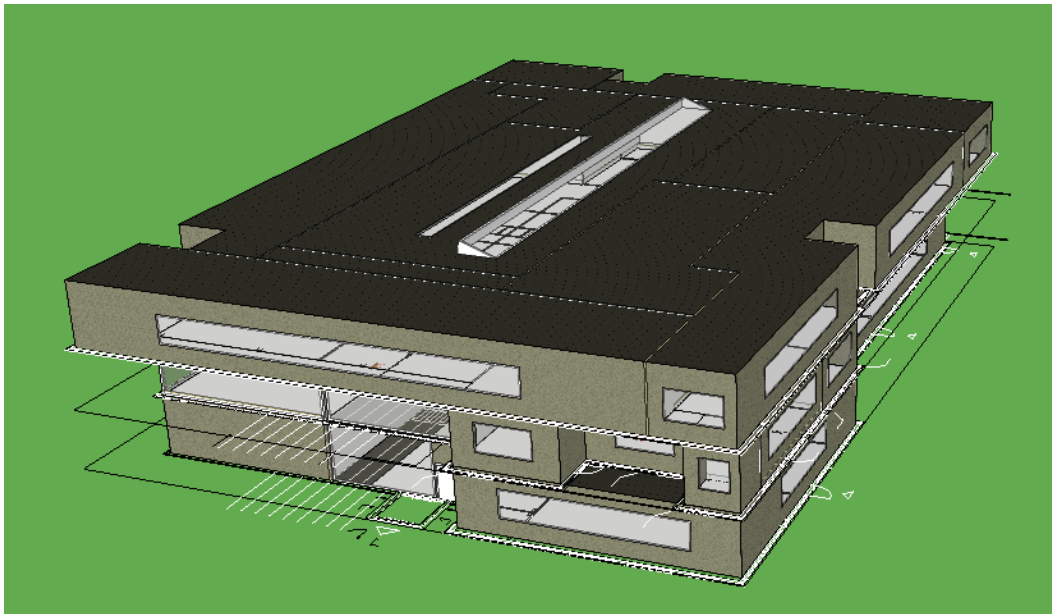


Figur 6-2 Skjerm bilde av 2. etasje som viser soneinndeling i IDA ICE modellen.

### 6.3 VINDUER OG DØRER

Vinduer ble lagt inn som ett vindu per fasade, per sone. Vinduene ble lagt inn med riktig høyde, og bredden tilsvarer summen av alle vinduene i den sonen på den fasaden. Unntaket er vinduer til balkonger da disse ble lagt inn for seg grunnet skygge fra overheng og sidevegger.

Marienlyst skole har en del takvinduer, både kupler og overlys. Det er ett stort overlys med helning på 30°. Dette ble lagt inn over samlearealet i 3. etasje, noe som stemmer forholdsvis godt overens med virkeligheten da overlyset er i gangen midt i bygget. I tillegg er det 10 kupler som ikke kan åpnes og 10 kupler med automatisk røykventilering som eventuelt kan benyttes til frikjøling. Kuplene er like store. Det ble gjort en forenkling der det ble valgt å ikke ta hensyn til at 10 av kuplene kan åpnes, da dette helst ikke skal brukes siden det er ønskelig å utnytte varmen i bygget om sommeren som varmekilde til nærvarmenettet og ikke dumpe det over tak. På sørvest- og nordvestfasaden av bygget i tilknytning til amfiet er hele veggen i glass. Figur 6-3 viser et skjermbilde av IDA ICE modellen i 3D. Det er nordvest- og nordøstfasaden som vises på skjermbildet. Dette gir et inntrykk av hvordan vinduene og takvinduene er plassert i modellen.



*Figur 6-3 3D-illustrasjon av Marienlyst skole fra IDA ICE.*

## 6.4 STANDARDVERDIER I IDA ICE

Standardverdier eller *Defaults* er en fane i IDA ICE der det kan legges inn verdier for de termiske egenskapene til: inner- og yttervegger, tak, gulv, vinduer og dører. Disse verdiene vil da bli benyttet når en legger inn de ulike elementene i modellen, med mindre annet spesifiseres. Det har ikke blitt gjort tilgjengelig informasjon om U-verdier på innvendige gulv og vegger, derfor ble informasjon om disse basert på snittegninger fra arkitekt.

For ytterveggen ble det valgt å lage en gjennomsnittlig yttervegg som ble brukt som yttervegg for hele modellen. Den har U-verdi på  $0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Innerveggene ble lagt inn for å sørge for at den termiske massen i modellen stemmer overens med virkeligheten. I tegningene fra arkitekt ble det oppgitt at veggene besto av gips og lett isolasjon. Innerveggene har U-verdi  $0,33 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Etasjeskillere ble basert på snittegninger mottatt fra arkitekt. De består av betong og gulvbelegg, IDA ICE beregnet da utfra de termiske egenskapene til disse materialene en U-verdi på  $0,98 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Taket har 530 mm lett isolasjon, og har en U-verdi på  $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Vinduene brukt på skolen ble funnet på bakgrunn av produktnummeret oppgitt av arkitekt. Vinduene brukt er hovedsakelig «Saint-Gobain D4-15 m. COOL-LITE 165+ar1». Ifølge informasjon oppgitt i tegninger for arkitekt stemte ikke U-verdien til vinduet helt overens med vinduet funnet igjen i databasen til IDA ICE. Derfor ble det lagret en revidert kopi av vinduet med U-verdi på  $0,82 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Gjennomsnittlig U-verdi inkluderer karmene, U-verdien til disse er derfor også satt til  $0,82 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Solskjerming er lagt inn med faktorer som skal multipliseres med g- og T-faktoren for vinduet. Faktorene som ble valgt var da henholdsvis 0,15 og 0,14. Det ble oppgitt lite informasjon om solskjermingen i FDV-dokumentasjonen gjort tilgjengelig av Drammen kommune. Disse verdiene ble derfor valgt på grunnlag av personlig kommunikasjon i et møte med Ivar Ørnes fra Erichsen & Horgen.

Under *Defaults* kan virkningsgrad for generatorer velges. Disse ble alle satt til 1 fordi modellen brukes til å undersøke netto energibruk, og ikke levert energi. Dette gjør det lettere å kunne sammenligne resultatene fra IDA ICE med et energibudsjett på formen anbefalt av NS 3031.

## 6.5 VENTILASJONSAGGREGAT

En forenkling som ble gjort med hensyn på ventilasjonsanlegget i modellen er at det i modellen kun er ett ventilasjonsaggregat. Dette er gjort fordi i IDA ICE kobles ikke ett ventilasjonsaggregat opp mot bestemte soner. Det er ukjent hvilke soner som betjenes av de seks forskjellige aggregatene som er på Marienlyst skole.

Frostsikring i varmegjenvinneren er satt til  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ . I ventilasjonsanlegg med roterende varmegjenvinnere og normal luftfuktighet er det ikke problemer med gjenfrysing selv ved kalde utetemperaturer ned mot  $-25\text{-}35 \text{ }^\circ\text{C}$  (Novakovic et al., 2007) (Tengesdal, 2012).

Krav til temperatur ved skoler er 19-26 °C (SINTEF Byggforsk, 2005). Tilluftstemperaturen er derfor satt til 16 °C om sommeren når det er kjølebehov, og 20 °C i oppvarmingsbehov.

## **6.6 VARMESENTRAL**

Det ble valgt å benytte standard varmesentral i IDA ICE med noen små justeringer. Ideelt sett skulle det ha blitt tatt hensyn til variasjoner i tur- og returtemperaturen i nærvarmenettet, men dette vil ikke påvirke energibruken i modellen nevneverdig og har derfor ikke blitt gjort.

## **6.7 SETTPUNKTER I SONENE**

Settpunkt for oppvarmingsbehov er satt til 20 °C, med unntak av de to tekniske rommene som er satt til 18 °C. Settpunkt for kjølebehovet er satt til 24 °C. Maksimal tillatt CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i sonene er satt til 800 ppm.



## 7 BEREGNINGER

---

I dette kapitlet gjennomgås hvilke beregninger som ble gjort for å komme frem til resultatene som presenteres i Kapittel 8. Begrunnelse av valg av parametere og verdier gis i dette kapitlet.

### 7.1 PARAMETERSTUDIE

Her presenteres hvilken metode som ble valgt for å analysere resultatene fra IDA ICE med hensyn på noen utvalgte parametere. Hvilke parametere som er valgt, og for hvilke verdier de analyseres begrunnes i dette kapitlet.

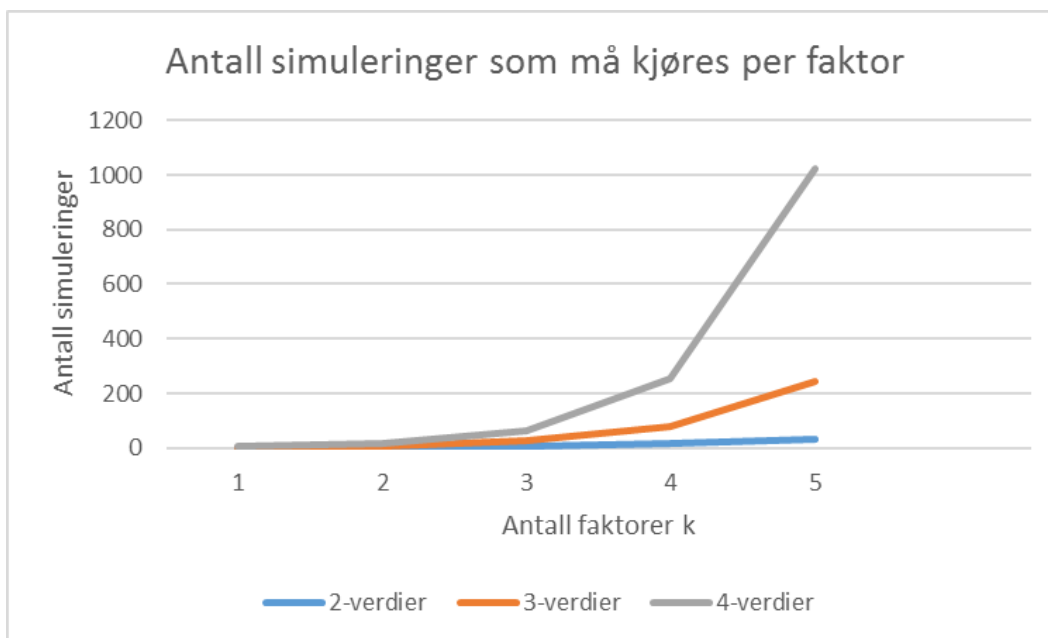
#### 7.1.1 Valg av metode

For å finne sammenhengen mellom variasjoner av verdien til forskjellige parametere i modellen laget i IDA ICE ble det valgt å gjennomføre en regresjonsanalyse. Metoden som ble valgt for å finne data å analysere var  $2^k$  faktoriale-eksperiment. Dette er et eksperimentelt design som tar for seg  $k$  parametere, med to verdier per parameter. En komplett analyse av et  $2^k$  faktorielt-eksperiment innebærer at hver verdi av en parameter skal kjøres med hver verdi av de andre parameterne. Dermed øker antall eksperimenter som må gjennomføres raskt når antall parametere som skal undersøkes øker (Walpole et al., 2012). Dette er illustrert i Tabell 7-1.

*Tabell 7-1 Antall  $2^k$  faktoriale-eksperiment som må kjøres med hensyn på antall faktorer som skal undersøkes.*

<b>ANTALL PARAMETERE</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>ANTALL EKSPERIMENT</b>	4	8	16	32	64	128	256	512	1024

Det ble valgt å bruke  $2^k$  faktoriale-eksperiment for å begrense antall simuleringer som måtte kjøres, på grunn av lang simuleringstid. Optimalt burde det vært flere verdier per faktor, slik at det kunne avdekkes om sammenhengen mellom de forskjellige faktorene er lineære eller ikke. Hvis tre eller fire verdier per faktor hadde blitt valgt ville antall simuleringer økt betydelig raskere per faktor, enn ved to verdier per faktor. Dette er illustrert i Figur 7-1. Det gjøres oppmerksom på at få observasjoner, eller eksperiment, gir høyere usikkerhet. Regresjonsanalysen i denne oppgaven vil derfor kun gi en indikasjon på hvordan de forskjellige parameterne påvirker hverandre.



Figur 7-1 Sammenligning av antall simuleringer som må kjøres dersom antall verdier per faktor økes.

### 7.1.2 Valg av parametere

Valgte parametere og verdier for regresjonsanalysen er gitt i Tabell 7-2. Verdiene som ble valgt skal, med unntak av minimum settpunkt for temperatur i sonen, representere ytterpunktene av det som regnes som normale verdier for de valgte parametere.

Tabell 7-2 Oversikt over parametere og verdier undersøkt i regresjonsanalysen.

Oversikt parametere undersøkt i regresjonsanalyse				
	Notasjon	Lav (0)	Høy (1)	Enhet
<b>Samtidighet tilstedeværelse</b>	Okk	60	100	[%]
<b>Tillatt CO<sub>2</sub>-konsentrasjon</b>	C	800	1000	[ppm]
<b>Virkningsgrad varmegjenvinner</b>	n	80	88	[%]
<b>Minimum settpunkttemperatur i soner</b>	T	20	21	[°C]
<b>Maksimal luftmengde til soner</b>	Û	2,5 (9)	4,5 (16)	[L/m <sup>2</sup> s]

Ved *samtidighet tilstedeværelse* menes hvor mange prosent av maksimal antatt personbelastning det er i sonene til enhver tid. Parameteren samtidighet tilstedeværelse har blitt valgt fordi dette er en parameter det ofte blir gjort feil antagelser om. Det ville derfor vært interessant å undersøke hvor sensitiv modellen er med hensyn på samtidighet i sonene. 100 % tilstedeværelse er i denne modellen basert på informasjon innhentet gjennom en samtale med avdelingsleder Geir Forbord ved Marienlyst skole. Han informerte om det han mente var typisk full belastning av de forskjellige rommene på skolen i driftstiden (Forbord, 2016). Nedre grense for analysen er satt til 60 %

samtidighet i rommet, og er bestemt på bakgrunn av en studie der samtidigheten ved 157 barneskoleklasser ble undersøkt. Det ble funnet at den gjennomsnittlige tilstedeværelsen var på om lag 60 % i løpet av driftstiden til ventilasjonsanlegget (Mysen og Schild, 2014).

*Maksimal tillatt CO<sub>2</sub>-konsentrasjon* ble valgt fordi det er en parameter som styres og kan endres under drift. Nedre grense på 800 ppm ble valgt fordi det er den verdien Drammen Eiendom har satt som maksimal tillatt CO<sub>2</sub>-konsentrasjon. Øvre grense på 1000 ppm ble valgt på bakgrunn av at det i TEK 10 stilles krav til at det skal tas hensyn til dimensjonerende forurensningsbelastning fra personer. Veiledningen til TEK 10 anbefaler at CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i rommet ikke overstiger uteluftens konsentrasjon med mer enn 500 ppm. Uteluft har vanligvis en CO<sub>2</sub>-konsentrasjon på rundt 400-450 ppm. Det ble rundet opp til 1000 ppm (dibk, 2011). I tillegg ble det funnet store avvik på målt og beregnet energibruk ved Marienlyst skole for ventilasjonsvarme (Hvinden, 2015). Dermed var det interessant å undersøke en av styringsparameterne til den behovsstyrte ventilasjonen. Notasjonen Okk er valgt som forkortelse for okkupasjon, altså hvor mange som befinner seg i sonen.

*Virkningsgrad på varmegjenvinner* ble valgt fordi det er en enkelt komponent som kan ha stor innvirkning på energibruken (Karlsson et al., 2007). Virkningsgraden på en roterende varmegjenvinner er som regel mellom 70 – 80 %. Ved små luftmengder kan virkningsgrader på over 90 % oppnås, men på grunn av økonomi anbefales det som regel aggregat som kan behandle større luftmengder (Novakovic et al., 2007). I bygninger med høye miljøambisjoner er ikke varmegjenvinnere med virkningsgrad på 80 % uvanlig. De to verdiene valgt til analysen er på bakgrunn av dette satt til 80 % og 88 %.

*Minimum settpunkttemperatur i sonene* ble valgt for videre undersøkelse da det er en parameter som ofte justeres etter bygget er satt i drift (Azar og Menassa, 2012b). Dermed kan antagelsene om ønsket innetemperatur under beregning av energibruk i prosjekteringen være feil. Minimum settpunkttemperatur i sonene ble satt til henholdsvis 20 og 21 °C i simuleringene. Det ble valgt å kun gjøre en liten endring i settpunkttemperaturen på 1 °C for å kunne se hvor stor påvirkning selv en liten endring kan ha på bygget, og hvor viktig det dermed er at denne parameteren følges opp under drift.

*Maksimal luftmengde til sonene* ble valgt fordi behovet for tilluft påvirkes av blant annet personbelastningen i sonene, og dermed settpunkt for maksimal tillatt CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i rommet. Det kunne dermed tenkes at maksimal tilluftsmengde kunne ha innvirkning på energibruken, noe det var ønskelig å undersøke nærmere. Verdien for luftmengdene ble bestemt med bakgrunn i beregningsmetoden beskrevet i Byggforskserien 421.505 Krav til innemiljøet i yrkes- og servicebygninger. Den tar hensyn til person- og materialbelastning. I klasserommene på Marienlyst skole er det i sonen med høyest personbelastning i snitt 0,35 pers/m<sup>2</sup>. Det ble antatt at det er benyttet lavemitterende materialer i skolen. Da høy og lav verdi for luftmengde skulle bestemmes ble det tatt utgangspunkt i å falle innenfor det som kalles klasse A og C, som tillater henholdsvis 15 % og 30 % andel misfornøyde personer. Avrundede verdier ble da 4,5 L/m<sup>2</sup>s og 2,5 L/m<sup>2</sup>s. (SINTEF Byggforsk, 2000)

## 7.2 TEMPERATURKORRIGERING

For å kunne temperaturkorrigere dataene måtte  $T_{\text{base}}$  for skolene bestemmes. I Dokka og Grini (2013) er det beregnet basetemperaturer for forskjellige varmetekniske standarder, de er oppgitt i Tabell 7-3. Siden Marienlyst skole er definert som passivhus er  $T_{\text{base}}$  satt til 9 °C. Nardo skole havner et sted mellom passivhus- og TEK 10-nivå fordi det er en lavenergiskole. Da den varmetekniske standarden til Nardo skole ble sammenlignet opp mot passivhus og TEK 10, ble det funnet at den var omtrent et gjennomsnitt av passivhus- og TEK 10-nivå. Dermed ble det valgt å sette  $T_{\text{base}}$  til 11 °C for Nardo skole.

*Tabell 7-3 Beregnet basetemperatur for ulike varmetekniske standarder (Dokka og Grini, 2013).*

Varmeteknisk standard på bygget	$T_{\text{base}}$
Passivhus-nivå	9 °C
TEK 10-nivå	13 °C
TEK 97-nivå	15 °C
TEK 87-nivå eller eldre	17 °C

For å finne reell gjennomsnittlig månedstemperatur,  $T_{e, \text{reell}}$ , for Marienlyst skole ble det valgt å bruke gjennomsnittlig månedstemperatur som er oppgitt i energioppfølgingsystemet. Gjennomsnittlig månedstemperatur for 2012-2015 er presentert i Tabell 7-4.

*Tabell 7-4 Målt utetemperatur ved Marienlyst skole 2012-2015 (EvoTek, EOS Drammen kommune, n.d.).*

Måned	2012	2013	2014	2015
Januar	-2,6	-6,6	-2,4	-0,5
Februar	-2,1	-4,3	1,7	-0,1
Mars	5,4	-3,4	4,0	3,1
April	5,2	4,0	7,6	7,2
Mai	13,0	12,8	13,6	9,8
Juni	15,1	16,7	17,2	15,9
Juli	17,5	19,6	21,6	17,5
August	16,4	16,5	16,5	16,5
September	11,2	11,4	12,5	12,0
Oktober	4,7	6,6	8,5	6,5
November	2,9	1,4	3,9	1,9
Desember	-6,0	1,1	-2,6	0,9

For Nardo skole ble temperaturdata fra energioppfølgingsystemet benyttet. Disse stammer fra en værstasjon på Voll, omtrent 2,6 km unna. Gjennomsnittlig månedstemperatur for 2010-2015 er oppgitt i Tabell 7-5.

Tabell 7-5 Målt utetemperatur Nardo skole 2010-2015 (EnergiGuiden Pluss, EOS Trondheim kommune, n.d.).

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Januar</b>	-7,0	-0,3	-1,9	-3,8	-2,3	0,1
<b>Februar</b>	-5,7	-2,5	-0,6	-2,6	3,7	1,7
<b>Mars</b>	-0,1	1,1	3,6	-2,7	3,4	3,5
<b>April</b>	4,5	7,0	2,8	3,6	5,7	4,3
<b>Mai</b>	7,4	9,7	7,9	11,9	9,5	7,5
<b>Juni</b>	10,4	13,3	11,0	12,5	12,0	9,6
<b>Juli</b>	15,3	14,8	13,3	14,2	19,1	12,8
<b>August</b>	14,5	14,4	13,3	13,8	15,0	16,4
<b>September</b>	9,9	11,7	8,7	11,0	11,5	11,5
<b>Oktober</b>	6,3	7,2	4,0	5,9	7,4	7,3
<b>November</b>	-3,9	5,1	3,0	2,5	3,4	3,7
<b>Desember</b>	-7,3	0,4	-5,4	2,5	-0,2	2,3

For normert temperatur,  $T_{e, norm}$ , ble det valgt å bruke standard referanseklima for Oslo, oppgitt i NS 3031, for begge skolene (Standard Norge, 2014). Blant annet for å gjøre det enklere å sammenligne måledata med resultater fra simuleringene gjort i IDA ICE da standard referanseklima også ble benyttet der. Utetemperatur for standard referanseklima er presentert i Tabell 7-6.

Tabell 7-6 Utetemperatur oppgitt for referanseklima Oslo. Basert på tabell M.1 i NS 3031 (Standard Norge, 2014).

Måned	Utetemperatur
<b>Januar</b>	-3,7
<b>Februar</b>	-4,8
<b>Mars</b>	-0,5
<b>April</b>	4,8
<b>Mai</b>	11,7
<b>Juni</b>	16,5
<b>Juli</b>	17,5
<b>August</b>	16,9
<b>September</b>	11,5
<b>Oktober</b>	6,4
<b>November</b>	0,5
<b>Desember</b>	-2,5

Temperaturkorrigeringsfaktoren er beregnet ved bruk av formel (2) i kapittel 3.3.2. Resultatene er presentert i Tabell 7-7 for Marienlyst skole og Tabell 7-8 for Nardo skole.

*Tabell 7-7 Temperaturkorrigeringsfaktorer for Marienlyst skole 2012-2015.*

<b>Temperaturkorrigeringsfaktor, <math>F_T</math>, for Marienlyst skole</b>				
<b>Måned</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>
<b>Januar</b>	0,91	1,23	0,89	0,74
<b>Februar</b>	0,80	0,96	0,53	0,66
<b>Mars</b>	0,38	1,30	0,52	0,62
<b>April</b>	0,90	1,19	0,33	0,43
<b>Mai</b>	1	1	1	1
<b>Juni</b>	1	1	1	1
<b>Juli</b>	1	1	1	1
<b>August</b>	1	1	1	1
<b>September</b>	1	1	1	1
<b>Oktober</b>	1,66	0,93	1	0,97
<b>November</b>	0,72	0,89	0,60	0,83
<b>Desember</b>	1,31	0,68	1,01	0,70

Av korreksjonsfaktorene i Tabell 7-7 vises det at med unntak av vintersesongen 2012/2013 har de siste fire årene i Drammen jevnt over vært mildere enn oppgitt referanseklima. Dette kan leses av at korreksjonsfaktoren er mindre enn én.

*Tabell 7-8 Temperaturkorrigeringsfaktor for Nardo skole 2010-2015.*

<b>Temperaturkorrigeringsfaktor, <math>F_T</math>, for Nardo skole</b>						
<b>Måned</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>
<b>Januar</b>	1,22	0,77	0,88	1,01	0,90	0,74
<b>Februar</b>	1,06	0,85	0,73	0,86	0,46	0,59
<b>Mars</b>	0,97	0,86	0,64	1,19	0,66	0,65
<b>April</b>	1,05	0,65	1,32	1,19	0,85	1,08
<b>Mai</b>	1	1	1	1	1	1
<b>Juni</b>	1	1	1	1	1	1
<b>Juli</b>	1	1	1	1	1	1
<b>August</b>	1	1	1	1	1	1
<b>September</b>	1	1	1	1	1	1
<b>Oktober</b>	1,02	0,83	1,52	1,11	0,78	0,80
<b>November</b>	1,42	0,56	0,76	0,81	0,72	0,70
<b>Desember</b>	1,36	0,79	1,21	0,63	0,83	0,64

I Trondheim var 2010 er spesielt kaldt år, med korreksjonsfaktorer større enn én som vist i Tabell 7-8 for alle måneder utenom mars. Ellers har det de siste fem årene jevnt over vært mildt.

### **7.3 VIRKNINGSGRADKORRIGERING**

Bestemmelse av systemvirkningsgraden for skolene er avhengig av en omfattende målerstruktur. Ved både Marienlyst skole og Nardo skole er alle målerne til de termiske kursene plassert i varmesentralen, differansen mellom tur- og returtemperatur brukes for å beregne hvor mye varmeenergi som er avgitt i kursen. Målerstrukturen er ikke lagt opp til at det er mulig å undersøke hva som er faktisk brukt energi, og hva som eventuelt er tap.





## 8 DATA FRA ENERGIOPPFØLGINGSSYSTEM

For Marienlyst skole ble det valgt å se på data for årene 2012-2015. Etter samtale med Geir Andersen ved Drammen kommune kom det frem at det i løpet av de første par driftsårene var en del innregulering som var nødvendig. Dermed vil ikke data fra 2010 – 2011 være representative for energibruken ved Marienlyst skole, og ble derfor utelatt fra videre analyse.

For Nardo skole ble det sett på data fra 2010 og frem til 2015 for å sammenligne om det har vært endringer i energibruken fra da Hestad undersøkte skolen i masteroppgaven sin i 2010. Dersom energibruken i stor grad følger samme kurve som da hun undersøkte skolen er det mulig å anta at de avvikene mellom målt og beregnet energibruk som ble funnet da er de samme som nå.

### 8.1 ENERGI BRUK VED MARIENLYST SKOLE

Måledata som er temperaturavhengig fra energioppfølgningssystemet som presenteres i dette kapitlet har blitt korrigert med hensyn på temperaturkorrigeringsfaktorene oppgitt i Tabell 7-7. Data fra energioppfølgningssystemet ble gjort om til spesifikk energibruk for å kunne sammenligne dataene med resultater fra simuleringer gjort i IDA ICE, da modellen har et annet gulvareal enn den faktiske skolen.

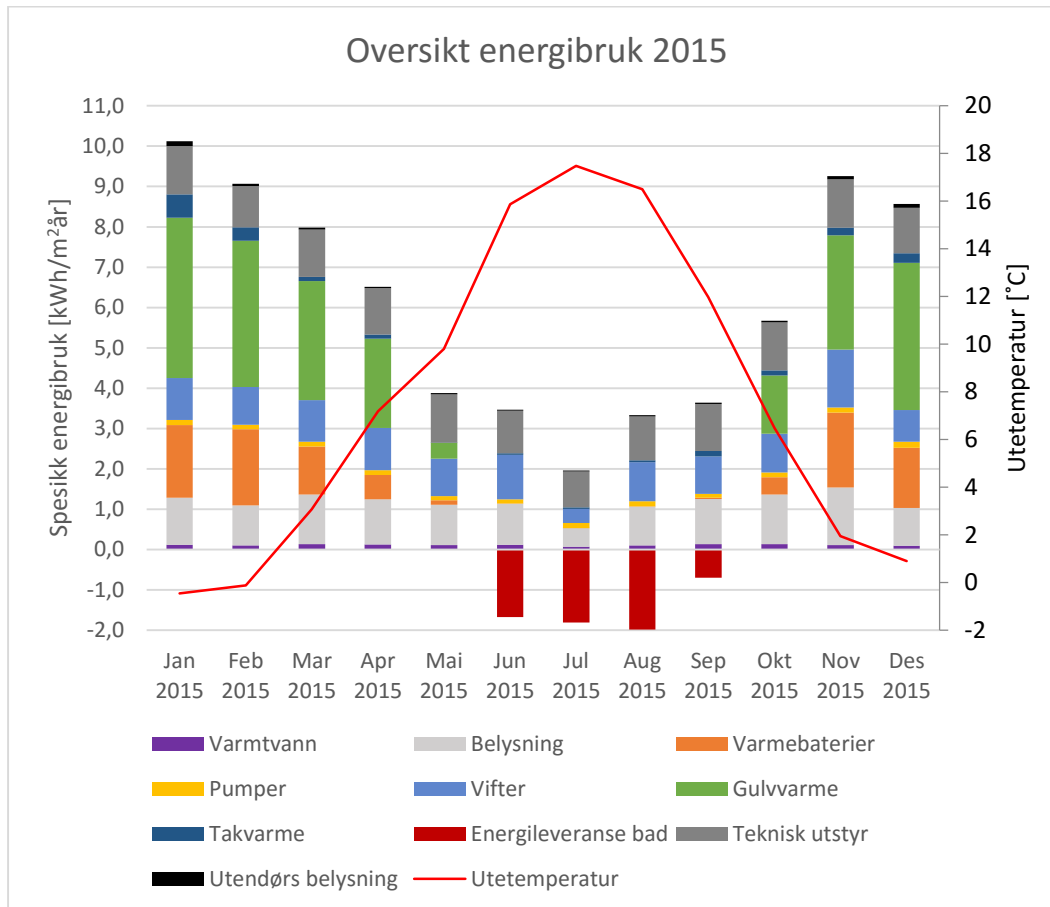
#### 8.1.1 Generelt om energibruk ved Marienlyst skole

I Tabell 8-1 presenteres den spesifikke årlige energibruken ved Marienlyst skole inndelt i energiposter. Romkjøling er holdt utenfor selve energiregnskapet fordi det ikke tilføres annet enn pumpeenergi for å kjøle bygget. Det er ikke mulig å si nøyaktig hvor mye energibruk som går til drift av pumper til gulvkjøling.

*Tabell 8-1 Spesifikk temperaturkorrigert energibruk ved Marienlyst skole 2012-2015.*

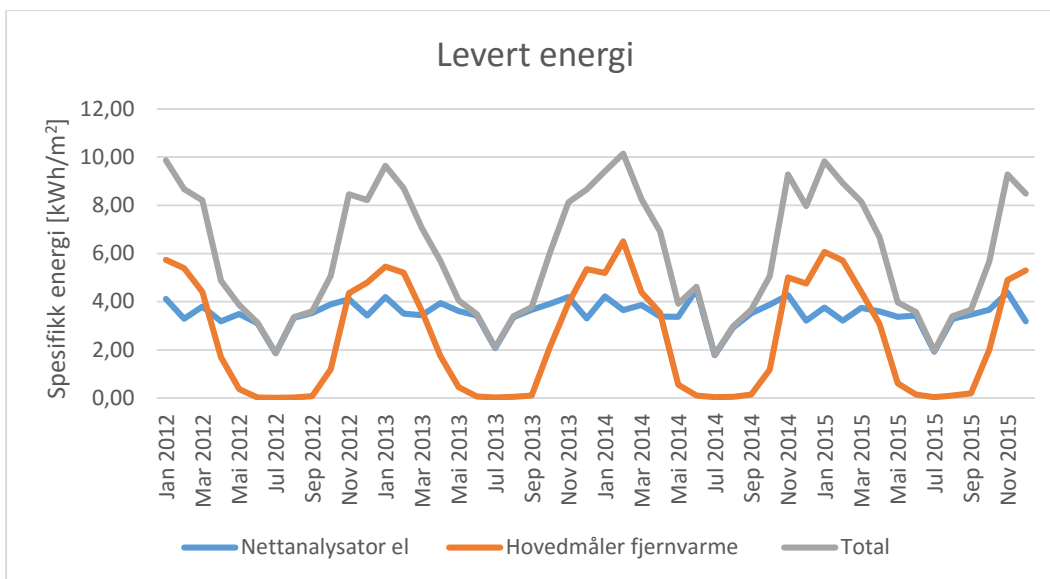
<b>Energipost</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	
<b>Romoppvarming</b>	20,2	19,5	20,3	23,0	[kWh/m <sup>2</sup> ]
<b>Ventilasjonsvarme</b>	7,0	7,8	9,9	9,4	[kWh/m <sup>2</sup> ]
<b>Varmtvann</b>	2,5	2,8	2,2	1,3	[kWh/m <sup>2</sup> ]
<b>Vifter</b>	10,6	11,9	12,6	11,5	[kWh/m <sup>2</sup> ]
<b>Pumper</b>	1,5	1,6	1,5	1,4	[kWh/m <sup>2</sup> ]
<b>Belysning</b>	12,2	11,9	12,2	12,7	[kWh/m <sup>2</sup> ]
<b>Teknisk utstyr</b>	13,8	13,7	13,0	13,5	[kWh/m <sup>2</sup> ]
<b>Total netto</b>	67,9	69,1	71,8	72,8	[kWh/m <sup>2</sup> ]
<b>Romkjøling</b>	-4,6	-7,9	-5,4	-6,2	[kWh/m <sup>2</sup> ]
<b>Utendørsbelysning</b>	0,5	0,7	1,0	0,6	[kWh/m <sup>2</sup> ]

Figur 8-1 viser den spesifikke energibruken for året 2015. Det ble valgt å presentere energibruken for ett år, da det gir et inntrykk av størrelsen på de forskjellige energipostene i forhold til hverandre over året. Energiposten *energileveranse bad* tilsvare romkjøling og er tatt med her for å vise størrelsesorden på hvor mye tilgjengelig varme som kan hentes ut av bygget.



Figur 8-1 Oversikt over årlig energibruk for 2015.

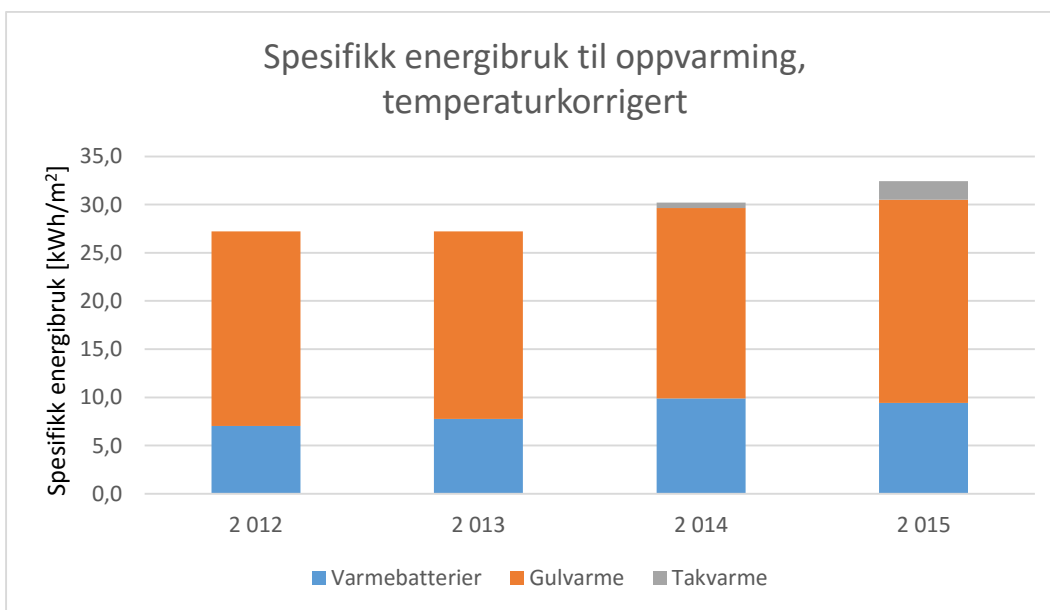
Levert energi til skolen er presentert i Figur 8-2. I sommermånedene er energileveransen fra fjernvarme lav, og ligger rundt 0,025 kWh/m<sup>2</sup> per måned. Den lille energibruken kan være brukt til forvarming av varmtvann. Dette støttes opp av at energibruken i måleren *Hovedstokk varmeanlegg* er tilnærmet lik null i samme periode. Avviket mellom målerne *Fjernvarme* og *Hovedstokk varmeanlegg* ligger mellom 80 – 100 % i sommermånedene. Romkjøling er ikke tatt med, fordi det ikke er energi som leveres til skolen, men heller hentes fra skolen derfor kan kjølingen anses som «gratis». Levert energi til skolen består i sommermånedene hovedsakelig av elektrisitet. Det kan sees av at linjen for total energibruk sammenfaller med linjen for elektrisk energi i sommermånedene. Levert fjernvarme til bygget har økt de to siste årene, fra 28,1 kWh/m<sup>2</sup>år i 2012 og 2013 til 32,6 kWh/m<sup>2</sup>år i 2015. Levert elektrisitet holder seg forholdsvis jevnt, med små variasjoner på maksimalt 1,5 kWh/m<sup>2</sup>år.



Figur 8-2 Levert energi til Marienlyst skole 2012-2015.

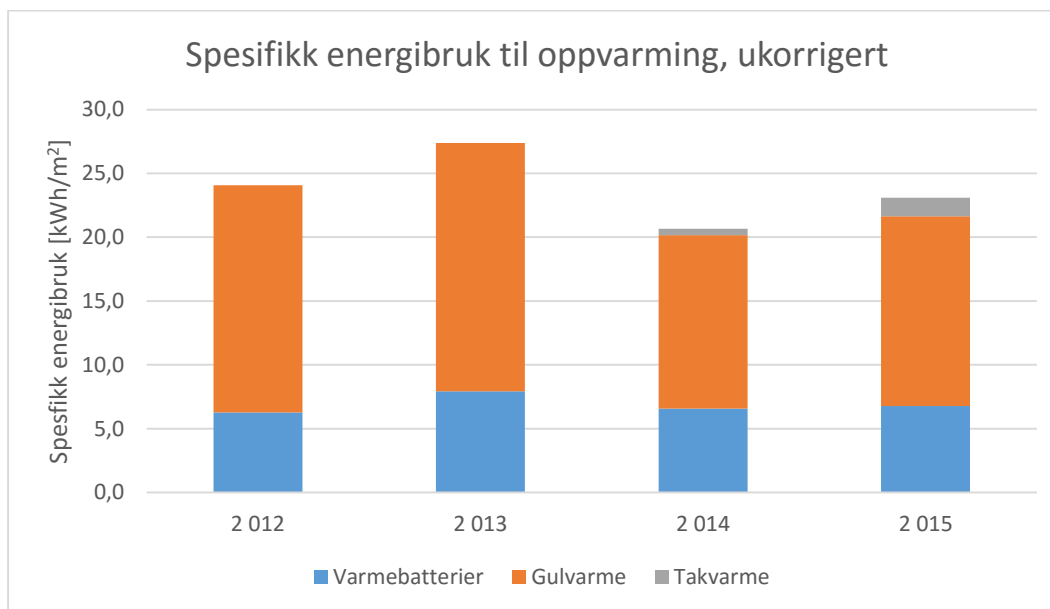
### 8.1.2 Energibruk oppvarming

Figur 8-3 viser at den temperaturkorrigerte energibruken til oppvarmingsformål ved Marienlyst skole øker litt fra år til år fra 2012 og frem til 2015. Energibruken er høyest i 2015. Det kan sees at takvarme bidrar med en del av energibruken, den bidrar med 1,9 kWh/m<sup>2</sup> i 2015.



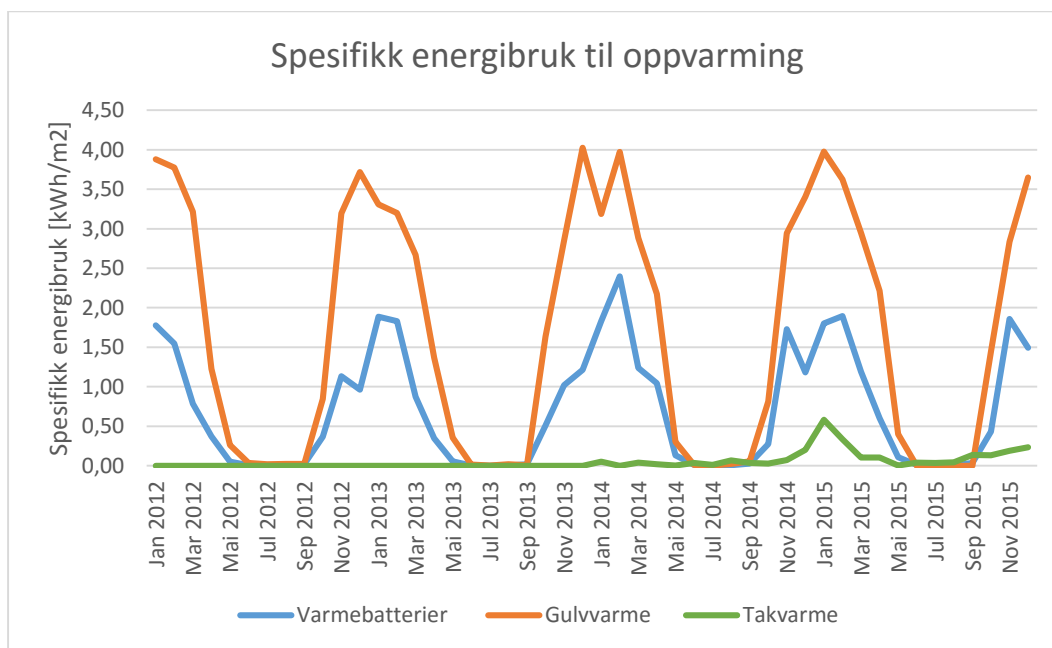
Figur 8-3 Total temperaturkorrigert spesifikk energibruk til oppvarmingsformål 2012-2015 ved Marienlyst skole.

De ukorrigerede måledataene for energibruk til oppvarmingsformål viser en annen utvikling, se Figur 8-4. Da kommer det frem en tydelig reduksjon i energibruken fra 2013 til 2014. Ut i fra temperaturkorrigeringsfaktorene i Tabell 7-7 kan det sees at våren 2013 var kaldere enn normalt, mens hele 2014 og spesielt våren 2014 var mild i forhold til normert klima.



Figur 8-4 Ukorrigert spesifikk energibruk til oppvarming ved Marienlyst skole 2012-2015.

Av Figur 8-5 kan det sees at maksimal spesifikk energibruk til gulvvarme er jevn fra år til år på cirka 4 kWh/m<sup>2</sup> per måned med høyt energibruk. Det er noe større variasjon for energi til varmebatterier.



Figur 8-5 Spesifikk energibruk til oppvarming Marienlyst skole.

### 8.1.3 Varmt tappevann

Måleren VVB 432.1 (1) er en el-måler. Ifølge drift skal varmt tappevann på bygget forvarmes av termisk energi fra nærvarmenettet. På grunn av målerstrukturen beskrevet i kapittel 5.1.4 kan energibruken til forvarming av varmt tappevann beregnes ved å finne differansen mellom måleren *Fjernvarme* og måleren *Hovedstokk varmeanlegg*. Energien beregnet på denne måten er det derimot ikke mulig å finne i energiregnskapet. Altså er ikke forvarmingen av varmt tappevann inkludert i energiregnskapet. Energibruk som potensielt ikke er tatt hensyn til i energiregnskapet er vist i Tabell 8-2. Det er valgt å oppgi månedsverdiene i Tabell 8-2 i kWh i stedet for spesifikk energi fordi det er såpass lave verdier.

Tabell 8-2 Avvik mellom Fjernvarme og Hovedstokk varmeanlegg oppgitt i kWh.

	<b>2 012</b>	<b>2 013</b>	<b>2014</b>	<b>2 015</b>
<b>Januar</b>	760	2 030	1 370	1720
<b>Februar</b>	400	1 270	930	1160
<b>Mars</b>	960	1 300	1 340	1580
<b>April</b>	590	830	960	1130
<b>Mai</b>	410	600	930	860
<b>Juni</b>	140	400	560	890
<b>Juli</b>	80	160	210	210
<b>August</b>	120	300	260	630
<b>September</b>	380	590	830	970
<b>Oktober</b>	450	690	1 300	1440
<b>November</b>	740	1 040	1 830	1740
<b>Desember</b>	1 620	1 270	1 600	1030
<b>Total energibruk</b>	6 650	10 480	12 120	13360
<b>Total spesifikk energibruk [kWh/m<sup>2</sup>]</b>	1,0	1,6	1,9	2,1

## 8.2 ENERGIBRUK VED NARDO SKOLE

Som forklart tidligere i oppgaven er gjennomgangen av data fra energioppfølgingsystemet til Nardo skole forenklet. Det var vanskelig å skille på om energien ble brukt på skolen eller barnehagen. Derfor har hele Nardo skole og barnehage blitt sett på under ett. Måledata er korrigert med hensyn på temperaturkorrigeringsfaktorene oppgitt i Tabell 7-8.

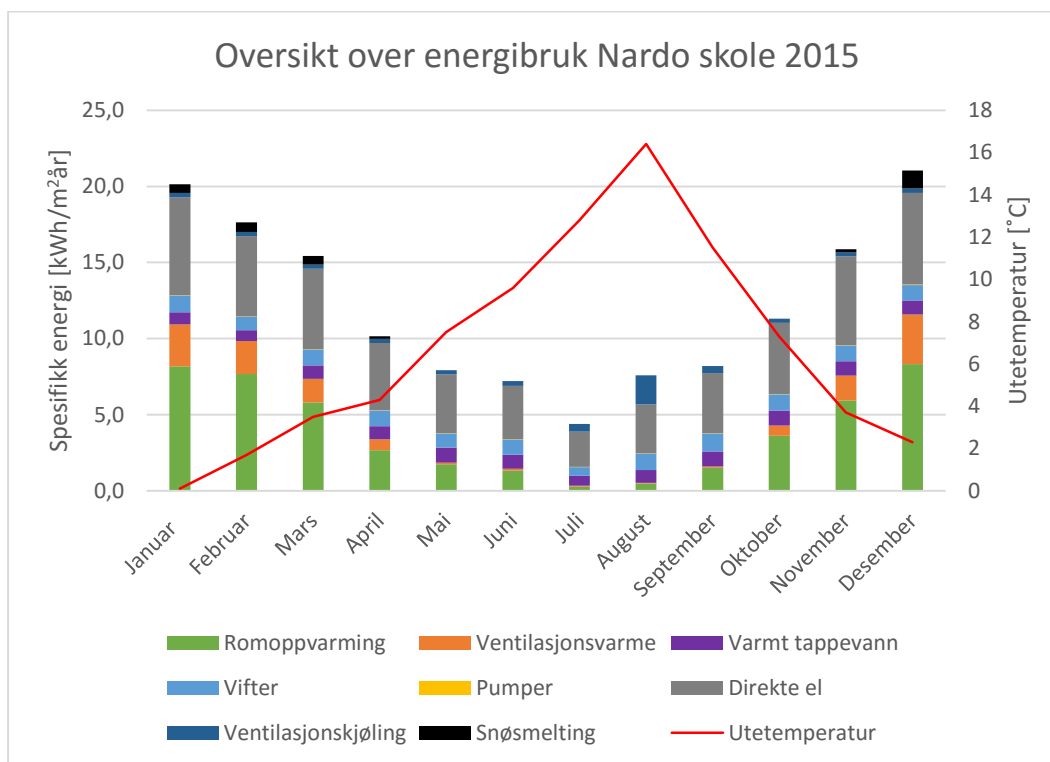
### 8.2.1 Generelt om energibruk ved Nardo skole

Energibruken ved Nardo skole delt inn i energiposter og oppgitt i spesifikk energi, er oppgitt i Tabell 8-3. Det er ikke en egen energipost for belysning, da det ikke finnes egne målere for dette på skolen. Teknisk utstyr omfatter i dette energiregnskapet all bruk av direkte elektrisitet utenom elektrisitet til vifter og pumper.

Tabell 8-3 Energibruk for Nardo skole 2010-2015.

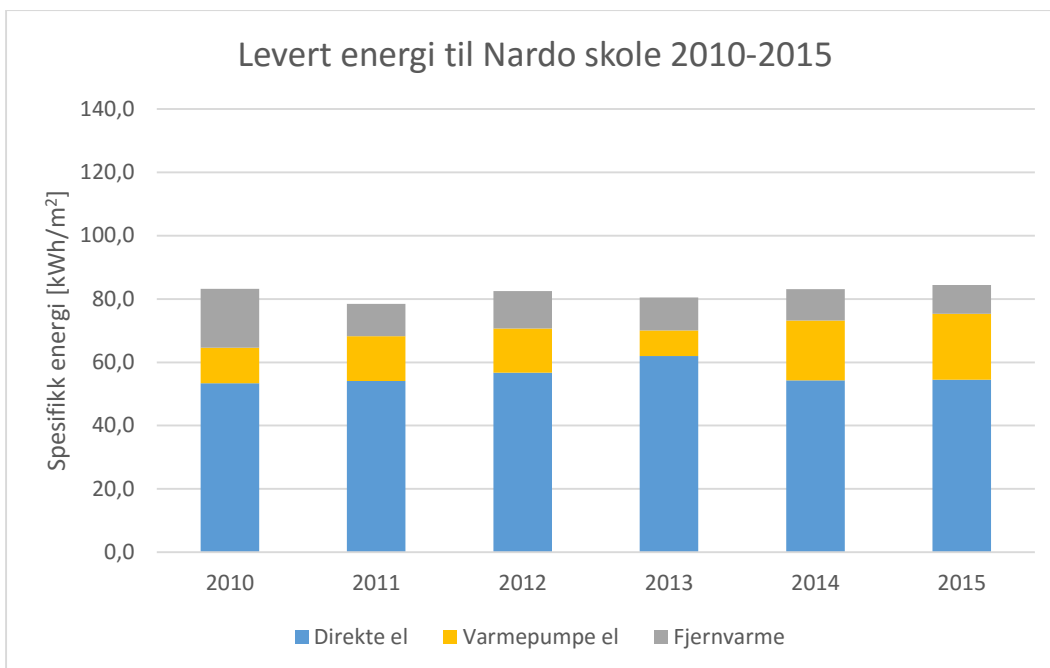
<b>Energipost</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	
<b>Romoppvarming</b>	28,0	31,3	31,8	18,0	46,3	47,5	kWh/m <sup>2</sup>
<b>Ventilasjonsvarme</b>	20,0	15,4	18,3	9,4	14,0	13,2	kWh/m <sup>2</sup>
<b>Varmtvann</b>	10,0	9,4	9,2	4,6	9,2	10,5	kWh/m <sup>2</sup>
<b>Vifter</b>	9,9	10,4	11,6	5,5	13,5	11,9	kWh/m <sup>2</sup>
<b>Pumper</b>	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	kWh/m <sup>2</sup>
<b>Teknisk utstyr</b>	53,2	51,0	54,7	27,9	53,1	54,8	kWh/m <sup>2</sup>
<b>Ventilasjonskjøling</b>	4,1	3,3	2,3	0,8	4,0	5,4	kWh/m <sup>2</sup>
<b>Totalt</b>	125,5	121,1	128,0	66,3	140,5	143,6	kWh/m <sup>2</sup>
<b>Snøsmelting</b>	3,6	3,9	3,8	1,4	2,2	3,3	kWh/m <sup>2</sup>

Figur 8-6 viser energiregnskapet for Nardo skole for året 2015.

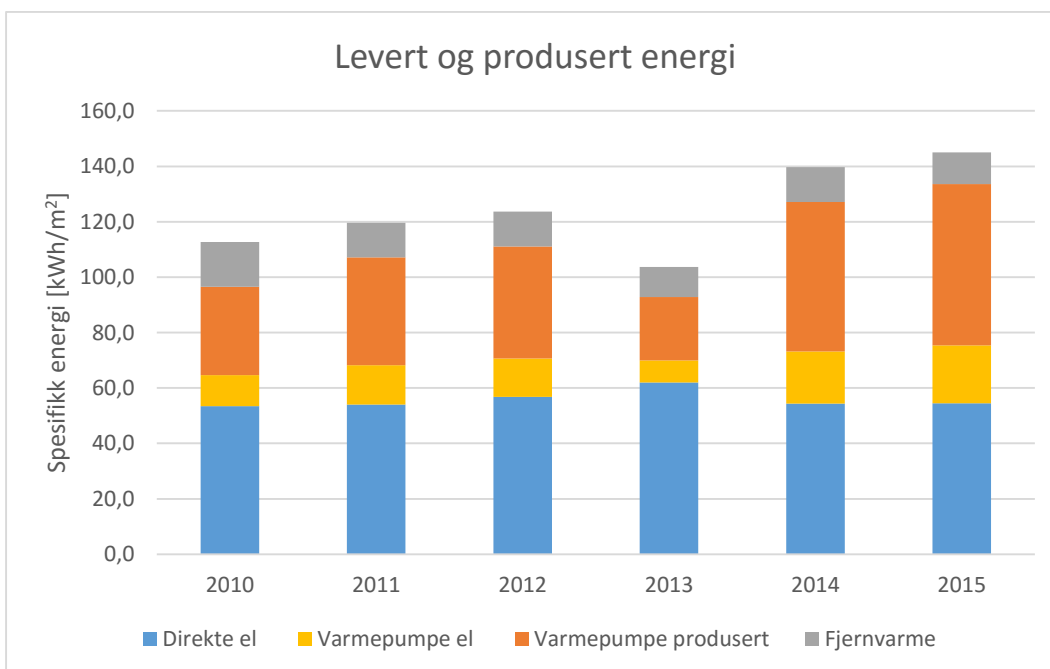


Figur 8-6 Energiregnskap for Nardo skole 2015.

Figur 8-7 viser levert energi til Nardo skole. Total levert elektrisitet er basert på måleren installert av netteier, mens andelen av elforbruket som går til varmepumpen er basert på skolens undermåler av elforbruk til varmepumpen. Levert fjernvarme er basert på registreringer fra varmeleverandøren. Figur 8-8 viser tilgjengelig levert energi ved Nardo skole, produsert energi er den varmen varmepumpen leverer. Alt elforbruk til varmepumpen og levert fjernvarme er temperaturkorrigert. Elforbruket til varmepumpen burde vært vektet med hensyn til hvor mye av energibehovet som går til romoppvarming og ventilasjonsvarme i forhold til forvarming av varmt vann. Det er valgt å ikke ta hensyn til dette fordi andelen av produsert varme fra varmepumpen som går til forvarming av tappevann i de månedene som korrigeres kun ligger på 1-5 %.



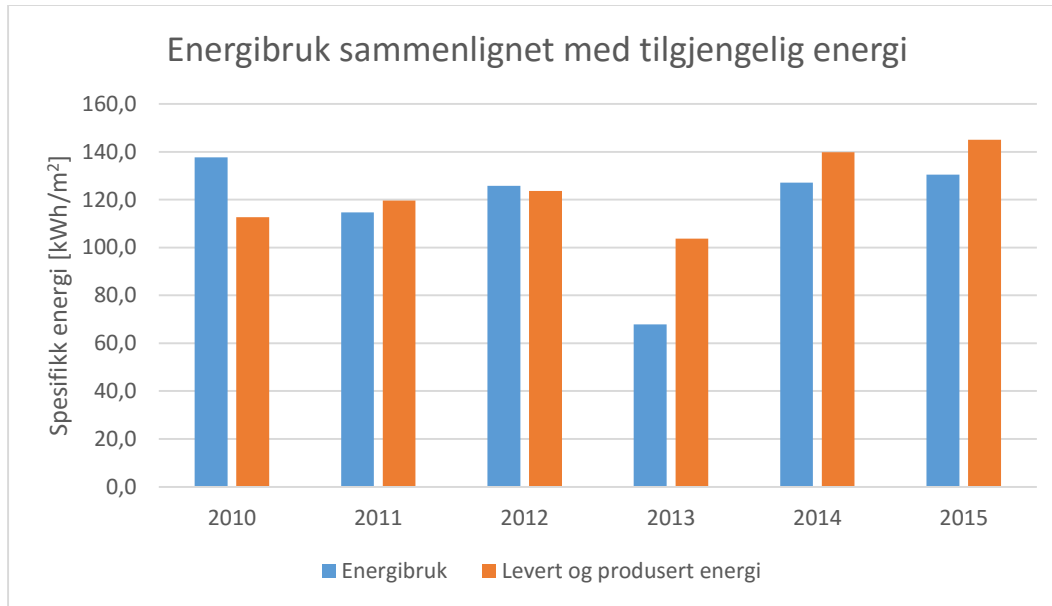
Figur 8-7 Levert energi til Nardo skole 2010-2015, fordelt mellom direkte el., el. til varmepumpe og fjernvarme.



Figur 8-8 Tilgjengelig energi til drift av skolen og tekniske anlegg 2010-2015.



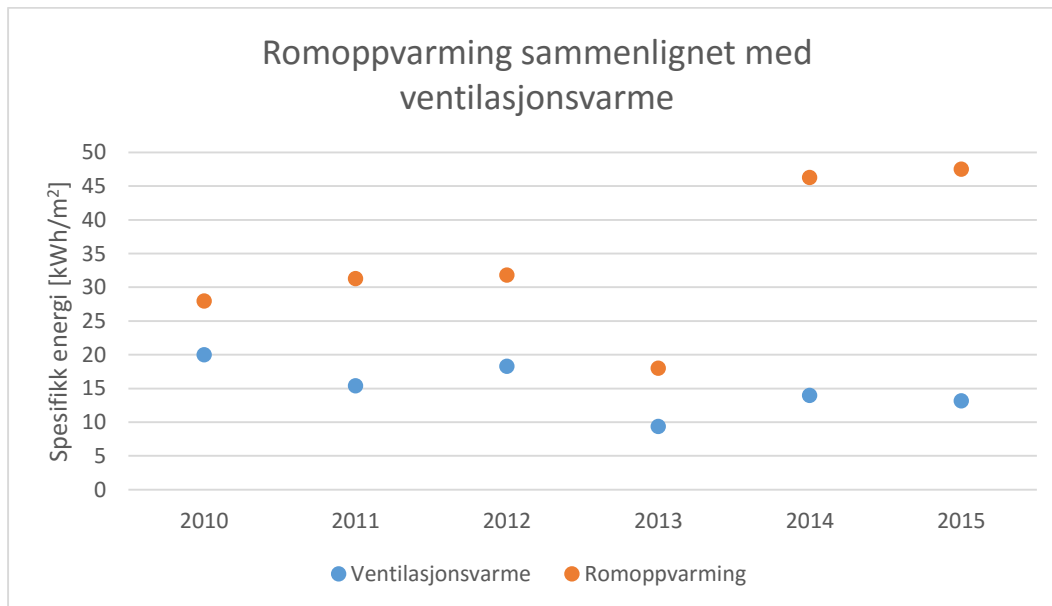
Figur 8-9 sammenligner tilgjengelig energi i form av levert og produsert energi med målt energibruk.



Figur 8-9 Sammenligning av energibruk med tilgjengelig energi.

### 8.2.2 Energibehov til oppvarmingsformål

Figur 8-10 viser en sammenligning av energibehovet til ventilasjonsvarme og romoppvarming ved Nardo skole for 2010 til 2015. Årene 2010-2012 har et energibehov til romoppvarming på cirka 30 kWh/m<sup>2</sup>år, mens det i 2014 og 2015 har økt til over 45 kWh/m<sup>2</sup>år.



Figur 8-10 Sammenligning av energibruk til vifter og ventilasjonsvarme for Nardo skole



## 9 RESULTAT

I dette kapitlet gjennomgås resultater fra forskjellige simuleringer, og eventuell etterbehandling av de utvalgte resultatene. Først presenteres resultater fra energisimuleringsmodellene laget av skolene da de ble bygget. Disse er tatt med for å ha et sammenligningsgrunnlag mellom målt og beregnet energibruk. Deretter blir resultatene fra modellen laget i IDA ICE presentert, og tilslutt regresjonsanalysen av utvalgte datasett fra disse resultatene.

### 9.1 TIDLIGERE MODELLER

Her presenteres resultat fra energisimuleringsmodeller av Nardo skole og Marienlyst skole laget i forbindelse med byggeprosjektene til skolene. Modellene er laget i to forskjellige programmer henholdsvis Energibruk i Bygg (EiB) og SIMIEN.

#### 9.1.1 Marienlyst skole: SIMIEN

SIMIEN modellene som ble tilgjengeliggjort av Drammen Eiendom for analyse i denne oppgaven er laget av Kirsti Gimnes Are og Thomas Olaussen på oppdrag for Drammen kommune. Det ble laget flere modeller som tar hensyn til forskjellige faktorer. Romkjøling er ikke inkludert i modellen som er valgt å benytte i videre analyse. Det gjør det lettere å sammenligne resultater fra simuleringer med energiregnskapet for målt energibruk, siden romkjøling er utelatt derfra. Energibudsjettet beregnet for Marienlyst skole i 2010, med «AS BUILT» verdier er presentert i Tabell 9-1.

Tabell 9-1 Simulering av prosjektert energibudsjett for Marienlyst skole (Are og Olaussen, 2010).

<b>Energibudsjett Marienlyst skole</b>		
<b>Energipost</b>	<b>Energibehov [kWh]</b>	<b>Spesifikt energibehov [kWh/m<sup>2</sup>]</b>
<b>1a Romoppvarming</b>	114430	17,7
<b>1b Ventilasjonsvarme</b>	7852	1,2
<b>2 Varmtvann</b>	65051	10,1
<b>3a Vifter</b>	77583	12,0
<b>3b Pumper</b>	5160	0,8
<b>4 Belysning</b>	99844	15,5
<b>5 Teknisk utstyr</b>	85586	13,3
<b>6a Romkjøling</b>	0	0,0
<b>6b Ventilasjonskjøling</b>	0	0,0
<b>Totalt netto energibehov, sum 1-6</b>	<b>455506</b>	<b>70,6</b>

Levert energi til Marienlyst skole er presentert i Tabell 9-2.

*Tabell 9-2 Simulering av prosjektert levert energi til Marienlyst skole (Are og Olaussen, 2010).*

<b>Levert energi til Marienlyst skole</b>		
<b>Energibærer</b>	Levert energi [kWh]	Spesifikt levert energi [kWh/m <sup>2</sup> ]
<b>1 Direkte el</b>	301362	46,7
<b>2 Olje</b>	0	0
<b>3 Gass</b>	0	0
<b>4 Fjernvarme</b>	184295	28,6
<b>5 Biobrensel</b>	0	0
<b>6 Annen energikilde</b>	0	0
<b>Totalt levert energi, sum 1-6</b>	485656	75,2

#### 9.1.2 Nardo skole: Energibruk i bygninger

Modellen av Nardo skole ble laget i EiB og tilgjengeliggjort av Trondheim kommune. Resultat for energibudsjett er presentert i Tabell 9-3.

*Tabell 9-3 Simulering av prosjektert energibudsjett for Nardo skole (Trondheim kommune, 2008).*

<b>Energibudsjett Nardo skole</b>		
<b>Energipost</b>	Energibehov [kWh]	Spesifikt energibehov [kWh/m <sup>2</sup> ]
<b>1a Romoppvarming</b>	233452	38,3
<b>1b Ventilasjonsvarme</b>	57503	9,4
<b>2 Varmtvann</b>	49879	8,2
<b>3 Vifter og pumper</b>	73277	12,0
<b>4 Belysning</b>	165584	27,2
<b>5 Teknisk utstyr</b>	25477	4,2
<b>6a Romkjøling</b>	0	0
<b>6b Ventilasjonskjøling</b>	0	0
<b>Totalt netto energibehov, sum 1-6</b>	605172	99,3

Resultat for simulering av prosjektert levert energi ved Nardo skole er presentert i Tabell 9-4.

Tabell 9-4 Simulering av prosjektert levert energi ved Nardo skole (Trondheim kommune, 2008)

<b>Levert energi til Nardo skole</b>		
<b>Energibærer</b>	Levert energi [kWh]	Spesifikt levert energi [kWh/m <sup>2</sup> ]
<b>1 Direkte el</b>	314214	51,5
<b>2 Olje</b>	0	0
<b>3 Gass</b>	0	0
<b>4 Fjernvarme</b>	296588	48,6
<b>5 Biobrensel</b>	0	0
<b>6 Annen energikilde</b>	0	0
<b>Totalt levert energi, sum 1-6</b>	610802	100,1

## 9.2 IDA ICE

I dette kapitlet presenteres resultater fra IDA ICE. Både fra basemodellen, og resultatene brukt videre i regresjonsanalysen som blir presentert i kapittel 9.3.

### 9.2.1 Basemodellen

I dette kapitlet gjengis de viktigste resultatene fra basemodellen av Marienlyst skole. Disse resultatene sammenlignes med resultater fra tidligere modeller og målt energibruk fra energioppfølgingssystemet

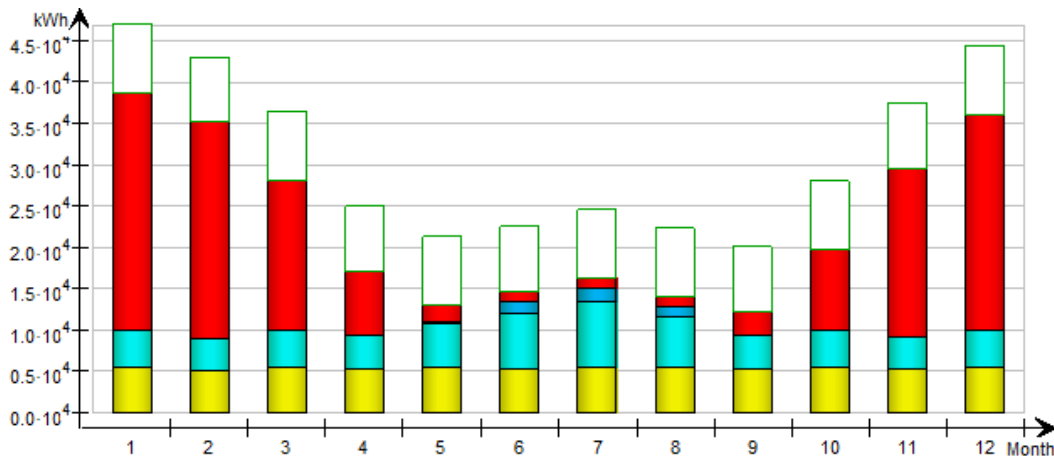
#### *Energibudsjett og levert energi*

Tabell 9-5 og Figur 9-1 viser levert energi for modellen. Elforbruk er delt inn i energipostene: belysning, ventilasjonsvifter og teknisk utstyr. Totalt elforbruk er 222 277 kWh, eller 36,0 kWh/m<sup>2</sup>.

Tabell 9-5 Oversikt over levert energi, delt inn i enkelte energiposter. Skjermdump IDA ICE.

		Delivered energy		Demand
		kWh	kWh/m <sup>2</sup>	kW
■	Lighting, facility	64981	10.5	7.4
■	HVAC aux	59820	9.7	41.53
Total, Facility electric		124801	20.2	
■	District cooling	4549	0.7	117.7
■	District heating	145408	23.6	230.1
Total, Facility district		149957	24.3	
Total		274758	44.6	
□	Equipment, tenant	97476	15.8	11.1
Total, Tenant electric		97476	15.8	
Grand total		372234	60.4	

Som Figur 9-1 viser inntreffer effekttoppen for elforbruk i juli, for da er energibehovet til ventilasjonsvifter høyest. Både belysning og teknisk utstyr har samme energibehov hver måned hele året, dette skyldes forenklinger gjort da modellen ble laget.

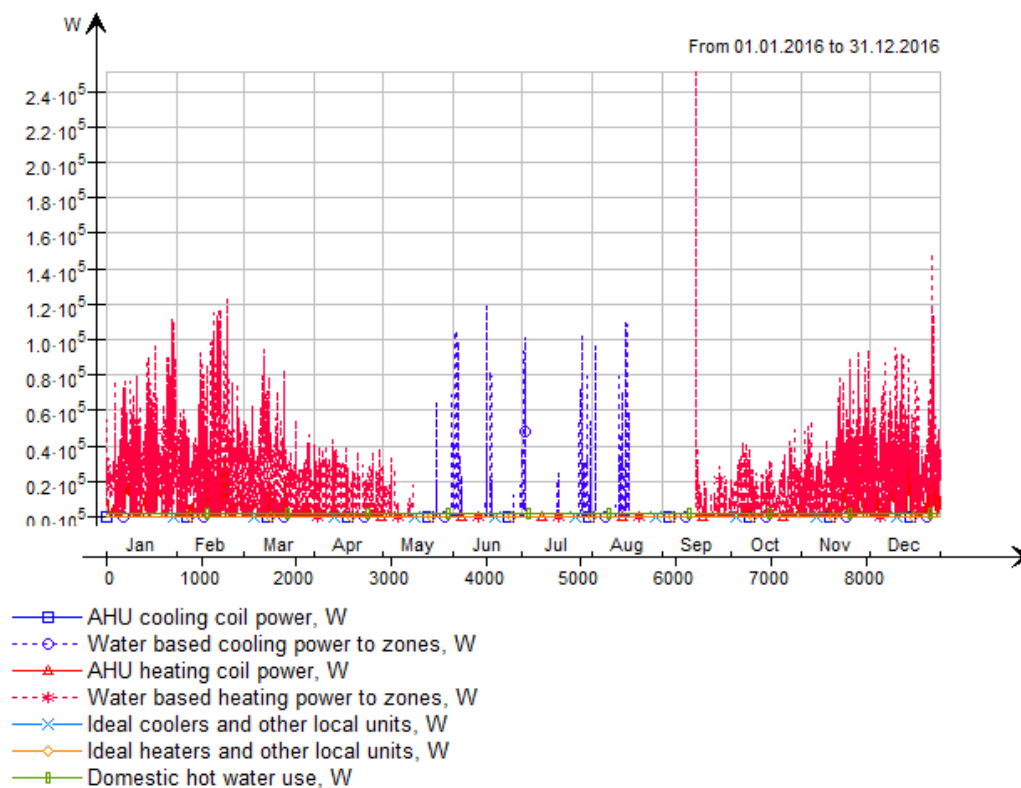


Figur 9-1 Oversikt over levert energi, inndelt i enkelte energiposter per måned. Skjermdump IDA ICE.

Tabell 9-6 og Figur 9-2 viser effektbehovet for termisk energi for modellen av Marienlyst skole. Maksimalt effektbehov for vannbåren varme er over 240 kW, og oppstår i september. I fyringssesongen ellers ligger maksimalt effektbehov rundt 120 kW, med unntak av en dag i desember der effekttoppen når omtrent 150 kW. Kjølebehovet i sommermånedene er sporadisk, med effekttopp på 120 kW.

Tabell 9-6 Termisk energibehov per måned. Skjermdump IDA ICE.

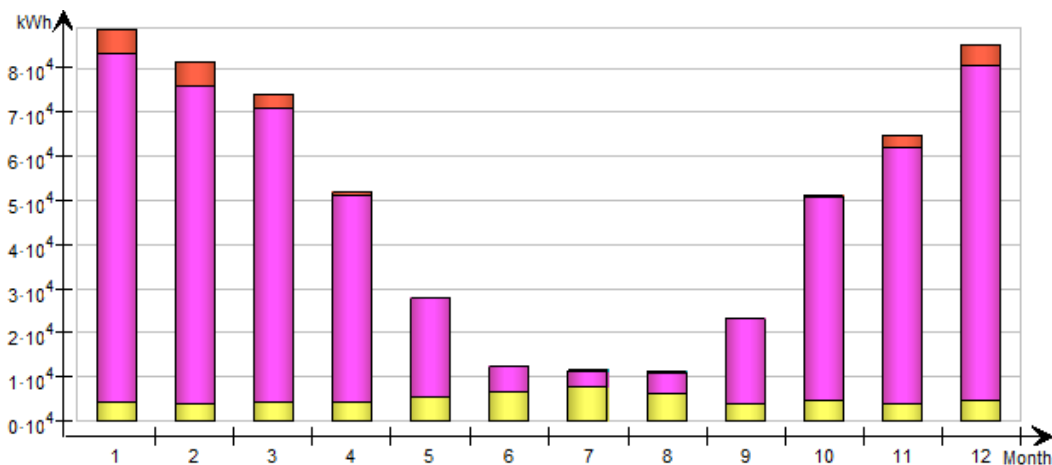
Month	Zone heating	Zone cooling	AHU heating	AHU cooling	Dom. hot water
1	21900.0	0.1	5578.0	0.0	1212.0
2	19753.0	0.1	5414.0	0.0	1134.0
3	13942.0	0.1	2924.0	0.0	1212.0
4	5710.0	0.1	762.5	0.0	1173.0
5	835.9	184.6	19.6	0.0	1212.0
6	0.0	1510.0	0.0	0.0	1173.0
7	0.0	1668.0	0.0	0.0	1212.0
8	0.0	1186.0	0.0	0.0	1212.0
9	1588.0	0.1	0.8	0.0	1173.0
10	8108.0	0.1	449.4	0.0	1212.0
11	16291.0	0.1	2899.0	0.0	1173.0
12	20261.0	0.1	4660.0	0.0	1212.0
<b>Total</b>	<b>108388.9</b>	<b>4549.3</b>	<b>22707.2</b>	<b>0.0</b>	<b>14310.0</b>



Figur 9-2 Effektbehov for termisk energi. IDA ICE.

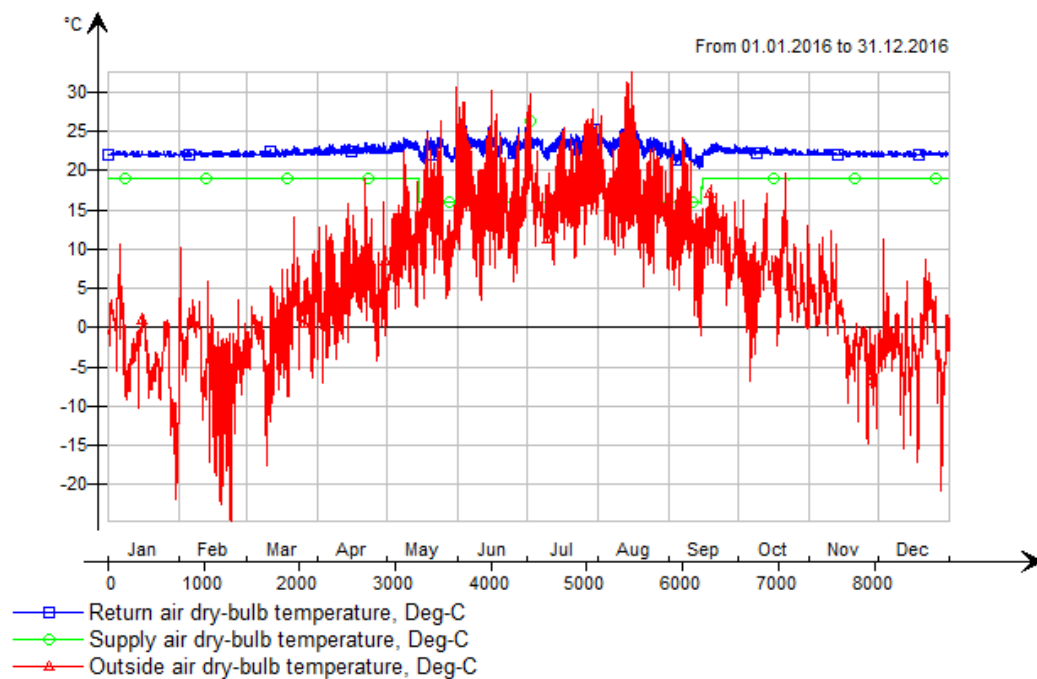
### Energiflyt i ventilasjonsanlegget

Figur 9-3 viser energiflyten i ventilasjonsaggregatet per måned. Gult er energibehov til vifter, lilla er gjenvunnet varme og oransje er tilført varme fra varmebatteriene.



Figur 9-3 Energiflyt i ventilasjonsaggregatet per måned. IDA ICE

Figur 9-4 viser temperatuene i ventilasjonsaggregatet gjennom hele det simulerte året. Tilluftstemperaturen holder ønsket settpunkttemperatur så lenge utetemperaturen er lav nok. Returtemperaturen ligger ett par grader høyere enn tilluftstemperatur.

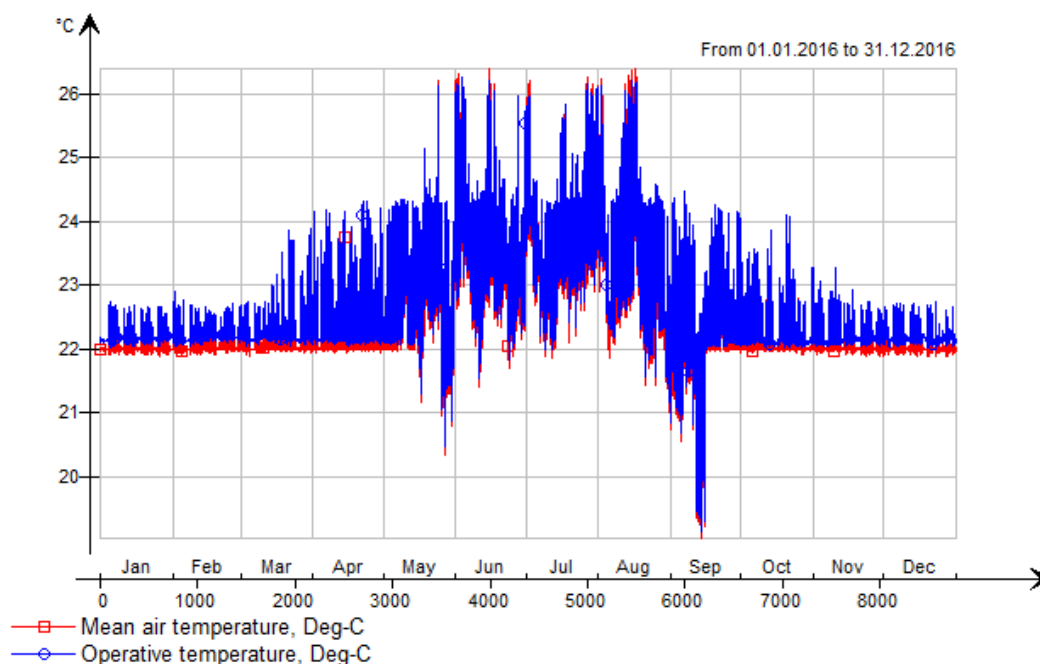


Figur 9-4 Temperaturer i ventilasjonsaggregatet. IDA ICE.



### **Eksempel på temperaturutvikling i en sone**

Temperaturen i klasserommene holder seg, med unntak av noen dager om sommeren, innenfor kravene til innklima på 19-26 °C (SINTEF Byggforsk, 2005). Av Figur 9-5 kan det sees at temperaturen faller ned mot 19 °C i midten av september.



Figur 9-5 Temperaturer i klasserommet i sørvestlige hjørne av bygget. IDA ICE

### **9.2.2 Resultat fra IDA ICE til regresjonsanalyse**

Som nevnt i kapittel 7.1.1 ble det valgt å kjøre 32 simuleringer for å gjennomføre en regresjonsanalyse. Fem datasett ble valgt ut som interessante å undersøke videre i regresjonsanalysen. De fem datasettene er:

- Lvert fjernvarme
- Energibruk til romoppvarming
- Energibruk til ventilasjonsvarme
- Energibruk til vifter i ventilasjonsanlegget
- Gjenvunnet energi i varmegjenvinner i ventilasjonsanlegget.

Notasjonen benyttet i Tabell 9-7 til Tabell 9-11 er presentert i Tabell 7-2 i kapittel 7.1.1.

Tabell 9-7 Resultater fra IDA ICE: Levert fjernvarme [kWh/m<sup>2</sup>år].

Levert fjernvarme		V̇0				V̇1			
		Okk0		Okk1		Okk0		Okk1	
		n0	n1	n0	n1	n0	n1	n0	n1
T0	C0	19,5	13,9	18,0	11,8	20,8	14,6	21,7	13,5
	C1	17,5	12,9	16,4	11,0	17,6	14,0	18,7	12,5
T1	C0	22,4	17,0	20,5	14,6	23,7	17,7	24,4	16,5
	C1	20,3	15,9	18,9	13,8	20,4	16,0	20,5	14,5

Tabell 9-8 Resultater fra IDA ICE: Romoppvarming [kWh/m<sup>2</sup>år].

Rom-oppvarming		V̇0				V̇1			
		Okk0		Okk1		Okk0		Okk1	
		n0	n1	n0	n1	n0	n1	n0	n1
T0	C0	7,4	7,4	6,1	6,1	7,6	7,6	6,5	6,5
	C1	7,2	7,2	5,9	5,9	7,2	9,3	7,7	7,7
T1	C0	12,6	12,6	10,6	10,6	13,0	13,0	11,5	11,5
	C1	12,1	12,1	10,2	10,2	12,3	12,3	10,7	10,7

Tabell 9-9 Resultater fra IDA ICE: Ventilasjonvarme [kWh/år].

Ventilasjonvarme		V̇0				V̇1			
		Okk0		Okk1		Okk0		Okk1	
		n0	n1	n0	n1	n0	n1	n0	n1
T0	C0	9,9	4,3	9,6	3,4	11,0	4,8	12,9	4,8
	C1	8,1	3,4	8,3	2,8	8,1	2,5	8,8	2,6
T1	C0	7,6	2,2	7,7	1,7	8,5	2,5	10,7	2,8
	C1	6,0	1,5	6,4	1,3	5,9	1,5	7,6	1,7

Tabell 9-10 Resultater fra IDA ICE: Vifter ventilasjon [kWh/m<sup>2</sup>år].

Vifter ventilasjon		V̇0				V̇1			
		Okk0		Okk1		Okk0		Okk1	
		n0	n1	n0	n1	n0	n1	n0	n1
T0	C0	8,3	8,3	9,6	9,6	9,3	9,3	11,9	11,9
	C1	7,4	7,4	8,9	8,9	7,9	7,7	10,1	10,1
T1	C0	8,1	8,1	9,4	9,4	9,1	9,1	11,8	11,7
	C1	7,3	7,3	8,7	8,7	7,7	7,7	10,1	10,1

Tabell 9-11 Resultater fra IDA ICE: Varme gjenvunnet i ventilasjonsanlegget [kWh/m<sup>2</sup>år].

Varme gjenvunnet		V̇0				V̇1			
		Okk0		Okk1		Okk0		Okk1	
		n0	n1	n0	n1	n0	n1	n0	n1
T0	C0	67,5	73,1	80,8	87,0	73,9	80,1	100,1	108,3
	C1	58,2	62,9	72,9	78,4	58,2	60,0	79,7	85,9
T1	C0	66,6	72,0	79,5	85,5	73,1	79,2	99,3	107,2
	C1	57,0	61,5	71,4	76,5	56,6	61,0	80,8	86,9

### 9.3 REGRESJONSANALYSE AV PARAMETERE

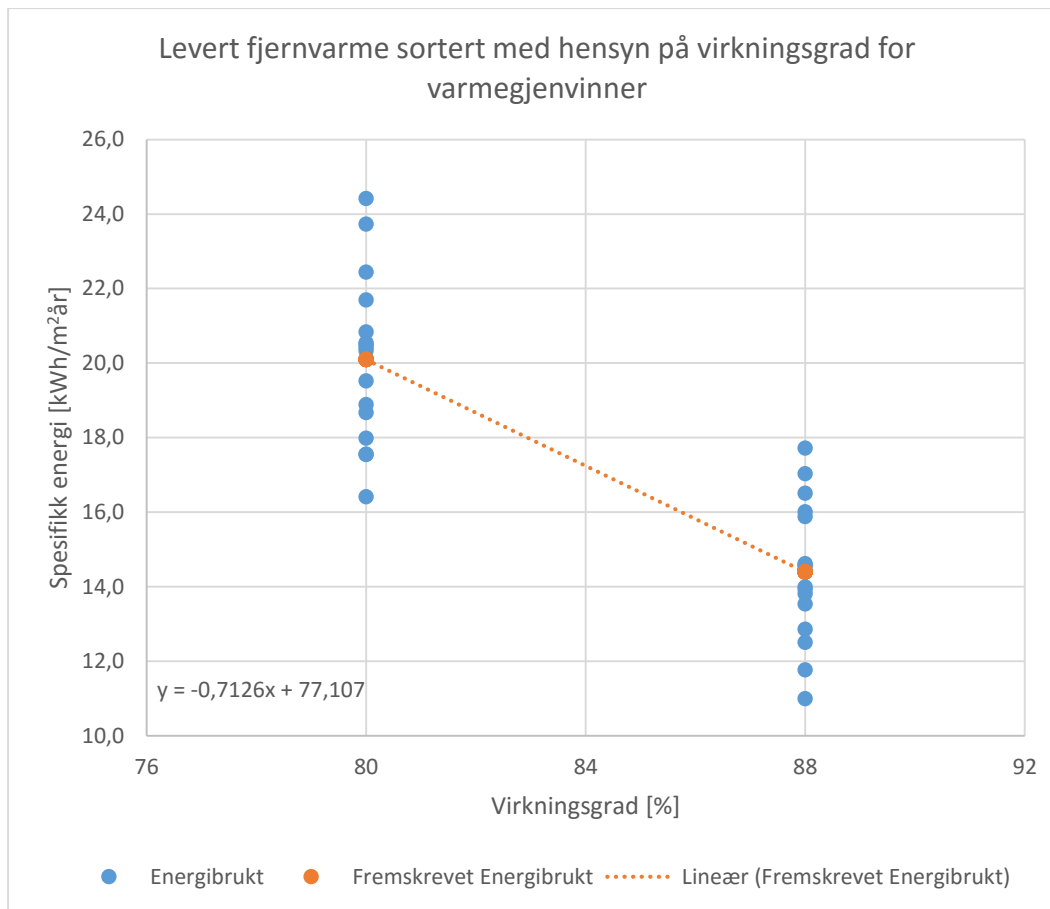
Regresjonsanalyse ble valgt som verktøy for å vise de kompliserte sammenhengene mellom hvordan ulike parametere i en bygning påvirker energibruken. Målet med dette kapitlet er å tydeliggjøre hvilke sammenhenger som er viktigst for energibruken i bygget med hensyn på valgte parametere og datasett. Siden datasettene er oppgitt i spesifikk energimengde per år, vil resultatene fra regresjonsanalysen oppgis i spesifikt energibehov per år.

#### 9.3.1 Levert fjernvarme

Levert fjernvarme til bygget vil, av de valgte parameterne og verdiene, påvirkes sterkest av virkningsgraden på varmegjenvinneren. Som vist i Figur 9-6 vil den leverte energien når den blir sortert med hensyn på virkningsgrad legge seg i to grupper som er tydelig forskjøvet i forhold til hverandre. R<sup>2</sup>, som forteller hvor stor del av variasjonen mellom datapunktene skyldes valgt parameter, er i dette tilfellet 0,668. Det vil si at 66,8 % av variasjonen i levert energi skyldes at virkningsgraden på varmegjenvinneren er endret fra 80 % til 88 %.

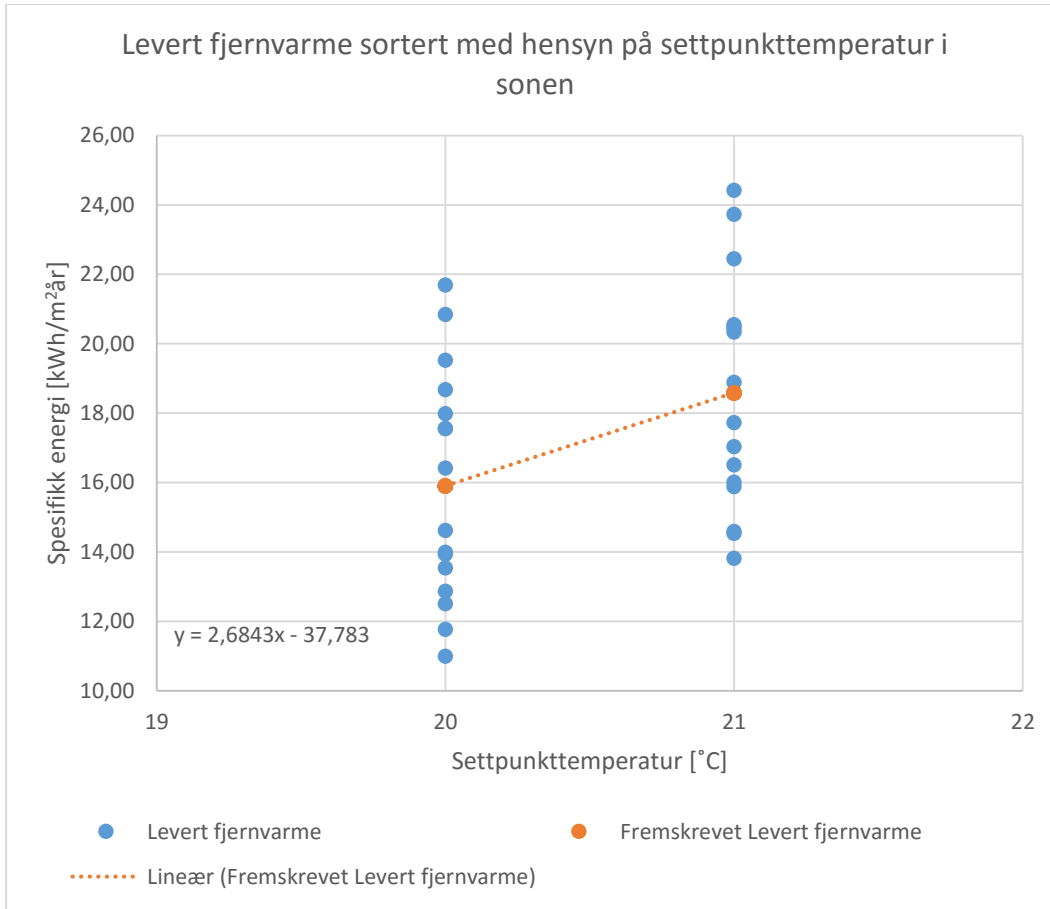
Trendlinjen viser at for hver prosent i økt virkningsgrad vil levert energi i gjennomsnitt reduseres med 0,71 kWh/m<sup>2</sup>år. Det gir en total reduksjon på 5,7 kWh/m<sup>2</sup> år når virkningsgraden øker med 8 % fra 80 % til 88 %. Formelen for trendlinjen kan sees nederst i venstre hjørne av diagrammet. Konstanten i trendlinjen kan i dette tilfellet ignoreres, den viser hva levert fjernvarme hadde vært dersom virkningsgraden på varmegjenvinner var null. Det er vanskelig å si om det tallet faktisk stemmer da det ikke vites om sammenhengene mellom de forskjellige parameterne som påvirker energibruken er lineære når verdiene av parameterne flyttes til ekstreme ytterpunkt.

Det er viktig å påpeke at avhengig av hvilke verdier de andre parameterne har kan det oppnås lavere energibruk selv med 80 % virkningsgrad enn med 88 % virkningsgrad. Lavest mulig spesifikk levert energi fra fjernvarme som kan oppnås med 80 % virkningsgrad er 16,4 kWh/m<sup>2</sup> per år. Høyest mulig spesifikk levert energi fra fjernvarme som kan oppnås for 88 % virkningsgrad er 17,7 kWh/m<sup>2</sup>år.



Figur 9-6 Datasett for levert fjernvarme sortert med hensyn på parameteren virkningsgrad for varmegjenvinner.

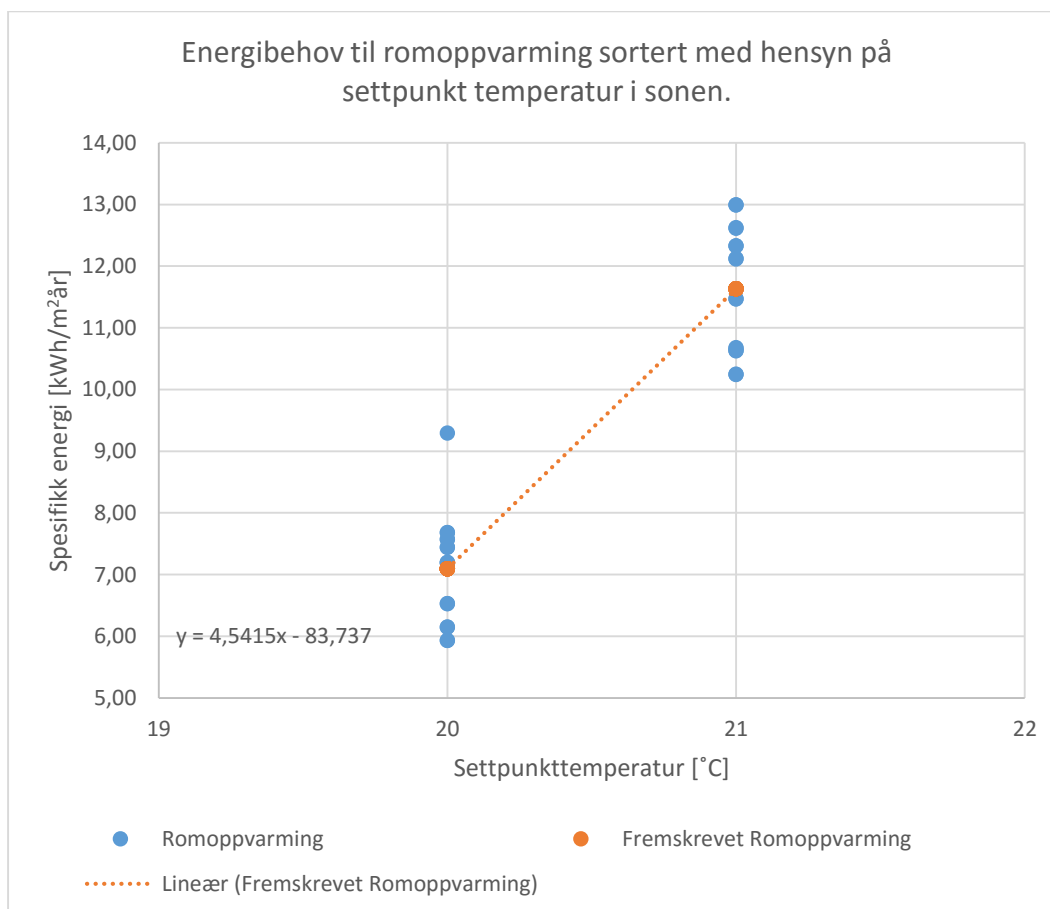
Levert energi fra fjernvarme fordeles på tre energiposter: romoppvarming, ventilasjonsvarme og forvarming av varmt tappevann. Romoppvarming er den største av disse med gjennomsnittlig energibruk på 20,8 kWh/m<sup>2</sup>år, sammenlignet med henholdsvis 8,5 kWh/m<sup>2</sup>år og 2,2 kWh/m<sup>2</sup>år for ventilasjonsvarme og varmtvann de siste fire årene. Derfor ble det først antatt at settpunkttemperatur i sonene ville ha stor betydning for energibehovet ved skolen. Resultatene fra regresjonsanalysen viser at kun 14,8 % av variasjonen mellom simuleringene som er kjørt kan tilskrives å endre settpunkttemperatur i sonen med 1 °C fra 20 °C til 21 °C. Av Figur 9-7 sees det at det er forskyvning mellom gruppene av datapunkter, men i hovedsak er det overlapp. Skal lavest mulig energibruk oppnås må settpunkttemperaturen være lav. Den laveste leverte energimengden fra fjernvarme det er mulig å oppnå for hver temperatur settpunkt er henholdsvis 11,0 kWh/m<sup>2</sup>år og 13,8 kWh/m<sup>2</sup>år. Ifølge trendlinjen vil i snitt den spesifikke leverte energien fra fjernvarme øke med 2,7 kWh/m<sup>2</sup>år for hver grad økning i settpunkttemperatur i sonen. Det tilsvarer en økning på omtrent 17 000 kWh/år.



Figur 9-7 Datasett for levert fjernvarme sortert med hensyn på settpunkttemperatur i sonen.

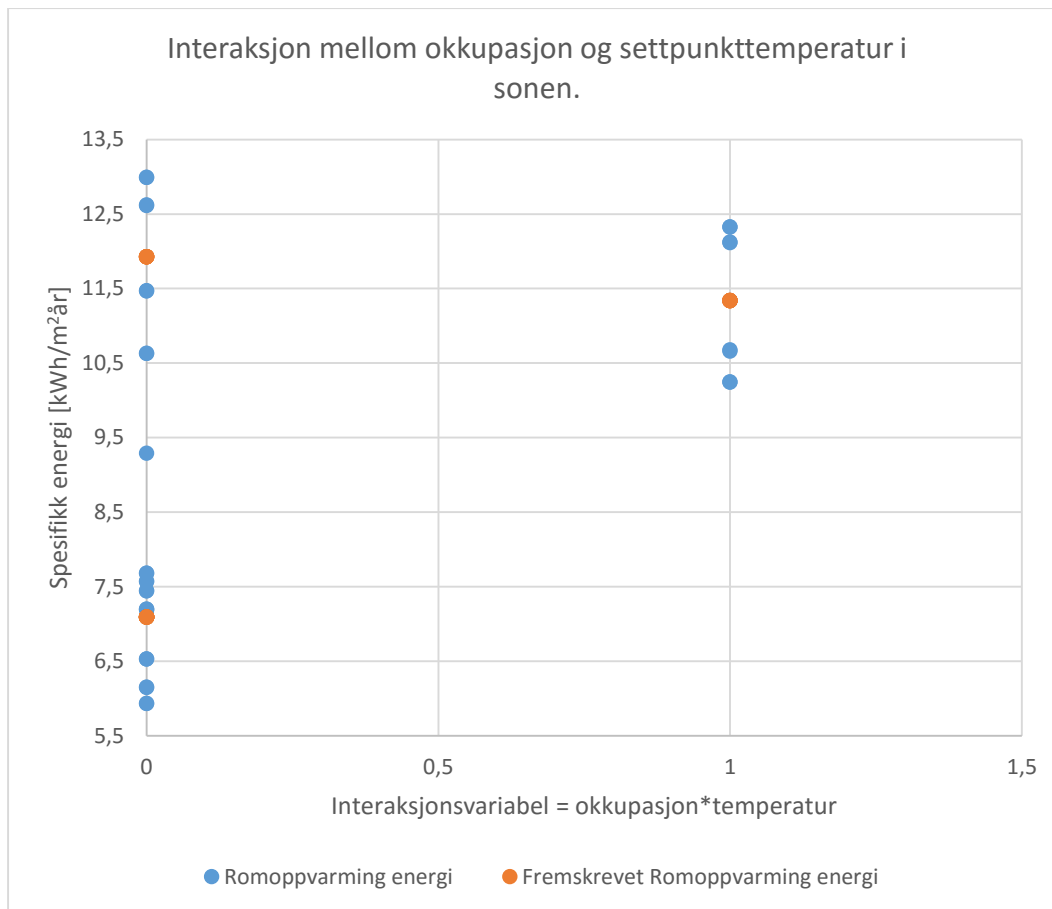
### 9.3.2 Romoppvarming

Nesten all variasjon i energibehov til romoppvarming skyldes settpunkttemperatur i sonen.  $R^2$  er på 86,3 %. Det er en kraftig forskyvning mellom gruppene av datapunkter, og det er ingen overlapp mellom gruppene, se Figur 9-8. Settpunkttemperatur har stor innvirkning på energibehovet til romoppvarming. For hver grad settpunkttemperaturen økes, øker det spesifikke energibehovet til romoppvarming gjennomsnittlig med 4,54 kWh/m<sup>2</sup>år.



Figur 9-8 Settpunkttemperatur har stor innvirkning på energibehovet til romoppvarming.

Regresjonsanalyse med én parameter viste ikke en sterk sammenheng mellom samtidighet i rommet og energibehov til oppvarming.  $R^2$  for den analysen var kun 8,2 %. Energibruken ble redusert med i snitt 1,4 kWh/m<sup>2</sup>år når okkupasjonsgraden økte fra 60 % til 100 %. Det ble valgt å undersøke i hvor stor grad okkupasjon påvirket energibruken hvis temperatursettpunktet i rommet samtidig økte med 1 °C. Resultatet fra denne analysen er vist i Figur 9-9.



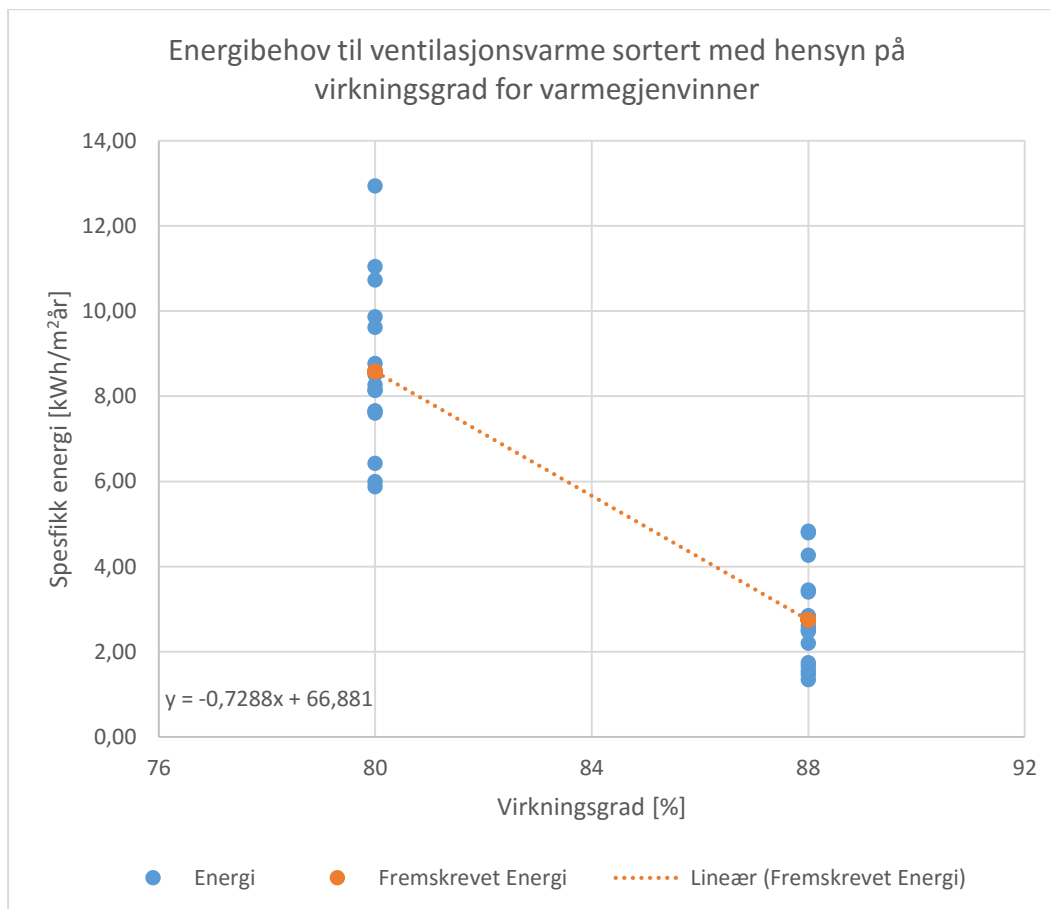
Figur 9-9 Økt samtidighet i rommet samtidig som settpunkttemperaturen i rommet økes har tydelig sammenheng.

Interaksjonsvariabelen for denne analysen er negativ, - 0,6. Dette betyr at ved en økning i settpunkttemperatur fra 20 °C til 21 °C, øker energibehovet med 0,6 kWh/m²år mindre når samtidigheten er 100 % enn når den er 60 %. Det vil si at økt samtidighet i rommet motvirker økningen i energibehov på grunn av at settpunkttemperaturen økes med 1 °C. Sammenhengen mellom okkupasjon, settpunkt og energibehov til romoppvarming er sterk, da justert R<sup>2</sup> for denne analysen er på 86,1 %.

### 9.3.3 Ventilasjonsvarme

$R^2$  for regresjonsanalysen av energibehov til ventilasjonsvarme viser at 78,7 % av variasjonen i energibehov skyldes endring av virkningsgrad fra 80 % til 88%. Dette kommer tydelig frem av Figur 9-10 da gruppene av datapunkter er kraftig forskjøvet i forhold til hverandre, og det er ingen overlapp mellom dem.

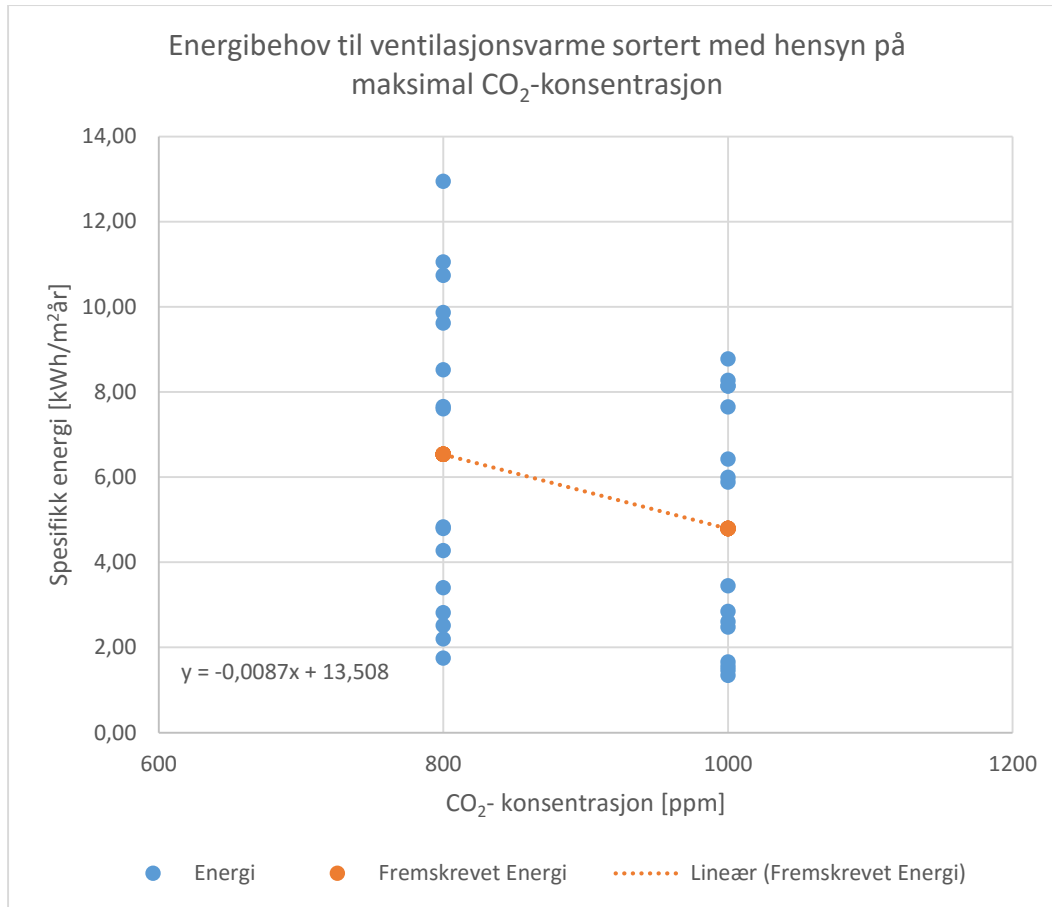
Trendlinjen viser at energibehovet reduseres med 0,7 kWh/m<sup>2</sup>år for hver prosent forbedring i virkningsgrad til varmegjenvinneren. Total reduksjon i energibehov til ventilasjonsvarme når virkningsgraden økes fra 80 % til 88 % er 5,8 kWh/m<sup>2</sup>år.



Figur 9-10 Virkningsgrad til varmegjenvinneren har stor innflytelse på energibehovet til ventilasjonsvarme.

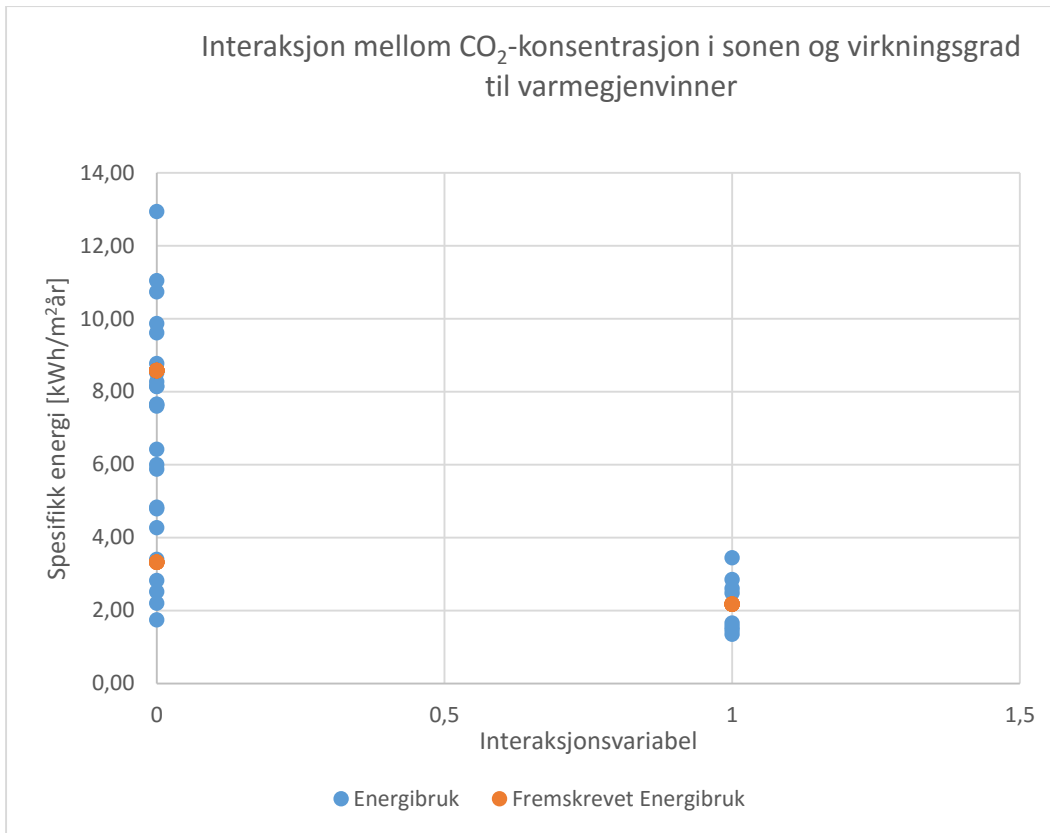


Figur 9-11 viser at energibehov til ventilasjonsvarme i liten grad påvirkes av styringsparameteren maksimal tillatt CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i rommet. Det støttes opp av en lav R<sup>2</sup> på 7,0 %. Figur 9-11 viser at det er fullt mulig å oppnå lav energibruk ved begge konsentrasjonsnivåene. Dersom maksimal tillatt CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i rommet senkes, øker derimot den øvre grensen for oppnåelig energibehov fra 8,8 kWh/m<sup>2</sup>år til 12,9 kWh/m<sup>2</sup>år.



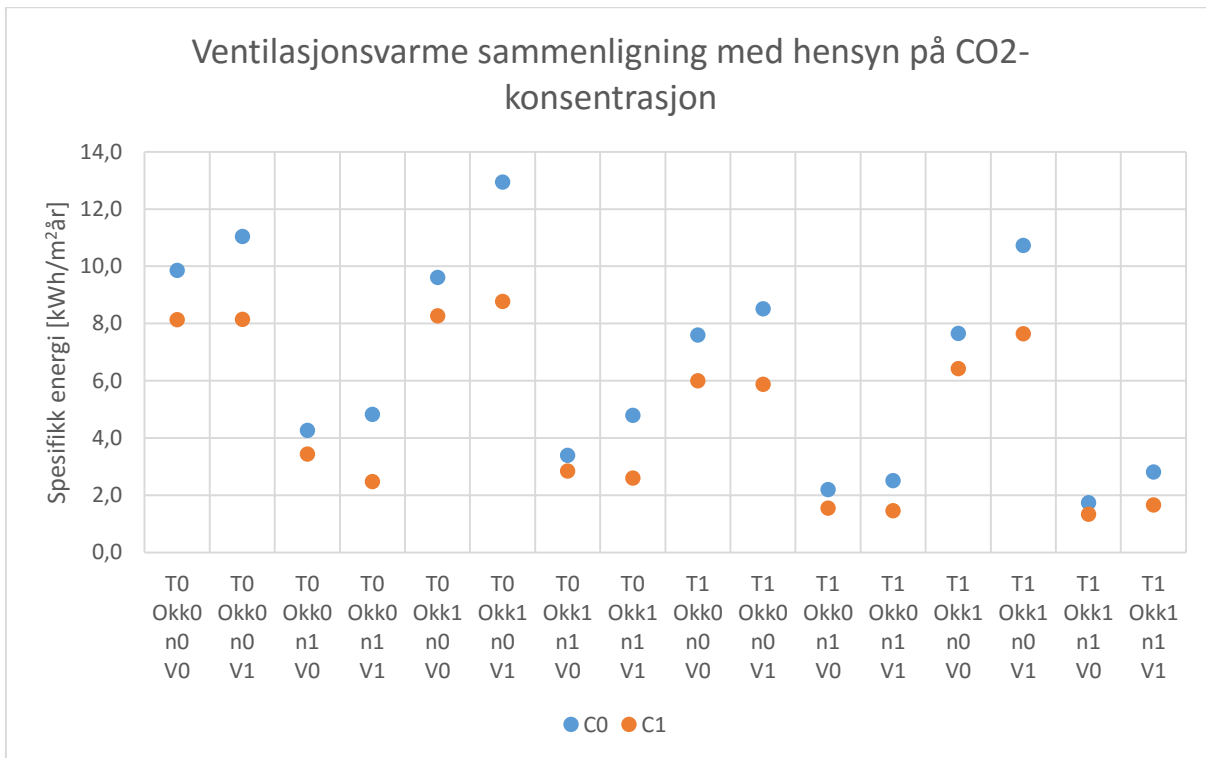
Figur 9-11 Ved lavere maksimum grense for tillatt CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i rommet er det mulig å oppnå betydelig høyere energibehov.

Interaksjonsvariabelen for CO<sub>2</sub>-konsentrasjon og virkningsgrad på varmegjenvinner er -1,2. Det vil si at energibehovet til ventilasjonsvarme reduseres med ytterligere 1,2 kWh/m<sup>2</sup>år når maksimal tillatt CO<sub>2</sub>-konsentrasjon økes fra 800 ppm til 1000 ppm, samtidig som varmegjenvinnerens virkningsgrad forbedres fra 80 % til 88 %.



Figur 9-12 Når maksimal tillatt CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i rommet økes samtidig som virkningsgraden til varmegjenvinneren forbedres reduseres energibehovet ytterligere 1,15 kWh/m<sup>2</sup>år.

Figur 9-13 viser hvordan å endre maksimal tillatt CO<sub>2</sub>-konstrasjon i sonen påvirker energibehovet til ventilasjonsvarme, de andre parameterne holdes konstant. Å endre det ene settpunktet den behovsstyrte ventilasjonen styres ut fra kan ha stor innvirkning i noen tilfeller.



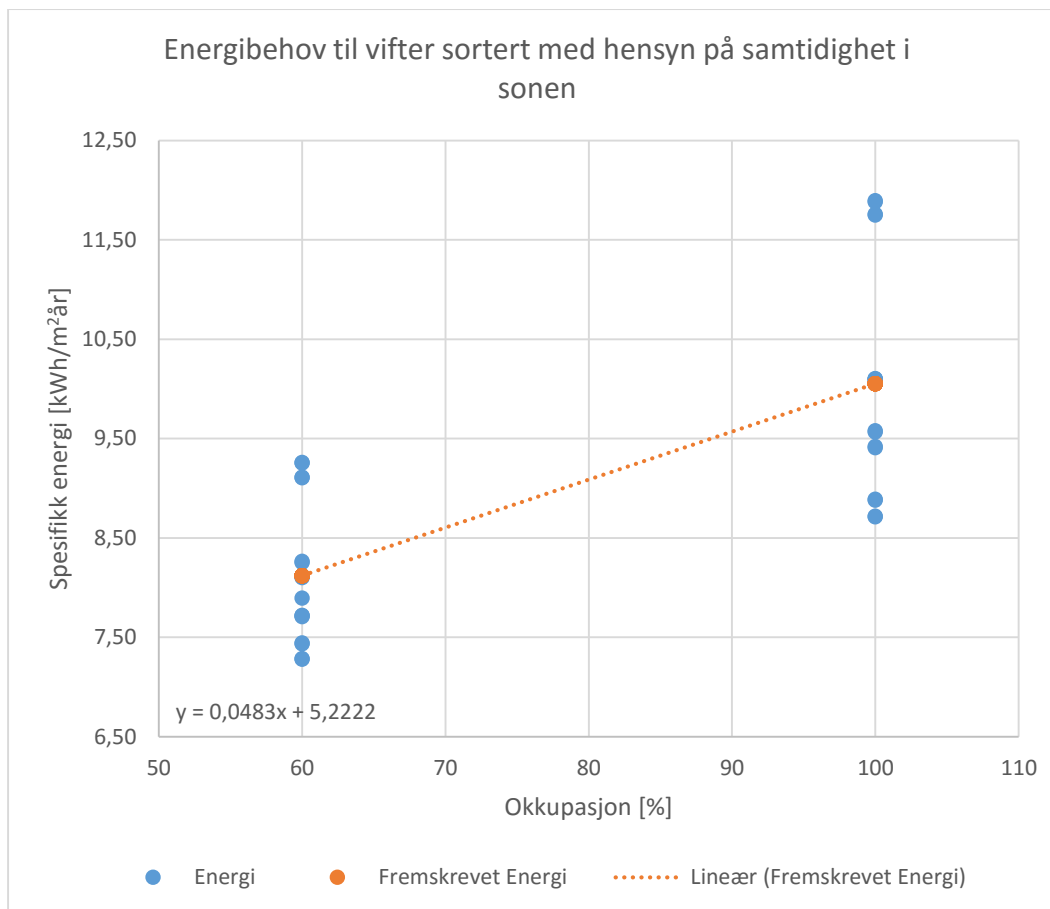
Figur 9-13 Dataserier med CO<sub>2</sub>-konsentrasjon som konstant variabel

Regresjonsanalyse med én parameter for okkupasjon viser at kun en liten andel av variasjonen i energibehovet til ventilasjonsvarme kan tilskrives endring i antall personer i sonen. Det er en svak tendens til at energibehovet øker litt når det er høyere samtidighet i sonen.

Regresjonsanalyse med én parameter for settpunkttemperatur i sonen viser at når settpunktet øker 1 °C reduseres behovet til ventilasjonsvarme med 1,9 kWh/m<sup>2</sup>·år.

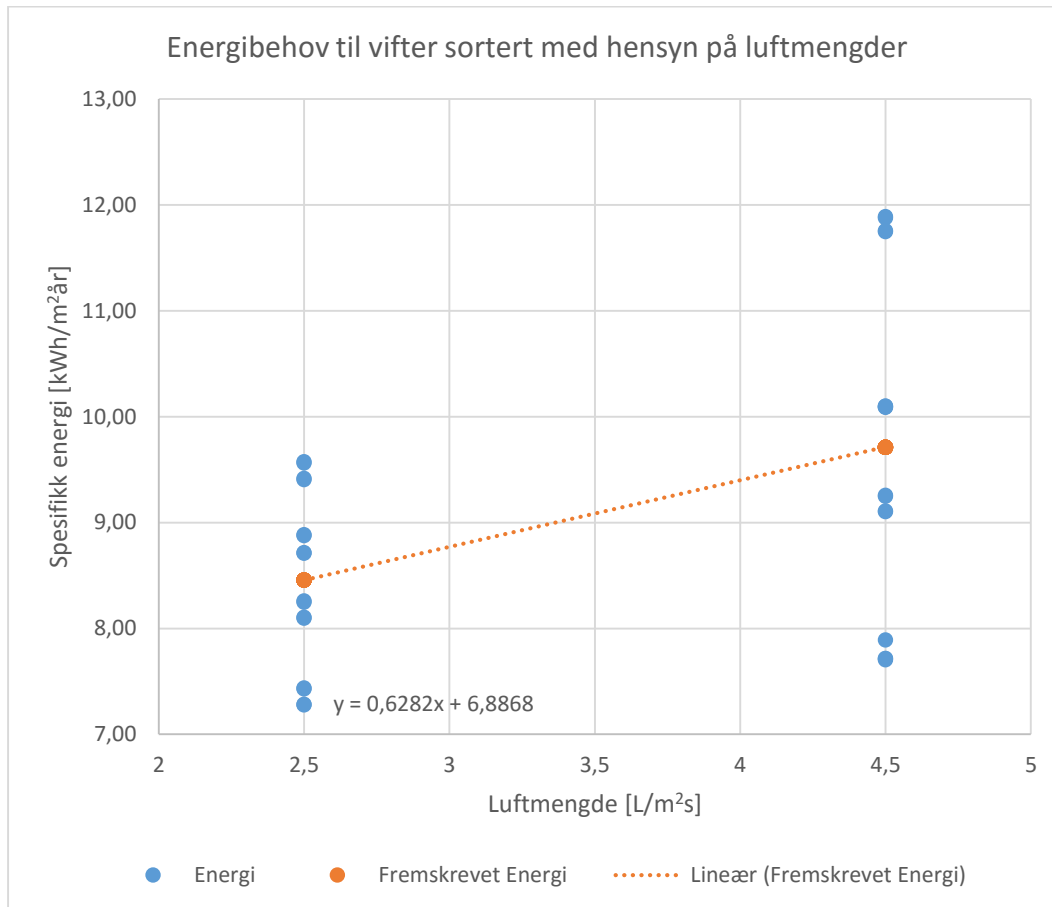
### 9.3.4 Ventilasjonsvifter

Ved høy samtidighet i rommet øker energibehovet til ventilasjonsvifter. Øker samtidigheten i rommet fra 60 % til 100 % vil i gjennomsnitt energibehovet til vifter øke med 1,9 kWh/m<sup>2</sup>år. Av variasjonen mellom datapunktene kan 52 % forklares på grunn av endring i okkupasjonsprosent. Figur 9-14 viser at det er en tydelig forskyvning mellom gruppene av datapunkter.



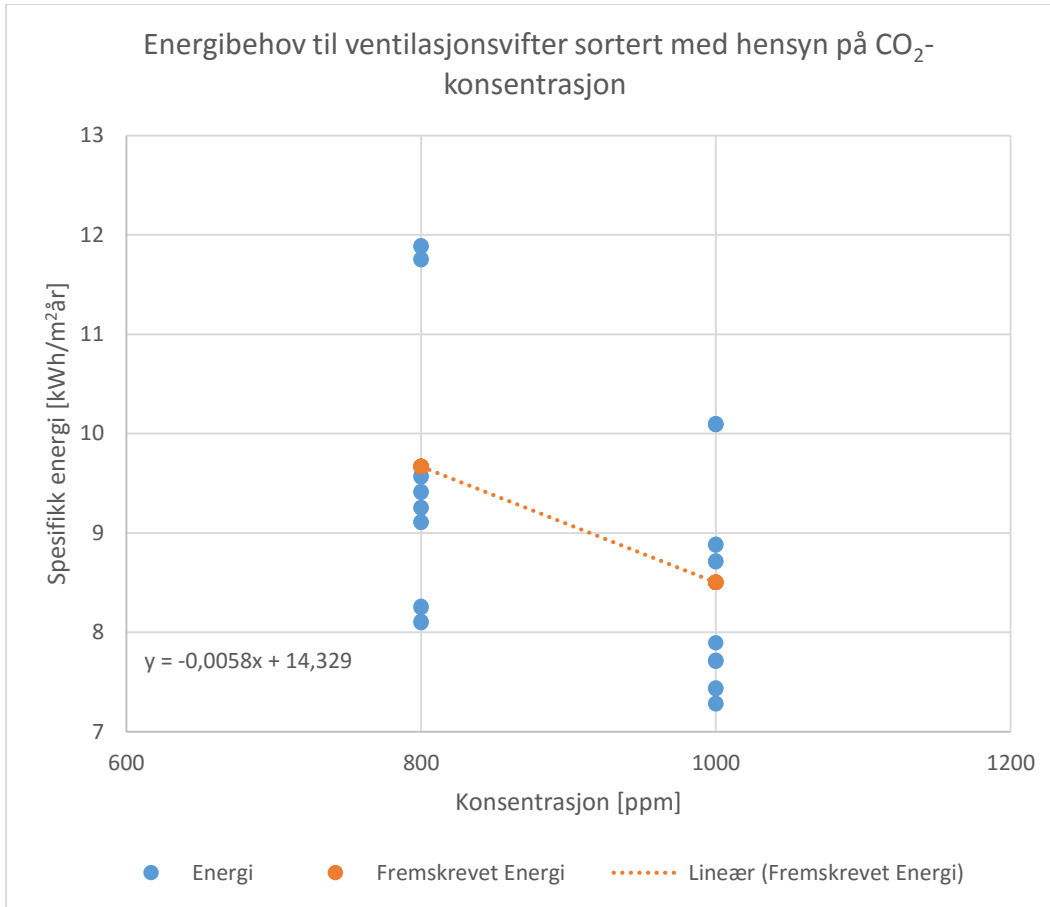
Figur 9-14 Økt samtidighet i sonen fører i gjennomsnitt til høyere energibehov til ventilasjonsvarme.

Lavt energibruk kan oppnås med luftmengder på både 2,5 og 4,5 L/m<sup>2</sup>s, se Figur 9-15, men med store luftmengder kan energibruken bli betydelig høyere. Differansen mellom høyest mulig oppnåelige energibruk for hver av verdiene er 2,3 kWh/m<sup>2</sup>år. Gjennomsnittlig økning i energibehov til vifter dersom luftmengden økes med 2 L/m<sup>2</sup>s fra 2,5 L/m<sup>2</sup>s til 4,5 L/m<sup>2</sup>s er 1,3 kWh/m<sup>2</sup>år.



Figur 9-15 Større luftmengder kan føre til høyere energibruk.

Rundt 18,9 % av variasjonen i observasjonene er forårsaket av endring i maksimal tillatt CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i rommet. Figur 9-16 viser at gruppene av datapunkter matcher hverandre godt, de blir jevnt forskjøvet 1,6 kWh/m<sup>2</sup>år når tillatt CO<sub>2</sub>-konsentrasjon endres fra 800 ppm til 1000 ppm. Hvis datasettet i Tabell 9-10 undersøkes kan det sees direkte at energibehovet til ventilasjonsvifter hovedsakelig påvirkes av maksimal luftmengde og samtidighet i rommet.

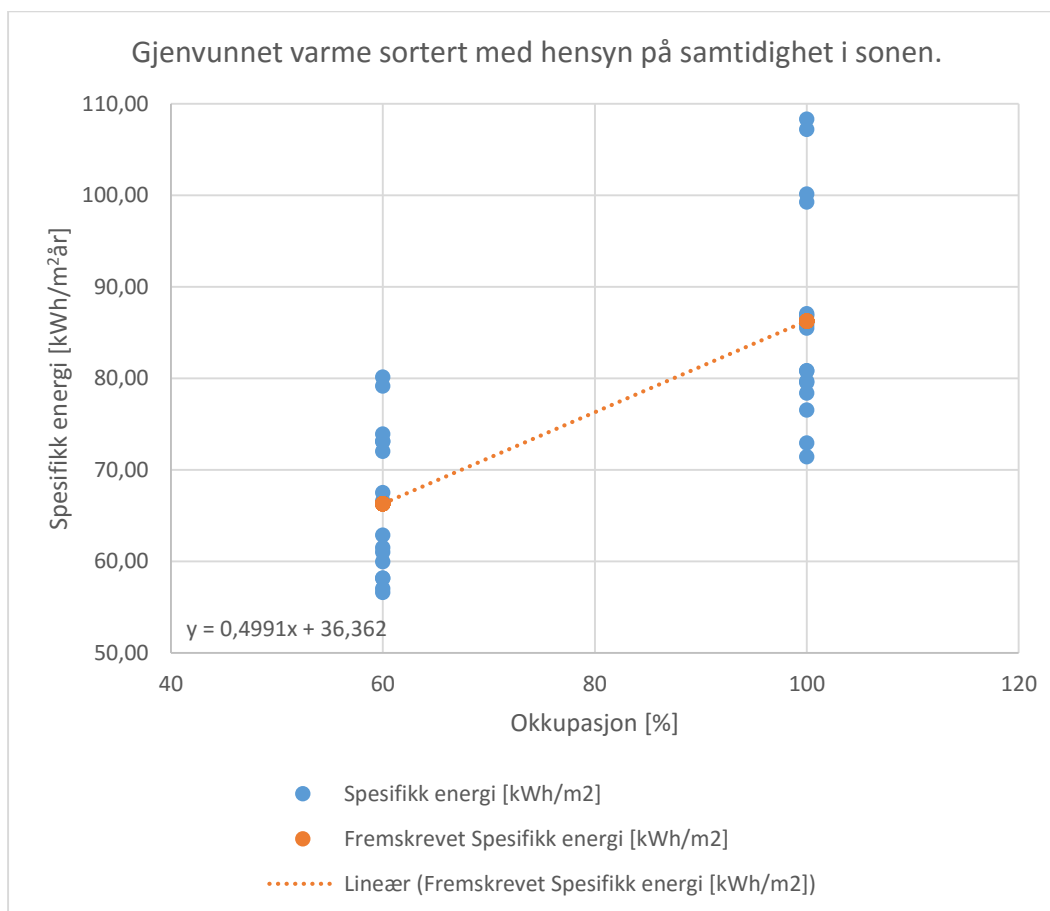


Figur 9-16 Høyere tillatt CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i sonen fører til lavere energibehov.

Virkningsgrad til varmegjenvinner påvirker ikke energibehovet til ventilasjonsvifter. R<sup>2</sup> for virkningsgrad var i dette tilfellet 0,005 %, denne påvirkningen er neglisjerbar.

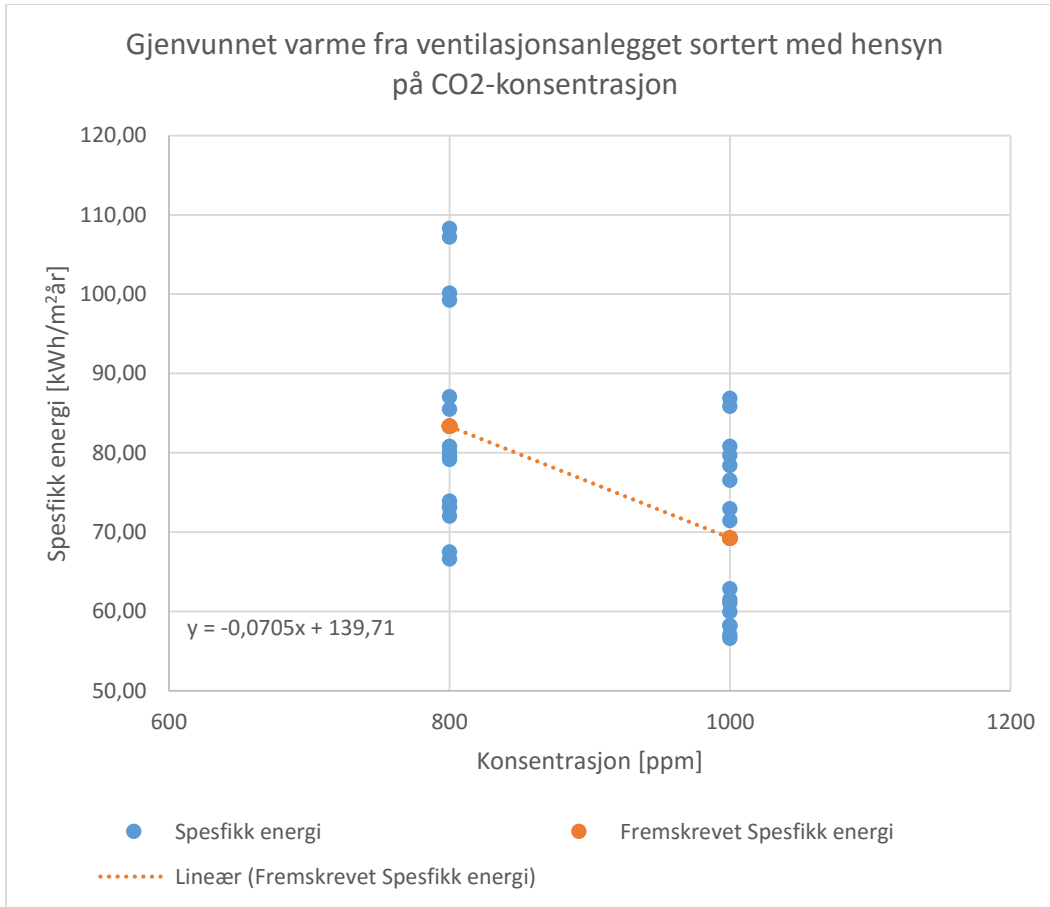
### 9.3.5 Gjenvunnet ventilasjonsvarme

Av de undersøkte parameterne er det okkupasjonsprosenten som har størst påvirkning på mengden energi som kan gjenvinnes i ventilasjonsanlegget, se Figur 9-17. Rundt 52,0 % av variasjonen i gjenvunnet energi skyldes å øke antall personer i sonen fra 60 % til 100 % av full personbelastning. Total økning i gjenvunnet varme per år når samtidigheten øker fra 60 % til 100 % er 20,0 kWh/m<sup>2</sup>år.



Figur 9-17 Mengden personer tilstede har stor innflytelse på hvor mye varme som gjenvinnes i ventilasjonsanlegget.

Endring i maksimal tillatt CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i sonen fra 800 ppm til 1000 ppm fører til en nedgang i gjenvunnet varme i ventilasjonsanlegget på 14,1 kWh/m<sup>2</sup>år, se Figur 9-18. Omtrent 25,9 % av variasjonen i observasjonene av gjenvunnet termisk energi kommer som følge av å endre maksimal tillatt CO<sub>2</sub>-konsentrasjon.



Figur 9-18 Økt tillatt CO<sub>2</sub>-konsentrasjon rommet fører til at mindre varme blir gjenvunnet i ventilasjonsanlegget.

Variasjonen i gjenvunnet energi skyldes i mindre grad virkningsgraden på varmegjenvinneren. R<sup>2</sup> er på 4,1 %. Den gjennomsnittlige økningen i gjenvunnet energi tilsvarer 5,6 kWh/m<sup>2</sup>år.



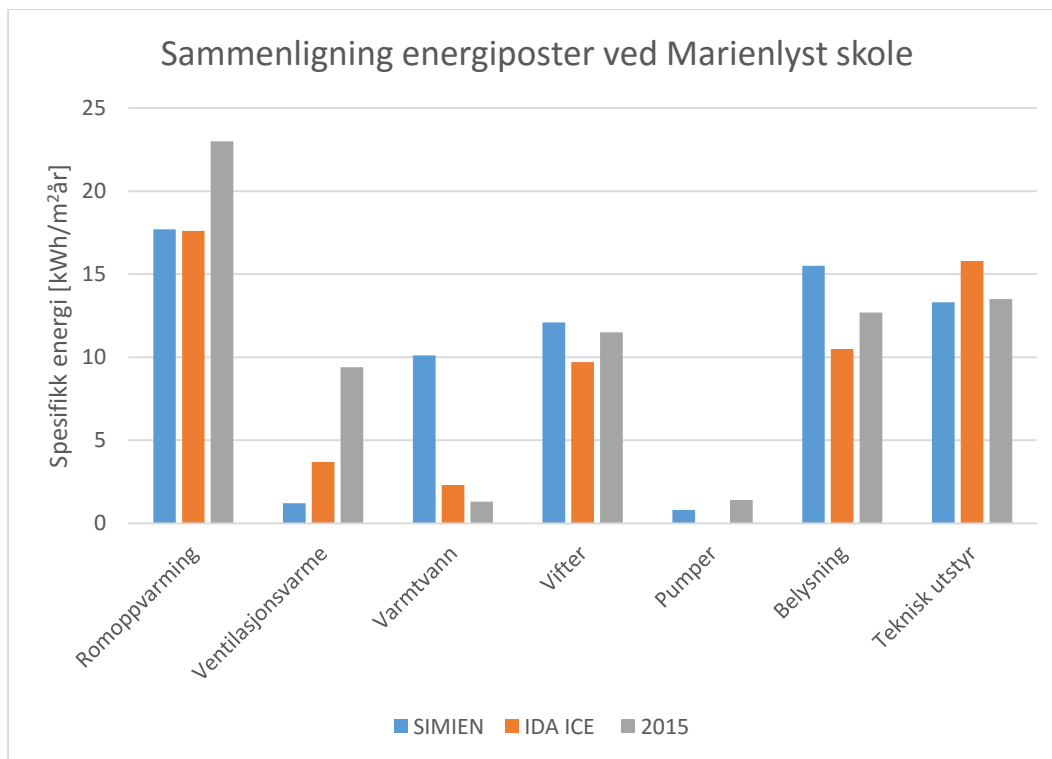
## 9.4 SAMMENLIGNING AV RESULTAT OG DATA FRA ENERGIOPPFØLGINGSSYSTEM

I dette kapitlet sammenlignes data fra energioppfølgingsystemet med resultat fra tidligere simuleringer og IDA ICE modellen.

### 9.4.1 Sammenligning av energiregnskap

For Marienlyst sammenlignes simulert energibehov fra modellen laget i SIMIEN i 2010, med simulert energibehov i IDA ICE og målt energibruk ved skolen. Kjøling og utendørs energibehov er ikke inkludert i denne sammenligningen. Sammenligningen kan sees i Figur 9-19.

Det kan sees at begge modellene avviker en del fra målt energibruk på de forskjellige energipostene. For romoppvarming er modellene nærmest like, men har beregnet for lavt energibehov i forhold til målt energibehov til romoppvarming. SIMIEN og IDA ICE modellene har begge beregnet et energibehov rett i underkant av 18 kWh/m<sup>2</sup>år, mens målt energibehov for romoppvarming i 2015 lå på 23 kWh/m<sup>2</sup>år. Det er en differanse på 5 kWh/m<sup>2</sup>år eller tilsvarende omtrent 32 000 kWh/år. Modellen i SIMIEN har beregnet et energibehov til ventilasjonsvarme som må økes med en faktor syv for å være på samme nivå som målt energibehov. Energiforbruket beregnet av modellen i IDA ICE må økes med en faktor 2,5.

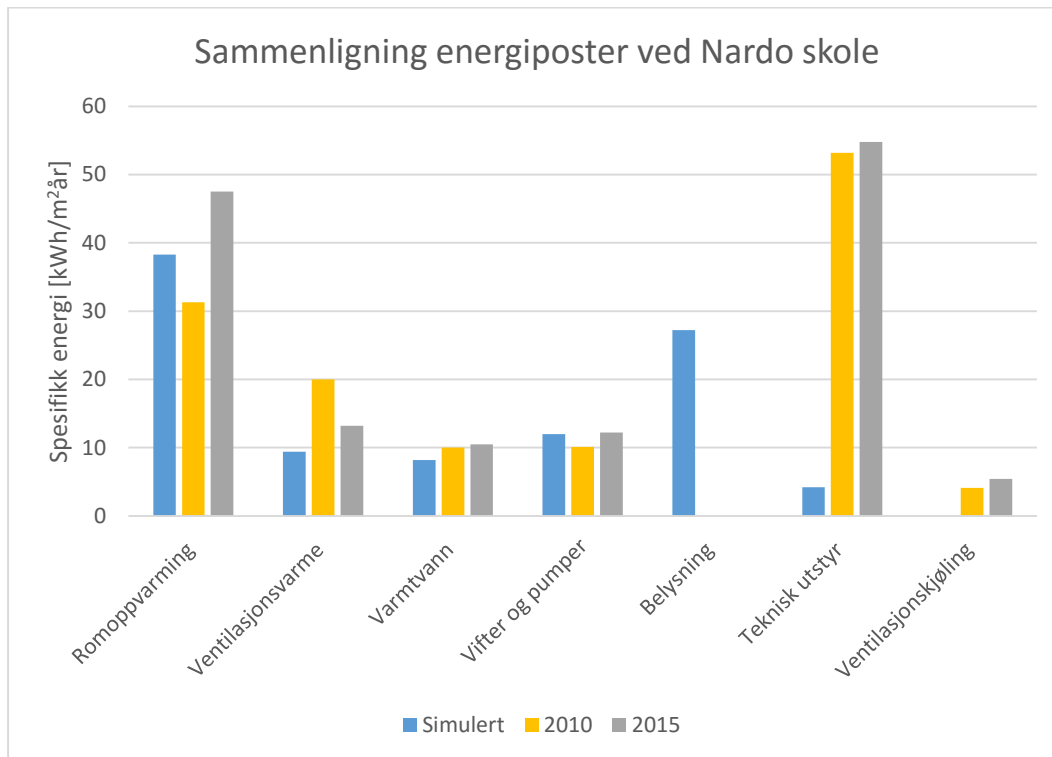


Figur 9-19 Sammenligning av simulert og målt energiregnskap for 2015 for Marienlyst skole.

I Figur 9-20 sammenlignes simulert energibruk fra 2010 med målt energibruk fra 2010 og 2015. Målt energi for 2010 er inkludert for å kunne se om det har vært en utvikling siden Hestad evaluerte energibruken i 2010. Energiforbruket viser null målt energibehov, det er fordi energi-

behovet til belysning som nevnt tidligere ikke har egne målere. Energibehov til belysning havner derfor inn under energiposten for teknisk utstyr. Målt energibehov i 2015 jevnt over ligger høyere enn simulert energibehov.

På energipostnivå har det ikke vært mange endringer i energibruk ved Nardo skole når energibehovet for 2010 sammenlignes med energibehovet i 2015. Energipostene romoppvarming og ventilasjonsvarme er de eneste det kan sees en tydelig endring i. Energibehovet til romoppvarming har økt med 16,2 kWh/m<sup>2</sup>år, mens energibehovet til ventilasjonsvarme har blitt redusert med 6,8 kWh/m<sup>2</sup>år.

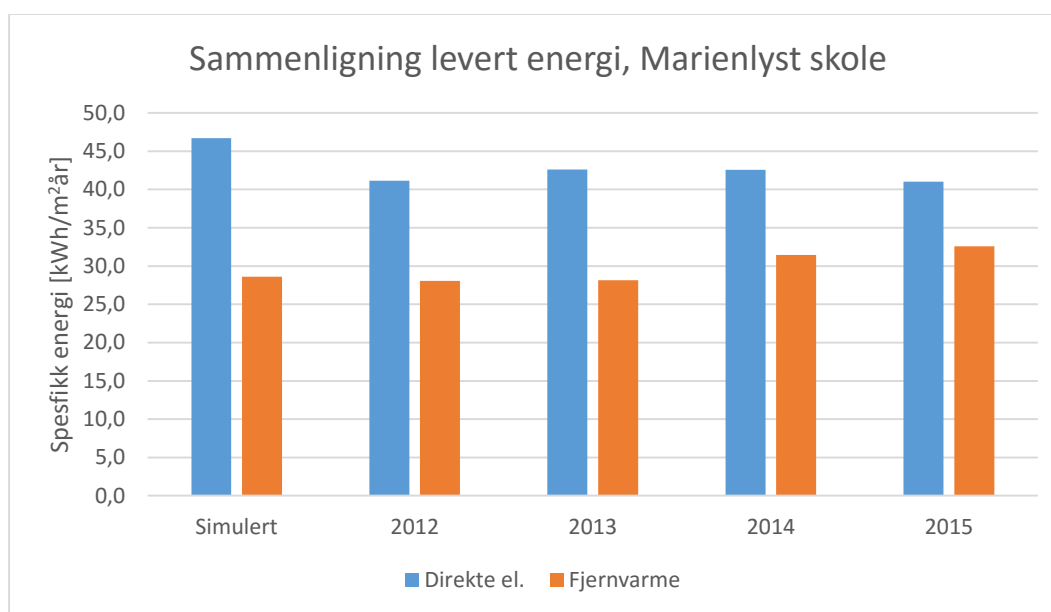


Figur 9-20 Sammenligning av simulert og målt energiregnskap for 2015 for Nardo skole.

### 9.4.2 Sammenligning av levert energi

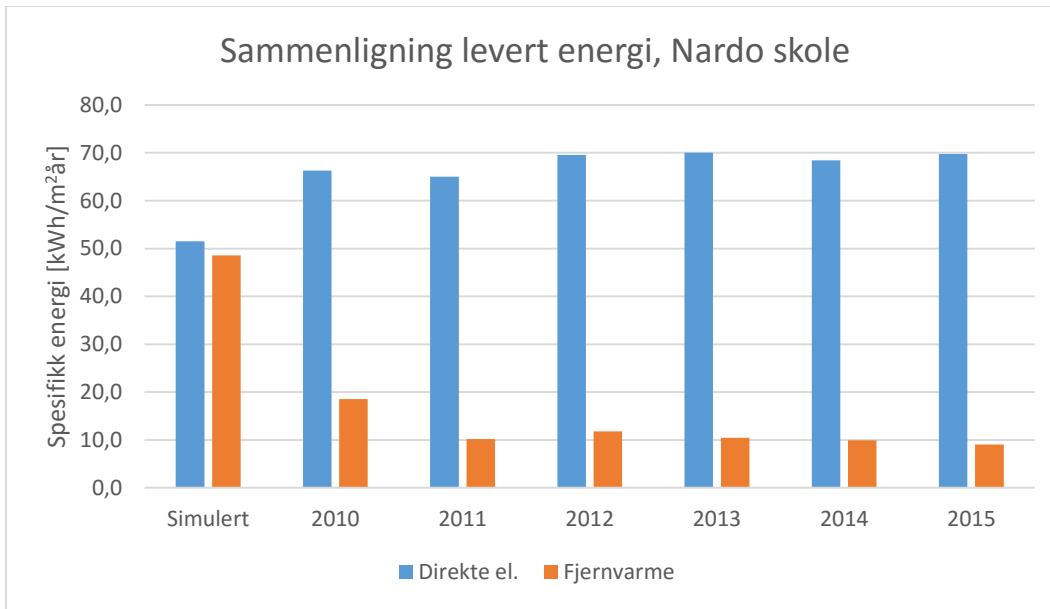
Det er kun simuleringer fra da skolene ble bygget som sammenlignes med levert energi i dette kapitlet. Levert energi fra IDA ICE simuleringen vil ikke være representativ fordi virkningsgraden på alle produksjonsenhetene er satt til én som nevnt i kapittel 6.4.

Figur 9-21 viser simulert energi for Marienlyst skole i kolonnene lengst til venstre, sammenlignet med målt levert energi for 2012-2015 i kolonnene til høyre. Marienlyst skole bruker mindre direkte elektrisitet enn simulert, men det har de siste årene vært en økning i levert fjernvarme.

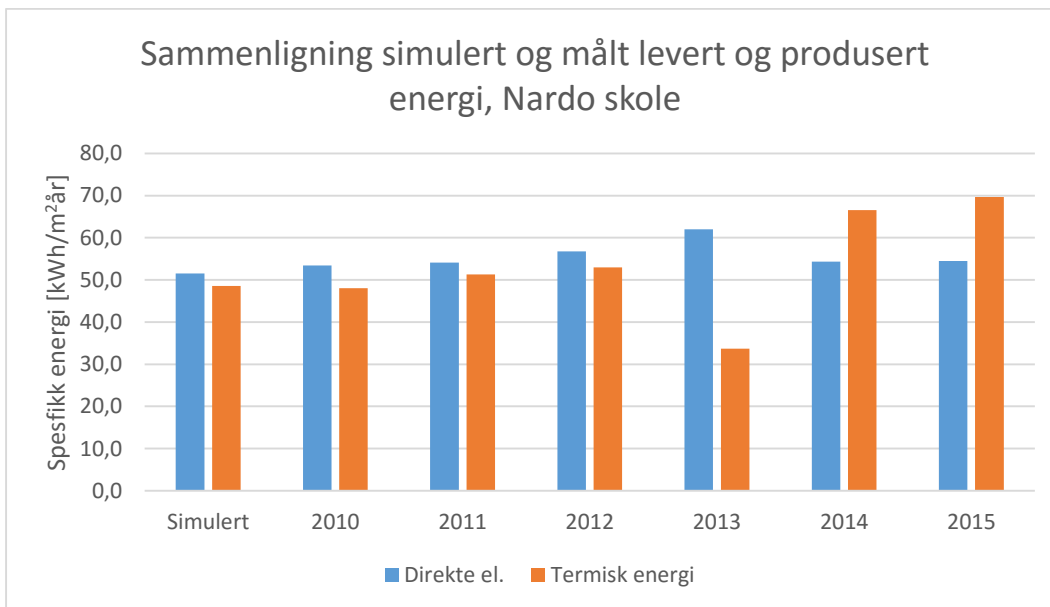


Figur 9-21 Simulert levert energi sammenlignet med målt levert energi for Marienlyst skole

Figur 9-22 viser simulert levert energi fra fjernvarme og direkte elektrisitet i kolonnene til venstre, og faktisk levert energi for årene 2010-2015 i kolonnene til høyre. I modellen gjort tilgjengelig ser det ut som det ikke er tatt hensyn til at skolen er utstyrt med en varmepumpe. Derfor er det i Figur 9-23 presentert tilgjengelig termisk energi og direkte elektrisitet utenom elektrisitet til varmepumpen. Ser at behovet for termisk energi stemmer bedre overens med simulert levert energi enn faktisk levert energi.



Figur 9-22 Simulert levert energi sammenlignet med målt levert energi for Nardo skole



Figur 9-23 Simulert levert energi sammenlignet med målt levert og produsert energi for Nardo skole

## 10 DISKUSJON

---

I dette kapitlet skal teori, litteraturstudie og funn og resultater gjort under arbeidet med denne masteroppgaven settes i sammenheng. I tillegg vil feilkilder oppdaget i modellen av Marienlyst skole laget i IDA ICE diskuteres med hensyn på konsekvensene for den videre analysen.

### 10.1 AVVIK MELLOM MÅLT OG BEREGNET ENERGIBRUK

Som funnet i forarbeidet i prosjektoppgaven forekommer det avvik mellom målt og beregnet energibruk ved de energieffektive skolene Marienlyst og Nardo. I dette kapitlet vil mulige årsaker til avvikene presentert i kapittel 9.4, diskuteres og settes i sammenheng med litteratur og annen informasjon presentert om skolene i denne masteroppgaven.

Det ble valgt å sammenligne simulert energibehov på energipostnivå med målt energibehov for 2015 ved begge skolene. Sammenligningen grafisk for ett år fordi det var mer oversiktlig, året 2015 har de nyeste og dermed mest aktuelle målingene å sammenligne med.

#### 10.1.1 Marienlyst skole

Fra Figur 9-19 kan det sees at det er avvik på simulert og målt energibehov til romoppvarming. I modellen i IDA ICE ble det forsøkt tatt hensyn til reelle driftsstrategier og settpunkttemperaturer som har blitt benyttet siden bygget ble tatt i bruk. Likevel viser simuleringen lavere energibehov enn bygget faktisk bruker.

Både modellen i IDA ICE og SIMIEN har brukt referanseklime Oslo, selv om Drammen har noe lavere månedsmiddeltemperatur enn referanseklimate. Til tross for at Drammen også ligger i enden av en fjord, ligner klimate i Drammen mer ett innenlandsklima enn klimate i Oslo. Vindforhold, solinnstråling og temperatur varierer noe, og vil dermed føre til avvik i modellen i forhold til faktisk energibruk. En årsak til avvik på oppvarmingsbehov kan dermed være at klimafilen benyttet i modellen forutsetter noe mildere klima enn det som faktisk er på stedet. En måte det kommer tydelig frem på er at det ble kommunisert av driftspersonalet ved Marienlyst skole at gulvarmeanlegget vanligvis ikke ble tatt i bruk før i starten av oktober. I modellen ble datoen for når gulvvarmeanlegget tas i bruk satt til 15. september. Figur 9-2 (s. 74) viser at i september, når varmeanlegget skrur på, oppnås en svært høy effekttopp. Dette kan tyde på at det allerede har vært et oppvarmingsbehov ved skolen som ikke er blitt møtt. Dette støttes opp av Figur 9-5 (s. 76) som viser at temperaturen i sonen faller ned mot 19 °C i september. Dette kan forsterkes av at bygget har mye termiskmasse i form av blant annet betong i etasjeskillere. Det vil ta en del tid å varme opp all den termiske massen om den har rukket å kjøles ned dersom oppvarmingsbehovet ikke har blitt tilstrekkelig dekket i ukene før. For å kunne avgjøre om klimafilen er skyld i noe av avviket mellom målt og beregnet energibruk bør en klimafil for Drammensområdet lages. Da kan resultatene for en modell av skolen med de to forskjellige klimafilene sammenlignes.

Tabell 8-1 (s. 61) viser at energibruken til romoppvarming lå på et jevnt nivå fra 2012 til 2014, mens energibehovet økte i 2015. For ventilasjonsvarme kan det sees at energibehovet økte for hvert år fra 2012 til 2014, før det kom en liten nedgang i energibehov i 2015. Trenden med økende total energibehov for oppvarming kommer tydelig frem i Figur 8-3 (s. 63). Spesielt fra 2013 til 2014 er det en økning i energibehov til oppvarmingsformål. Økningen i total energibruk for skolen skyldes stort sett de termiske energipostene.

I 2014 og 2015 har takvarme i amfiet blitt tatt i bruk. Takvarmeanlegget har vært avslått siden første fyringssesong 2010/2011, da driftspersonellet så at takvarmeanlegget brukte mye energi og at det ikke var behov for det for å opprettholde en behagelig innnetemperatur. Vintersesongen i 2012/2013 var kald, spesielt sammenlignet med 2014 og 2015. Hvorfor takvarmeanlegget er tatt i bruk, når innnetemperaturen har blitt holdt innenfor settpunktene selv i kaldere år, er ukjent. Thunshelle fant ved hjelp av spørreundersøkelser ut at brukerne av Marienlyst skole var fornøyde med innnetemperaturen i slutten av 2011, da var ikke takvarmeanlegget i drift. Takvarmeanlegget skal egentlig være overflødig, da det kun ble installert fordi det var en del av anbudsrunder fra før skolens energiambisjoner ble økt til passivhusnivå. Da den varmetekniske standarden til bygget ble forbedret, var det med andre ord ikke lenger behov for det ekstra takvarmeanlegget.

Potensiell feildrift av takvarmeanlegget ved skolen kan skyldes manglende opplæring av driftspersonalet med hensyn på anlegget og hvordan den fungerer. Dersom anlegget ikke har vært i bruk på flere år, kan det tenkes at kunnskapen om hvordan anlegget fungerer og hvordan bruken av det påvirker energiregnskapet ved skolen ikke er vedlikeholdt. Etter samtale med Drammen Eiendom var inntrykket at de ikke var klar over at takvarmeanlegget var i drift. Dette tyder på at energioppfølgingssystemet ikke har blitt utnyttet til det fulle, da de kunne sett at takvarmeanlegget ble tatt i bruk allerede i starten av 2014. Det anbefales at endringer i driftsstrategi loggføres i energioppfølgingssystemet og begrunnes, slik at det er mulig å spore hva som er gjort når og hvorfor. At takvarmeanlegget er tatt i bruk kan skyldes en driftsfeil, der takvarmeanlegget er skrudd på ved en feil og ikke har blitt oppdaget. En annen mulig forklaring kan være at driftsoperatør har mottatt klager på at det er kaldt fra brukerne, og dermed skrudd det på.

Resultatene og målingene for energibruk til ventilasjonsvarme i Figur 9-19 (s. 92) viser at både modellen laget i SIMIEN og IDA ICE har beregnet for lavt energibehov til oppvarming av ventilasjonsluft sammenlignet med reelt behov. Etter personlig kommunikasjon med Geir Andersen, teknisk leder ved Drammen Eiendom, kom det frem at under prosjekteringen av skolen ble det antatt at luftmengdene i ventilasjonsanlegget skulle kjøres ned mot et minimum når det er kaldt ute for å spare energi til oppvarming av ventilasjonsluft. Drift av ventilasjon gjøres ikke med energibehov som en begrensende faktor. Andersen påpeker at dette er en skole, og god luftkvalitet er prioritert høyt. Det er en av årsakene til at maksimal tillatt CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i sonene er satt til 800 ppm i stedet for tillatte øvre grense på 1000 ppm. Fra Figur 9-13 (s. 86) vises det at å endre maksimal tillatt CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i sonen fra 800 ppm til 1000 ppm potensielt kan føre til betydelig høyere energibruk. Driftsorganisasjonens valg av å sette styringsparameteren maksimal tillatt CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i sonen til 800 ppm, er ikke basert på manglende kunnskap om

innvirkning på energibruk, men ønske om godt inneklima. Ved Marienlyst skole kunne i stedet en del av avviket mellom målt og beregnet energibruk til ventilasjonsvarme blitt unngått dersom de som prosjekterte bygget og utførte energiberegningene ble gjort oppmerksomme på at bra inneklima kom til å bli høyt prioritert. Minstekravene ville ikke være godt nok siden det er et ønske om å oppnå best mulig luftkvalitet for å fremme et godt læringsmiljø. Ifølge Andersen har det aldri vært aktuelt å redusere luftmengder for å spare energi på bekostning av inneklima. Dette er et godt eksempel på at driftsorganisasjonen kan komme med gode og viktige innspill med hensyn på hvordan et bygg faktisk skal brukes, og hva som er viktig for brukerne av bygget.

I Figur 9-19 (s. 92) kommer det tydelig frem at energibehovet til varmtvann ble feilberegnet da energiberegninger ble utført i 2010. Verdien benyttet i SIMIEN-modellen tilsvarer standardisert inndataverdi for energibehov til varmt tappevann for skolebygninger i tråd med NS 3031. Den verdien er basert på energibehovet til varmtvann i en gjennomsnittlig skole i Norge. En gjennomsnittlig skole i Norge har ofte en gymsal med tilhørende dusj- og garderobeanlegg, som øker energibehovet til varmtvann. På Marienlyst skole er det derimot ikke noe garderobeanlegg. Det er i hovedsak bare skolekjøkkenet og varmtvann til håndvask som er bidragsytere til energibehovet for varmtvann ved skolen. Avviket mellom målt og beregnet energibruk til varmtvann kunne vært unngått dersom det ble tatt høyde for at varmtvannsforbruket ved Marienlyst skole ville være betydelig lavere enn ved en gjennomsnittlig skole.

Ukorrigerede data fra energioppfølgningssystemet ble fremlagt for å kunne vise hvor mye temperaturkorrigering kan påvirke analysen av energibruken. Ukorrigerede data for Figur 8-3 (s. 63) kan sees i Figur 8-4 (s. 64). Der kan det sees at energibruken til oppvarmingsformål i 2014 og 2015 var lavere enn energibruken i de foregående årene. De ukorrigerede dataene gir et helt annet bilde av energibruken enn de korrigerede. Dette viser hvor viktig det er å finne gode temperaturkorrigeringsmetoder, fordi de potensielt kan ha stor innvirkning på analysen av energibruk.

I kapittel 5.2.5 blir det nevnt at det ble oppdaget feildrift av varmtvannsberederne under befaringen gjennomført i april. Fordi berederen hele tiden veksler varme med nærvarmenettet via forvarmingsveksleren kan det ha forekommet at berederen i perioder faktisk avgir varme til nærvarmenettet. Dette er fordi temperaturene i nærvarmenettet er utetemperaturkompensert, og kan i perioder ha lavere temperatur enn settpunktet i forvarmingsberederen. Driftspersonale skal iverksette tiltak for å hindre at feildrift som dette skjer igjen. Innvirkningen av denne driftsfeilen på energimålingene er at dette vil heve returtemperaturen til nærvarmekursen, noe som resulterer i at måleren på denne kursen vil vise et lavere energibruk enn det som er reelt. Med hensyn på videre analyse av data fra energioppfølgningssystemet, vil det være knyttet noe større usikkerhet til energibruken til forvarming av varmt tappevann som er basert på differansen mellom de to hovedmålerne.

Som en kuriositet ble det valgt å sjekke energioppfølgningssystemet for å se om det var en forskjell på energibehovet til det elektriske varmeelementet i varmtvannsberederen etter befaringen 20. april i år. Det ble da oppdaget at måleren til det elektriske varmeelementet ikke registrerte noe energibehov etter 20. april i det hele tatt. Drammen Eiendom ble kontaktet, og det skulle

undersøkes videre. Dette er et eksempel på at driftspersonalet ikke har kunnet nok om hvordan det tekniske anlegget fungerer, slik at det har skjedd en feil.

Energibruken til forvarming av varmt tappevann ble ikke funnet i energioppfølgingssystemet. Kun energibruken til det elektriske varmeelementet i varmtvannsberederen registreres i energioppfølgingssystemet. Ifølge verdiene for energibehov til varmt tappevann oppgitt i Tabell 8-1 (s. 61) og Tabell 8-2 (s. 66), kan det dermed potensielt brukes dobbelt så mye energi på oppvarming av varmtvann enn det som kommer frem i energioppfølgingssystemet. Energibruken til forvarming av varmtvann blir registrert som levert fjernvarme til bygget, men det blir ikke tildelt en energipost og ser i stedet ut som tap i varmeanlegget. Konsekvensen av dette er at det blir vanskeligere å følge opp om det skjer endringer i energibruken til varmtvann, som for eksempel om det elektriske varmeelementet er skrudd på i begge berederne eller ikke.

I Figur 9-21 (s. 94) kommer det frem at levert energi til skolen stemmer forholdsvis godt overens med simulert levert energi fra SIMIEN-modellen fra 2010. Skolen bruker noe mindre direkte elektrisitet enn simulert, og noe mer fjernvarme. Økt termisk energibehov reflekteres i økt mengde levert energi til skolen.

#### 10.1.2 Nardo skole

Energibruken på Nardo skole fra 2013 oppgitt i energioppfølgingssystemet viser feil totalsum. Måledata fra juli til slutten av desember mangler og energibruken er derfor satt til 0 kWh. 2013 blir derfor ikke lagt mye vekt på med hensyn til videre analyse. Levert energi til bygget er, som vist i Figur 8-7, på samme nivå som for de andre årene, dermed kan det antas at energibruken mest sannsynlig har fulgt samme mønster som de andre årene.

Da energibehovet til varmepumpen ble temperaturkorrigert ble det ikke tatt hensyn til at varmepumpen også forsyner forvarming av varmtvann, som ikke skal temperaturkorrigeres. Den elektriske energibruken til varmepumpen burde ideelt sett blitt vektet med hensyn på hvor mye av varmen produsert av varmepumpen som ble benyttet til hver energipost. I de månedene der energibruken temperatur-korrigeres utgjorde varmtvann kun 1-5 % av total produsert varme fra varmepumpen. Likevel utgjør det potensielt en forskjell når energibruken sammenlignes fra år til år.

Tabell 8-3 (s. 66) viser at el-spesifikke energiposter og varmtvann har holdt seg jevnt fra 2010 og frem til 2015, dette vises også i Figur 9-20 (s. 93). At energibehovet til ventilasjonsvifter har holdt seg forholdsvis jevnt tyder på at luftmengdene behandlet av ventilasjonsanlegget har holdt seg på et jevnt nivå i løpet av perioden 2010-2015. Energibehovet til vifter er noe høyere i 2014, det er høyere energibruk i sommermånedene enn andre år. Dette kan skyldes en driftsfeil, der det ble glemt å nedjustere luftmengdene i sommermånedene når skolen ikke er like mye brukt. Eventuelt kan det skyldes at skolen faktisk ble tatt i bruk i større grad den sommeren, som da reflekteres i høyere energibruk til vifter. På grunn av små endringer i energibehov på nevnte poster blir det antatt at avvikene mellom målt og beregnet energibruk på disse energipostene har samme årsak som funnet av Hestad i 2010.



Figur 8-10 (s. 69) og Tabell 8-3 (s. 66) viser at energibehov til oppvarmingsformål totalt sett har økt siden 2010. Det er spesielt energibehov til romoppvarming som øker kraftig i 2014 og 2015. Det er interessant å sammenligne økningen i energibruk med levert energi til bygget. Figur 8-7 (s. 68) viser at selv om energibruken øker, øker ikke total levert energi til bygget nevneverdig. Dersom levert elektrisitet deles opp i elektrisitet til varmepumpen og øvrig direkte elektrisitet kan det sees at andelen energi som går til varmepumpen øker i 2014 og 2015. Dette gjenspeiles igjen i Figur 8-8 (s. 68) der det sees at produsert varme fra varmepumpen er høyere i 2014 og 2015 enn i de tidligere årene. Årsaken til økningen i energibehov til romoppvarming er ikke funnet i denne oppgaven. Det kan skyldes driftsfeil, eller lite energieffektiv brukeratferd.

Sammenligningene av *simulert levert energi* med *målt levert energi* og *målt levert og produsert energi*, henholdsvis Figur 9-22 (s. 95) og Figur 9-23 (s. 95), viser at det i simuleringen ikke er tatt hensyn til varmepumpen. Når det tas hensyn til at det produseres varme i varmepumpen blir avviket mellom simulert levert energi til direkte elektrisitet og termisk energi mindre. Likevel er det tydelig at det er en økning i levert termisk energi fra 2010 og frem til 2015, noe som stemmer overens med funnene i avsnittet over.

Hestads funn av at brukerne åpnet vinduene for å luften, men glemte å lukke de, er et godt eksempel på brukeratferd som kunne vært forbedret med opplæring. Et åpent vindu som tilfører kald frisk luft kan kjennes svært behagelig. Denne handlingen er gjerne motivert av personlig komfort, og ikke med tanke på energibruk. Brukerne er nok ikke tilstrekkelig klar over hvor stor innvirkning det kan ha på energibruken å la vinduet stå åpent, mens radiatorene kjører for å sikre behagelig innetemperatur.

Figur 8-9 (s. 69) viser at det fremdeles er noe problemer med målerne ved Nardo skole. I 2010 og 2012 er målt energibruk på skolen høyere enn levert og produsert energi til sammen. Det er ikke mulig for skolen å bruke mer energi enn det som er tilgjengelig, dette er en sterk indikasjon på at det var noe galt med en eller flere målere. I 2013 mangler det som sagt måledata for et halvt år. I 2014 og 2015 er det et forholdsvis stort avvik mellom brukt og levert energi, cirka 12 %. Avviket kan forklares med tap i de tekniske anleggene, eller med unøyaktige målere. Mest sannsynlig en kombinasjon av begge. På grunn av et uoversiktlig energioppfølgingssystem har det vært vanskelig og tidkrevende å etterprøve energibruken. Energiregnskapet som fås ut er ikke delt inn i logiske energiposter. Produsert, levert og brukt energi oppgis om hverandre. Målerne har heller ikke navn som umiddelbart gir leseren informasjon om hvilken energibruk som faktisk måles. Mye av grunnen til et rotete energioppfølgingssystem er at målerstruktur ikke ble tatt hensyn til før etter at alt av termiske og elektriske kurser var lagt. Dette understreker viktigheten av å tenke på målerstruktur tidlig i byggeprosjektet. Et godt strukturert og velfungerende energioppfølgingssystem har blitt trukket frem som avgjørende for energieffektiv drift i litteraturen.

Kjølebehovet til datarommet ble ikke tatt hensyn til da energibehovet til Nardo skole ble beregnet i 2008. Tørrkjøleren benyttet i datarommet ble ikke installert før etter bygget ble tatt i bruk, og brukerne klagde på at det ble for varmt. Det var kjent at rommet skulle brukes som datarom da beregningene ble utført, hvorfor dette ikke ble tatt hensyn til er uklart. Da kunne kjølebehovet blitt

oppdaget før, og rommet kunne for eksempel blitt utformet annerledes. Avviket i energiregnskapet på 2,3-5,4 kWh/m<sup>2</sup>år kunne vært unngått. Dette er et eksempel på at reelle driftsforhold ikke blir tatt hensyn til under prosjektering, noe som kan medføre løsninger som ikke er optimale med hensyn på energibruken tilbygget.

Enkelte av løsningene valgt ved Nardo skole er ikke optimale med hensyn på å oppnå lavest mulig energibruk. At det brukes elektrisitet til snøsmelting i passasjen mellom skoledelen og barnehagen er unødvendig bruk av høykvalitets energi. En løsning som kunne spart mye energi hadde vært å legge returrørene fra romoppvarming i byggene i passasjen istedenfor. Dette er lavverdi energi som ikke kan benyttes til noe annet, men som er god nok til å smelte snø og is i passasjen. I følge Hestad ligger varmesentralen praktisk til i forhold til passasjen for at denne løsningen kunne fungert godt.

## 10.2 DRIFT OG BRUKERATFERD

Ved bruk av kontinuerlig funksjonskontroll kunne både tilfellet med takvarmeanlegget og varmtvannsberederne ved Marienlyst skole blitt oppdaget tidligere. Drammen Eiendom har fokus på energibruk og oppfølging av bygningsmassen, men de har også ansvar for svært mange bygg. Det er ressurskrevende å gå inn i hvert energioppfølgingsystem for hvert bygg og sjekke at alle tekniske anlegg driftes optimalt. Skal man ha kapasitet til å følge opp en så stor bygningsmasse som en kommune gjerne har ansvar for, er det viktig å ha gode strategier og rutiner for oppfølging. Automatisert avvikskontroll og alarmer er et verktøy som kan bidra til å forenkle oppfølgingen for driftsorganisasjonen.

Drammen kommune tenker helhetlig på energibruken i kommunen. Nærvarmenettet på Strømsø er et godt eksempel på hvordan fokus på energiledelse kan spare energi. Kommuner har et spesielt godt utgangspunkt for å ha godt utbytte av veletablert energiledelse, nettopp fordi de har driftsansvar for mange bygg. Da skolen ble bygget så man potensialet til å hente ut overskuddsvarme fra skolen og utnytte det i idrettsanlegget tilknyttet samme nærvarmenett. I løpet av de siste fire årene har det i snitt blitt hentet ut cirka 40 000 kWh varme per år. Dette er varme som ellers hadde blitt dumpet over tak.

Jamfør kapittel 4 er det ikke tvil om at brukeratferd påvirker energibruken i en bygning. I et skolebygg vil den største andelen av brukerne være barn. I en klasseromssituasjon vil derimot elevenes innflytelse på energibruken begrenses, fordi de har faste rammer som styres av læreren. Dette vil spesielt gjelde på barneskoler der læreren i enda større grad dikterer hva som foregår og hvordan det skal gjøres. Om vinduer skal åpnes, termostaten justeres eller pc'er skal brukes vil som regel bestemmes av læreren og ikke elevene. Derfor kan det argumenteres for at det er ekstra viktig at lærerne har et bevisst forhold til hvordan deres og elevenes handlinger påvirker energibruken. Opplæring i energieffektiv oppførsel er selvfølgelig fortsatt viktig å lære i en skolesituasjon, da kunnskap barna tilegner seg på skolen tas med inn i andre arenaer i livet. Mulighet til å få tilbakemelding om hvordan energibruken ved skolen har vært kan være med å motivere til mer energieffektive valg.

I Norge er man generelt veldig glad i å åpne vinduer for å få inn frisk luft. I et moderne energieffektivt bygg vil det å åpne vinduet derimot for eksempel kunne føre til økt energibruk fordi nyttig varme dumpes i stedet for å gjenvinnes i varmegjenvinneren. Hvis ventilasjonsanlegget og solskjerming er godt prosjektert skal de tekniske anleggene klare å fjerne overskuddsvarme og forurensning uten at det er behov for å luften. Mange er ikke klar over hvordan lufting påvirker energibruken, og at det kan være treghet i ventilasjonsanlegget. Dersom de er tålmodig bedres innklimaet uten behov for lufting. Dette er et godt eksempel på hvordan opplæring av brukere er viktig for å sikre ønsket brukeratferd.

### 10.3 PARAMETERSTUDIE

Av de fem datasettene som ble valgt å undersøke er fire knyttet til oppvarmingsbehov, og tre til energiflyt og energibehov i ventilasjonsanlegg. De ble valgt fordi det var disse energipostene som det var knyttet avvik til for Marienlyst skole. På grunn av en feil i noen beregninger som modellen i IDA ICE er basert på, som ikke ble fikset før etter simuleringene benyttet i regresjonsanalysen var kjørt kan ikke resultatene fra regresjonsanalysen knyttes direkte opp mot Marienlyst skole. Resultatene kan derimot benyttes for å si noe generelt om samspillet mellom parameterne og hvordan de påvirker energibehovet i et energieffektivt bygg.

Virkningsgraden på varmegjenvinneren var den parameteren som hadde størst innvirkning på oppvarmingsbehovet i casene undersøkt i denne oppgaven, dette er konsekvent med funn i litteraturstudiet. I en stor bygning med passivhusstandard og høye krav til inneklima vil det være store luftmengder som skal forflyttes gjennom ventilasjonsanlegget. Analysen av resultatene videre er basert på at tilluftstemperaturen er konstant fra case til case. Da varmegjenvinnerens virkningsgrad ble endret fra 80 % til 88 % førte det til en merkbar endring i energibehovet i datasettene: levert fjernvarme, ventilasjonsvarme og gjenvunnet varme. Når virkningsgraden var høy ble det gjenvunnet 5,6 kWh/m<sup>2</sup>år mer energi. Dette førte til en nedgang i energibehov til ventilasjonsvarme på 5,8 kWh/m<sup>2</sup>år, som igjen resulterte i at det kunne leveres 5,7 kWh/m<sup>2</sup> mindre fjernvarme til bygget per år. Virkningsgraden til varmegjenvinneren hadde neglisjerbar innvirkning på energibehovet til ventilasjonsvifter. Varmegjenvinneren er plassert foran varmebatteriet, og luftmengdene som kjøres gjennom ventilasjonsaggregatet påvirkes ikke av hvor mye varme som blir gjenvunnet. Resultatene her viser hvor viktig det er å benytte seg av en reell og realistisk virkningsgrad for varmegjenvinner i beregninger. Den gjennomsnittlige reduksjonen i energibehov til ventilasjonsvarme, grunnet forbedring av varmegjenvinneren i denne analysen, tilsvarer en fjerdedel av total tillatt energibehov til oppvarmingsformål i et skolebygg med passivhusstandard ifølge NS 3701. I denne analysen er det valgt verdier for virkningsgraden som spriker mye, men selv å bomme med noen få prosentpoeng kan føre til at avviket mellom målt og beregnet energibehov til ventilasjonsvarme øker mye.

Økt samtidighet i sonen viser en tendens til å redusere energibehovet til romoppvarming, og har neglisjerbar innvirkning på energibehov til ventilasjonsvarme. Mengden gjenvunnet energi i varmegjenvinneren øker derimot betydelig. Desto høyere samtidighet i rommet, desto flere varme

kropper bidrar til å tilgjengeliggjøre varme som kan gjenvinnes. Energibehovet til vifter øker også. Dette kan bety at selv om luftmengdene øker, som sees av økt energibehov til vifter, øker ikke energibehovet til oppvarming av ventilasjonsluft fordi det er mer varme tilgjengelig i rommet. Temperaturen på returluften til ventilasjonsaggregatet er høyere fordi det er flere personer i sonen, og dermed vil det være mulig å oppnå ønsket tilluftstemperatur kun ved hjelp av varmegjenvinneren. Dette viser at når det lages energimodeller av bygninger skal bygges er det viktig å ta hensyn til personbelastningen. Med hensyn på energiberegninger kan det være en fordel å ta hensyn til gjennomsnittlig samtidighet i rommet, da det vil påvirke hvor mye varme som er tilgjengelig i rommet. Varmelegget må kompensere for de manglende personene, og dette kan føre til avvik i beregnet energibehov til oppvarming.

Settpunkttemperatur i sonen har en forholdsvis stor påvirkning på energibehov til romoppvarming. Økningen til energibehov til romoppvarming er på gjennomsnittlig 4,5 kWh/m<sup>2</sup>år når settpunkttemperaturen økes én grad. Levert energi fra fjernvarme øker derimot kun 2,7 kWh/m<sup>2</sup>år i gjennomsnitt. Differansen skyldes blant annet at energibehovet til ventilasjonsvarme i varmebatteriet reduseres med 1,9 kWh/m<sup>2</sup>år. Redusert energibehov til ventilasjonsvarme skyldes ifølge resultatene i regresjonsanalysen ikke at det gjenvinnes mer varme i varmegjenvinneren. Det var antatt at det skulle vært tilfellet fordi det er mer varme tilgjengelig i rommet når settpunkttemperaturen øker. Energibehov til vifter går ned når temperatursettpunktet går opp, som tyder på at det er mindre luftmengder som sirkuleres. Når man sammenligner to og to case, der det kun er settpunkttemperatur i rommet som endres, er det en logisk sammenheng mellom tre av 16 par. I de tre tilfellene øker gjenvunnet varme i gjenvinneren omtrent tilsvarende energimengde som energibehovet til ventilasjonsvarme reduseres med. I de andre tilfellene synker energibehovet til ventilasjonsvarme, uten at dette dekkes av ekstra gjenvunnet varme.

Totalt sett øker behovet for levert energi når settpunkttemperaturen endres. Dette er en parameter som kan styres av driftsorganisasjonen sentralt, men det er heller ikke uvanlig at det finnes en termostat i rommet som brukerne kan justere selv. Å øke temperaturen med bare én grad fører til at energibehovet til romoppvarming øker betydelig, dette viser at valg av settpunkttemperatur bør være gjennomtenkt. Brukerne av et yrkesbygg som en skole vil som regel handle ut i fra motivasjon om personlig komfort. Det er lett å miste oversikt over det store bildet med hensyn på energibruk når brukerne som regel ikke har tilgang på informasjon om hvor mye energi som faktisk brukes. For å sikre at brukere, dersom de har tilgang på en termostat, tar energieffektive valg bør de enten få muligheten til å se hvordan det påvirker energibruken om de øker settpunkttemperaturen; eller så kan brukernes mulighet til å justere settpunkttemperaturen begrenses til for eksempel 1-2 °C.

Når maksimal tillatt CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i sonen øker senkes energibehovet til ventilasjonsvarme og viftebruk, samtidig som gjenvunnet energi i varmegjenvinner senkes. Alt dette er konsekvent med at luftmengdene som leveres til sonene reduseres. Maksimal tillatt CO<sub>2</sub>-konsentrasjon er parameteren som det behovsstyrte ventilasjonsanlegget reguleres etter, og sier noe om hvor dårlig luft som er tillatt. Når kravet er strengt, 800 ppm i denne analysen, forflyttes det større luftmengder gjennom ventilasjonsaggregatet enn hvis kravet er 1000 ppm. Dermed kan mer varme gjenvinnes

ved at større mengder av mediet varmen er tilgjengelig i passerer varmegjenvinneren. Som sett i Figur 9-11 (s. 85) er det fullt mulig å oppnå lavt energibruk med tillatt CO<sub>2</sub>-konsentrasjon på både 800 ppm og 1000 ppm, men når maksimum tillatt CO<sub>2</sub>-konsentrasjon er lav er det enda viktigere å ta hensyn til de andre parameterne. Hvilken grense CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen settes til kan reguleres av driftsorganisasjonen.

Parameteren maksimal luftmengde til soner har liten innvirkning på energibruken i de fem datasettene det er valgt å undersøke, med unntak av energibehov til vifter. Viftebruken påvirkes hovedsakelig av hvor store luftmengder som skal forflyttes i ventilasjonsanlegget. Hvor mye luft som forflyttes påvirkes av de forskjellige parameterne i modellen, mens maksimal luftmengde avgjør bare hvor stor kapasitet ventilasjonsanlegget har. Inneklimaet har ikke vært i fokus i denne oppgaven, men det kan nevnes at størrelsen på maksimal luftmengde til en sone bør defineres ut i fra hvor stor luftmengde som behøves for å sikre et godt inneklima.

#### 10.4 MODELLEN I IDA ICE

Modellen av Marienlyst skole fikk av ukjente årsaker 289 m<sup>2</sup> mindre gulvareal enn selve skolen, noe som tilsvarer et avvik på cirka 4,5 %. Det er forsøkt å ta høyde for dette avviket i videre analyse ved å benytte spesifikt energibehov. Den korreksjonen forutsetter derimot at energibruken i bygget reduseres proporsjonalt med størrelsen av bygget. Siden ingen andre elementer i modellen er nedskalert, er det forholdsvis stor sannsynlighet for at energibruken ikke reduseres proporsjonalt. Solinnstråling per m<sup>2</sup> og personer per m<sup>2</sup> vil for eksempel avvike mellom modell og virkelighet. Det er vanskelig å si noe om størrelsen på avviket grunnet denne feilen, men det fører til at knyttet noe mer usikkerhet til resultatene.

Forenklingen av soneinndelingen vil ikke påvirke oppvarmingsbehovet nevneverdig, men det kan ha innvirkning på inneklimaet og dermed energibehov til ventilasjon. I modellen, og ved den faktiske skolen, reguleres den behovsstyrte ventilasjonen med hensyn på temperatur og CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i sonen. Soneinndelingen valgt i modellen kan gi et feilaktig bilde av hvordan CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i de forskjellige sonene utvikler seg i forhold til sonene i den faktiske skolen. Dette kan føre til at luftmengdene som kjøres gjennom ventilasjonsanlegget i modellen ikke stemmer overens med de reelle luftmengdene det er behov for i skolen, noe som kan gi utslag i behovet til ventilasjonsvarme og energibehov til vifter.

Noen av de interne lastene ble ikke endret fra «alltid på» til en egen timeplan for driftstid. Det årlige energibehovet til de interne lastene er tilpasset til at totalt energibruk skal stemme med reell energibruk over ett helt år. Ulempen ved at de står som «alltid på» i stedet for å ha en variabel driftstid er at de vil bidra til oppvarming i tidsrom der de i virkeligheten kanskje er slått av. Dette kan påvirke behovet til romoppvarming.

Det ble antatt at all energi til teknisk utstyr og belysning gikk over til varme. Det viste seg at IDA ICE har en standardinnstilling der kun 30 % av energien til belysning blir omgjort til varme. Konsekvensen er at modellen får tilført mindre energi fra de elektriske internlastene enn først

antatt, noe som medfører at romoppvarmingsbehovet blir noe høyere enn hvis all energi til belysning ble inkludert. Det ble gjort en forenkling under tilpasning av modellen, når energibehovet til belysning og teknisk utstyr tilsammen tilsvarte riktig elforbruk ble det ikke prøvd å tilpasse disse til helt korrekt energibehov per post. Denne forenklingen ble gjort på antagelsen om at all energi til både belysning og utstyr ble omgjort til varme. Siden det ikke stemmer, vil varmetilførselen fra teknisk utstyr og belysning ikke være helt korrekt.

Etter å ha kjørt alle simuleringene ble det oppdaget at effekten til gulvvarme og gulvkjøling var satt til  $100 \text{ W/m}^2$ . Dette tilsvarer omtrent ubegrenset tilgang på oppvarming og kjøling. I prinsippet skulle ikke dette hatt påvirkning på energibruken, men da kapasiteten til gulvvarmen ble nedjustert til  $50 \text{ W/m}^2$  viste det seg at energibruken til oppvarming av sonene sank med ca. 20 %, mens behov for ventilasjonsvarme økte. Gitt at settpunkttemperaturen ikke kan vedlikeholdes når maksimal effekt til gulvvarme er lavere, kan økningen i energibehov til ventilasjonsvarme forklares med at avtrekksluften er kjøligere. Dermed er det mindre varme tilgjengelig å gjenvinne, som igjen fører til at varmebatteriene må ettervarme tilluften mer. Årsaken til at energibruken til romoppvarming faller såpass mye kan være at maksimal effekt på  $50 \text{ W/m}^2$  er underdimensjonert for enkelte soner, slik at varmeanlegget ikke klarer å levere nødvendig mengde energi til de sonene.

## 11 KONKLUSJON

---

Det er avvik mellom målt og beregnet energibruk ved begge de energieffektive skolene som er undersøkt i denne oppgaven. Ved Marienlyst skole er det hovedsakelig termisk energibruk som har vært høyere enn beregnet, det brukes noe mer energi til romoppvarming og betydelig mer energi til ventilasjonsvarme. Energibehovet til varmtvann ved Marienlyst skole var kraftig overdimensjonert i energiberegningene. Nardo skole har avvik både på termiske og elektriske energiposter. Det brukes vesentlig mer elektrisitet til teknisk utstyr, og termisk energibehov til romoppvarming og ventilasjonsvarme var høyere enn beregnet. Kjølebehov var heller ikke inkludert i energiberegningene gjort da Nardo skole ble prosjektert.

Hovedfokuset i denne oppgaven har vært å finne årsakene til avvikene mellom målt og beregnet energibruk. I den forbindelse var det fire spørsmål som det ble valgt å undersøke videre. Spørsmålene var om avvik mellom målt og beregnet energibruk kan skyldes:

1. *Ikke-optimal drift av tekniske anlegg:*

God drift av tekniske anlegg er en av de viktigste faktorene for å sikre at energibruken til ett bygg når de energiambisjonene som settes. Moderne energieffektive bygninger er svært komplekse og har mange tekniske anlegg og komponenter som påvirker hverandre. Dette stiller høye krav til teknisk kompetanse og forståelse av energibruk hos driftsoperatørene. Opplæring og kompetanseoverføring om de tekniske anleggene når bygget overleveres til driftsansvarlig bidrar til å sikre energieffektiv drift. Det er viktig at ansvarlig for drift har tilgang på gode verktøy for å kunne følge opp energibruken kontinuerlig, slik at feil kan oppdages raskt. Et godt energioppfølgingssystem er avgjørende for sikre energieffektiv drift.

2. *Utilstrekkelig kunnskap om energieffektivitet hos brukere:*

Brukere i skoler har innflytelse på energibruken. For at brukerne skal foreta energieffektive valg er det viktig at de har forståelse om hvordan deres handlinger påvirker de tekniske anleggene og dermed energibruken. I en skole er mange av brukerne elever, de vil ha begrensede muligheter til å påvirke energibruken fordi lærerne som regel styrer klasseroms-situasjonene. Mulighet til å få tilbakemelding om hvordan energibruken ved skolen har vært kan bidra til å motivere til mer energieffektive valg.

3. *Feil antagelser om driftsbehov og brukeratferd i beregninger:*

Når bygninger prosjekteres gjøres det mange antagelser om hvordan bygget skal brukes og driftes. Ofte bommes det på antagelsene om bruksmønster og brukernes behov, noe som fører til at bygget ikke driftes slik det ble prosjektert. For å unngå feil er det avgjørende at det er god kommunikasjon mellom driftsorganisasjonen, og de prosjekterende entreprenørene.

4. *Feil antagelser om tekniske anlegg beregninger:*

Virkningsgrader på komponenter i anleggene og korrekt design av tekniske anlegg i modellen er viktig for at beregningene skal reflektere reelt energibruk. Varmegjenvinneren i ventilasjonsanlegget er en av enkeltkomponentene som har størst påvirkning på energibruken til bygget. Dersom det gjøres feil antagelser om virkningsgraden til gjenvinneren kan det potensielt føre til store avvik mellom målt og beregnet energibruk.



## 12 VIDERE ARBEID

---

I dette kapitlet kommer en del forslag til tema med tilknytning til denne masteroppgaven som det kan være interessant å undersøke videre.

En større studie som inkluderer flere energieffektive skoler bør gjennomføres for å se om funnene fra denne masteroppgaven kan trekkes som generelle konklusjoner for hele bygningskategorien.

Fokuset i denne oppgaven har vært på energibruk i energieffektive skolebygninger. Tor Olsen, Teknisk direktør i AF Energi, påpekte under Enovakonferansen 2016 er det like viktig å utnytte effektnivået riktig som det er å redusere energibruken for å få ned energikostnadene. På samme konferanse holdt Dr.ing Ida Bryn i Erichsen & Horgen et innlegg som blant annet omhandlet overdimensjonering av effekt i nye bygningsinstallasjoner. Hun nevnte at det overdimensjoneres med 50 % på effektsiden, og underdimensjoneres med 50 % på energibehov. Dette fører til store avvik mellom målt og beregnet energibruk blant annet fordi anlegg må kjøre på dellast fordi effektbehovet er for høyt. Bryn påpeker at det ikke finnes noen veiledere eller standarder som gir anbefalinger på hvordan utbygger skal gå frem for å beregne effektbehov for hele bygget. (Bryn, 2016) Konsekvensene av feildimensjonering av effektbehov bør undersøkes nærmere, og forslag til prosedyre for beregning av effektbehov bør utarbeides.

I forbindelse med undersøkelser av effektbehov, kunne det vært interessant å se på nærvarmenettet Marienlyst skole er en del av. Det foreslås å undersøke hvordan effekttopper i skolebygget, og de andre bygningene og anleggene koblet til nærvarmenettet samspiller under effekttopper.

Det ble i denne masteroppgaven funnet at brukeratferd er en viktig faktor med hensyn på avvik mellom målt og beregnet energibruk., Det finnes lite forskning på området, så en studie med fokus på brukeratferd og hvordan det påvirker energibruken i forskjellige bygningskategorier bør gjennomføres. Resultatene kan brukes til å utvikle bedre metoder for å anslå brukeratferd, og dermed redusere avvikene. Parameterstudie eller sensitivitetsanalyse kan benyttes til å identifisere brukerstyrte parametere og kartlegge i hvor stor grad de påvirker energibruken.



## BIBLIOGRAFI

---

- Andersen, G., 2016. Personlig kommunikasjon med Geir Andersen.
- Are, K.G., Olaussen, T., 2010. Modell av Marienlyst skole, SIMIEN. Rambøll og Bright VVS.
- Azar, E., Menassa, C., 2014. A comprehensive framework to quantify energy savings potential from improved operations of commercial building stocks [WWW Document]. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513012755> (accessed 2.9.16).
- Azar, E., Menassa, C., 2012a. Sensitivity of Energy Simulation Models to Occupancy Related Parameters in Commercial Buildings. Presented at the Construction Research Congress.
- Azar, E., Menassa, C., 2012b. A comprehensive analysis of the impact of occupancy parameters in energy simulation of office buildings.
- Bjørberg, S., Larsen, A., Øiseth, H., 2007. Livssyklus kostnader for bygninger. Verdiskapning gjennom utvikling av bygningsforvaltning.
- BKK, n.d. Energiflytskjema Marienlyst skole.
- Bryn, I., 2016. Effekt- og energibudsjett. Avvik mellom teori og virkelighet. Presentert på Enovakonferansen, Trondheim.
- Bye, R., 2008. Lærende bygninger - Nøkkelferdige brukere? (Doktoravhandling). NTNU, Trondheim.
- Carrico, A.R., Riemer, M., 2010. Motivating energy conservation in the workplace: An evaluation of the use of group-level feedback and peer education.
- Claridge, D., Haberl, J., Mingsheng, L., Houcek, J., Aamer, A., 1994. Can You Achieve 150 % of Predicted Retrofit Savings? Is It Time for Recommissioning? Texas A&M University.
- Dannevig, P., 2009. Buskerud – klima [WWW Document]. Store Nor. Leks. URL <https://snl.no/Buskerud/klima> (accessed 11.25.15).
- dibk, 2015. Direktoratet for byggkvalitet - Energi [WWW Document]. dibk.no. URL [www.dibk.no/no/Tema/Energi/](http://www.dibk.no/no/Tema/Energi/)
- dibk, 2011. Byggeteknisk forskrift med veiledning (TEK 10) - Direktoratet for byggkvalitet [WWW Document]. dibk.no. URL <http://www.dibk.no/no/BYGGEREGLER/Gjeldende-byggeregler/Veiledning-om-tekniske-krav-til-byggverk/> (accessed 10.8.15).
- Dokka, T.H., Andersen, G., 2012. Marienlyst school - comparison of simulated and measured energy use in a passive house school. Presented at the Passivhus Norden, Passivhus Norden, Trondheim.

- Dokka, T.H., Grini, C., 2013. Etterprøving av bygningers energibruk, Metodikk. SINTEF Byggforsk, Oslo.
- Dokka, T.H., Klinski, M., Haase, M., Mysen, M., 2009. Kriterier for passivhus - og lavenergibygg - Yrkesbygg (Prosjektrapport No. 42). SINTEF Byggforsk, Oslo.
- Dokka, T.H., Svensson, A., Wigenstad, T., Andresen, I., Simonsen, I., Berg, T.F., 2011. Energibruk i bygninger - Nasjonal database og sammenligning av beregnet og målt energibruk (Prosjektrapport No. 76). SINTEF Byggforsk, Oslo.
- Eimhjellen, L., 2009. Nardo skole - Brukererfaringer og energibruk (Masteroppgave). NTNU, Trondheim.
- Energidepartementet, O., 2007. Enova [WWW Document]. 026021-990005. URL <https://www.regjeringen.no/no/dep/oed/ryddemappe/oed/norsk/dep/org/etater/Enova/id411863/> (accessed 9.23.15).
- EnergiGuiden Pluss, EOS Trondheim kommune, n.d. . Trondheim Kraft.
- Enova, 2015. Enova [WWW Document]. Enova. URL <http://www.enova.no>
- Enova, 2012. Veileder Energiledelse.
- EvoTek, EOS Drammen kommune, n.d. . EvoTek.
- Forbord, G., 2016. Intervju om bruksmønster ved Marienlyst skole.
- Forsvarsbygg, 2015. Årsrapport 2015 (Årsrapport). Forsvarsbygg.
- Forsvarsbygg, 2007. Årsrapport 2007 (Årsrapport). Forsvarsbygg.
- FutureBuilt, 2010. Marienlyst Skole, FutureBuilt forbildeprosjekt (Brosjyre). FutureBuilt, Drammen.
- Galvin, R., Sunikka-Blank, M., 2013. The Prebound Effect: Discrepancies Between Measured and Calculated Consumption, in: A Critical Appraisal of Germany's Thermal Retrofit Policy. Springer, pp. 67–84.
- Grini, C., Mathisen, H.-M., Sartori, I., Haase, M., Sørensen, H.W., Petersen, A., Wigenstad, T., 2009. LECO–Energibruk i fem kontorbygg i Norge. SINTEF Byggforsk.
- Gynther, L., Mikkonen, I., Smits, A., 2010. Evaluation of European energy behavioural change programmes. Presented at the International Energy Programme Evaluation Conference (IEPEC), European Energy Network, Paris.
- Haase, M., 2014. Programmer for energiberegninger - fordeler og ulemper.
- Hahn, U., 2015. Marienlyst skole - Drammen [WWW Document]. Nor. Arkit. Landsforb. URL [www.arkitektur.no/marienlyst-skole](http://www.arkitektur.no/marienlyst-skole)

- Helmen, F., 2016. Samspill gir energieffektive bygg. Presentert på Enovakonferansen 2016, Trondheim.
- Hestad, M.B., 2010. Energibruk og inneklima i lavenergi skolebygging (Masteroppgave). NTNU, Trondheim.
- Hoes, P., Hensen, J.L.M., Loomans, M.G.L., de Vries, B., Bourgeois, D., 2008. User behavior in whole building simulation.
- Hvinden, B.C., 2015. Sammenligning av beregnet og målt energibruk i energieffektive skolebygninger (Prosjektoppgave). NTNU, Trondheim.
- IDA Indoor Climate and Energy, 2015. . EQUA AB, Sweden.
- Junghans, A., 2015. Intelligent solutions for sustainable facilities management of highly energy-efficient school buildings. NTNU.
- Karlsson, F., Rohdin, P., Persson, M.-L., 2007. Measured and predicted energy demand of a low energy building: important aspects when using Building Energy Simulation. Linköping University, Uppsala University.
- Klimadata Drammen, 1990. . Metreologisk Institutt, Drammen.
- Klimadata Trondheim 1961-1990, 1990. . Metreologisk Institutt, Trondheim.
- Klinski, M., Thomsen, J., Hauge, Å.L., Jerkø, S., Dokka, T.H., 2012a. Systematisering av erfaringer med passivhus (Prosjektrapport No. 90). SINTEF Byggforsk.
- Kommunal- og moderniseringsdepartementet, 2010. Forskrift om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift) - Lovdata [WWW Document]. lovdata.no. URL <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2010-03-26-489> (accessed 10.8.15).
- Masoso, O.T., Grobler, L.J., 2009. The dark side of occupants' behaviour on building energy use. North-West University.
- Mørk, M.I., Bjørberg, S., Sæbøe, O.E., Weisæth, O., 2008. Ord og uttrykk innen Eiendomsforvaltning - Fasilitetsstyring (Facilities Management). NTNU Institutt for bygg anlegg og transport/ Norges bygg- og eiendomsforening.
- Mysen, M., Schild, P.G., 2014. Behovsstyrt ventilasjon, DCV - forutsetninger og utforming.
- Nord, N., Novakovic, V., Frydenlund, F., 2012. Kontinuerlig funksjonskontroll for effektiv drift av bygninger. Sintef Energi AS.
- Novakovic, V., Hanssen, S.O., Thue, J.V., Skarstein, Ø., Gjerstad, F.O., 2007. Enøk i bygninger- Effektiv energibruk.
- Ørnes, I.R., Løvlund, A., 2016. Målerbefaring Marienlyst skole i Drammen - Notat.

- Paulsen, F., 2015. Energibruk i næringsbygg; fra overlevering av næringsbygg til FDVU fasen - når all teori skal bli praksis (Masteroppgave). NTNU, Trondheim.
- PFK, 2013. Funksjonskontroll for effektiv drift av bygninger.
- Programbyggerne, 2015. Informasjonsside SIMIEN [WWW Document]. Promgrambyggerne. URL [www.programbyggerne.no](http://www.programbyggerne.no)
- Programbyggerne, 1994. Brukerveiledning Energibruk i bygninger 3.5.
- SINTEF Byggforsk, 2005. 552.311 Inneklima og ventilasjon i skoler.
- SINTEF Byggforsk, 2000. 421.505 Krav til innemiljøet i yrkes- og servicebygninger.
- SNL, 2015. Store norske leksikon. Store Nor. Leks., SNL.
- Standard Norge, 2014. NS 3031 Beregning av bygningers energiytelse - Metode og data.
- Standard Norge, 2013. NS 3700:2012 - Kriterier for passivhus og lavenergibygninger - Boligbygninger.
- Standard Norge, 2012. NS 3701:2012 - Kriterier for passivhus og lavenergibygninger. Yrkesbygg.
- Standard Norge, 2011. NS-EN ISO 50001:2011 - Energiledelsessystemer.
- Standard Norge, 2006. NS-EN 15221-1 - Fasilitetsstyring Del 1: Termer og definisjoner.
- Strumse, E., 2006. Kan man endre folks atferd gjennom holdningskampanjer?
- TEK, 2007. Tekniske forskrifter til plan- og bygningsloven 1997.
- Tengesdal, P., 2012. Vannbårne energianlegg - Distribusjonssystemer. COVA AS.
- Thewes, A., Maas, S., Scholzen, F., Waldmann, D., Zürbes, A., 2013. Field study on the energy consumption of school buildings in Luxembourg. University of Luxembourg, University of Applied Sciences Bingen.
- Thomsen, J., Berker, T., Hauge, Å.L., Denizou, K., Wågø, S., Jerkø, S., 2013. The interaction between building and users in passive and zero-energy housing and offices, Smart and Sustainable Built Environment Vol. 2. The Research Centre og Zero Emission Buildings (ZEB), Norway.
- Thunshelle, K., Hauge, Å.L., 2012. Brukerundersøkelse om innemiljø på Marienlyst skole (Prosjektrapport No. 5). ZEB The Research Centre on Zero Emission Buildings.
- Trondheim kommune, 2008. Modell av Nardo skole. Trondheim kommune, Trondheim.
- Walpole, R., Myers, R., Myers, S., Ye, K., 2012. Probability & statistics - for engineers and scientists, Ninth edition. ed.

# VEDLEGG

---

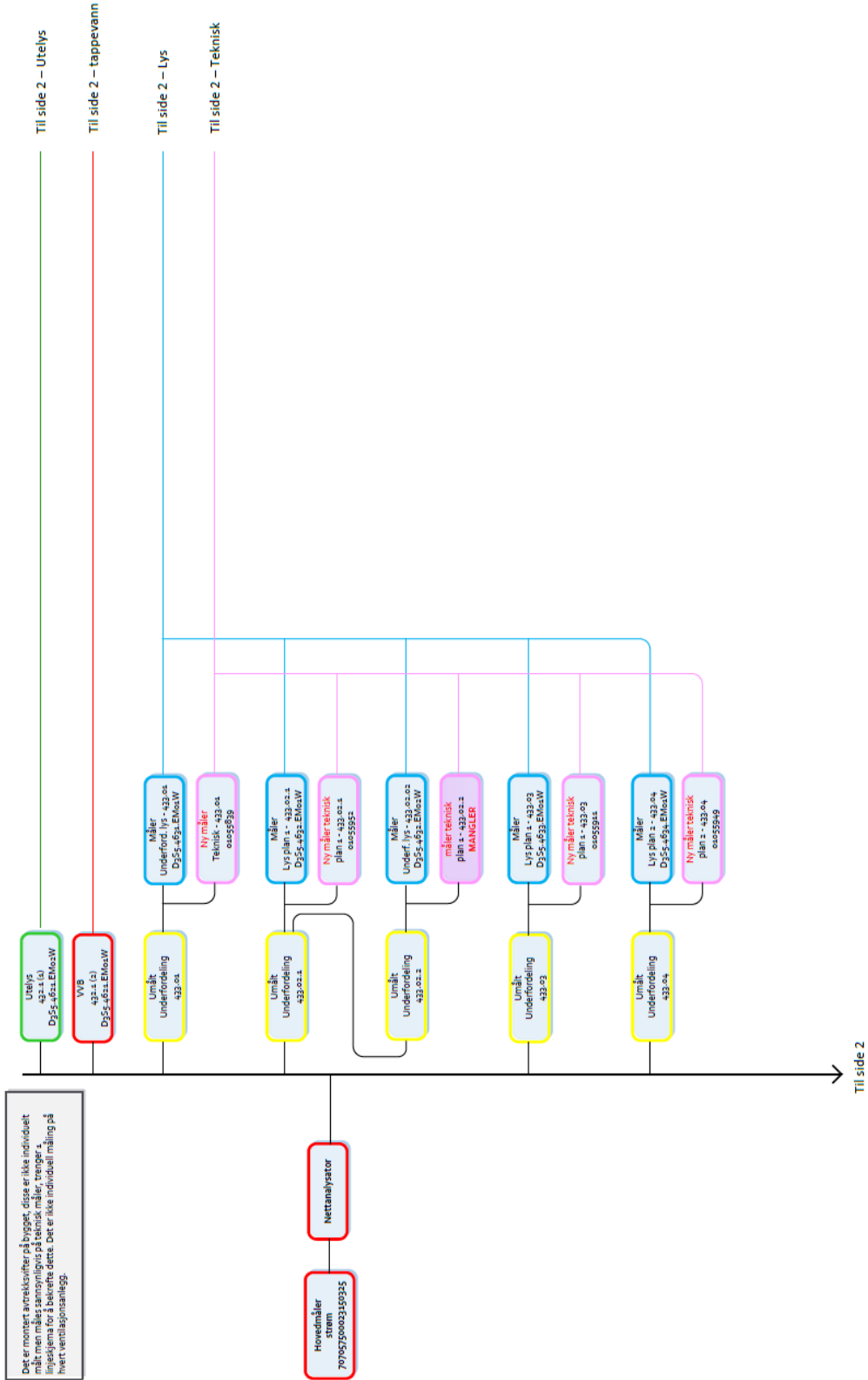
## **1. OPPHAVSRETTSNOTIS HVINDEN**

Tabell 5 – Netto energibudsjett, deler av Tabell 7 – Primærenergibehov, CO2-utslipp, energikostnad og energipolitisk vektet levert energi for bygninger samt tabell M.1 – Standard referanseår med måneds- og årsverdier for lufttemperatur, relativ fuktighet og vindhastighet fra NS 3031:2014 utg. 1 Beregning av bygningers energiytelse. Metode og data er gjengitt av Britt Comfort Hvinden i masteroppgaven «Sammenligning av beregnet og målt energibruk i energieffektive skolebygninger» med tillatelse fra Standard Online AS 07/2016. Standard Online er ikke ansvarlig for eventuelle feil i gjengitt materiale. Se [www.standard.no](http://www.standard.no)

## 2. ENERGIFLYTSKJEMA MARIENLYST SKOLE

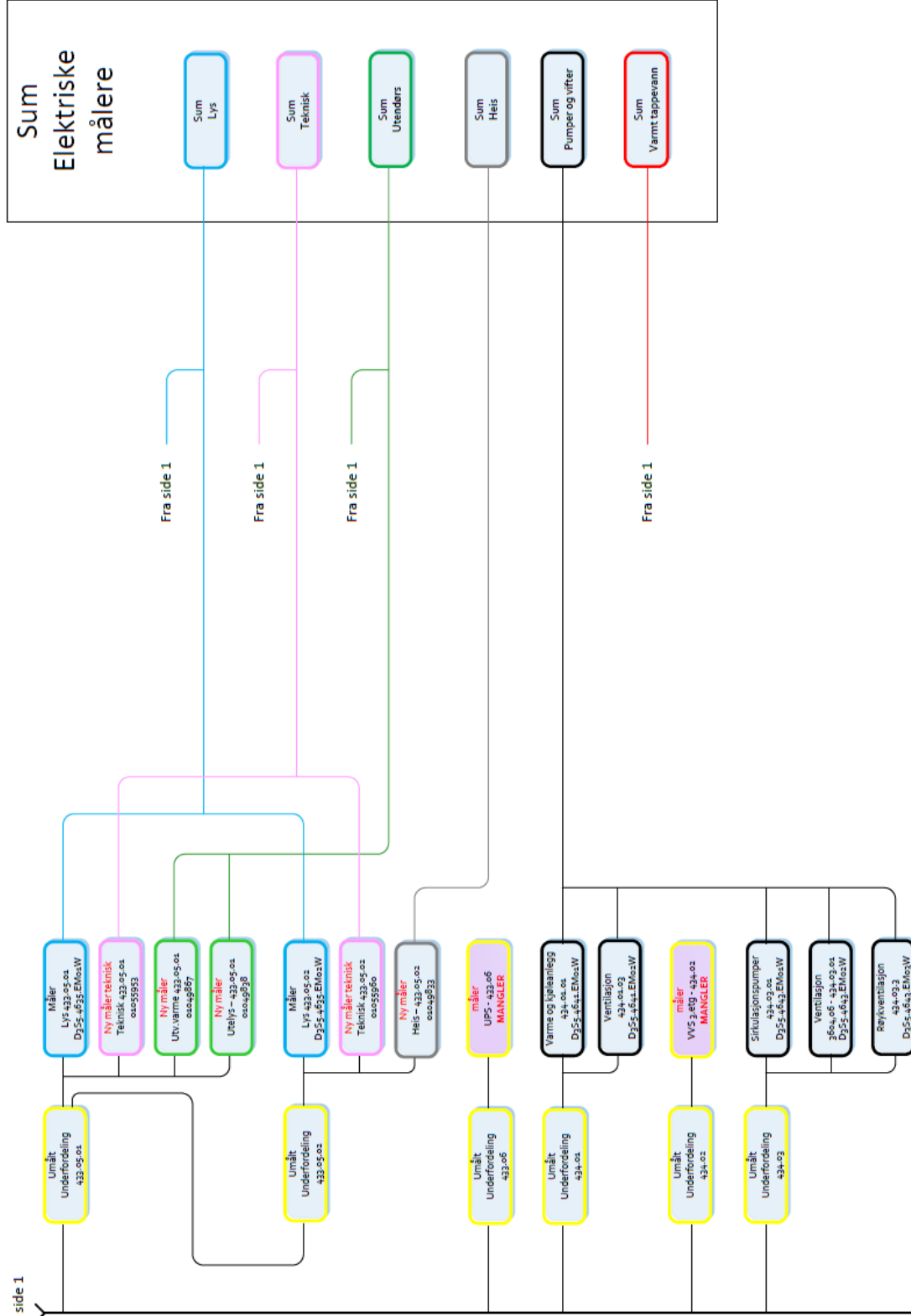


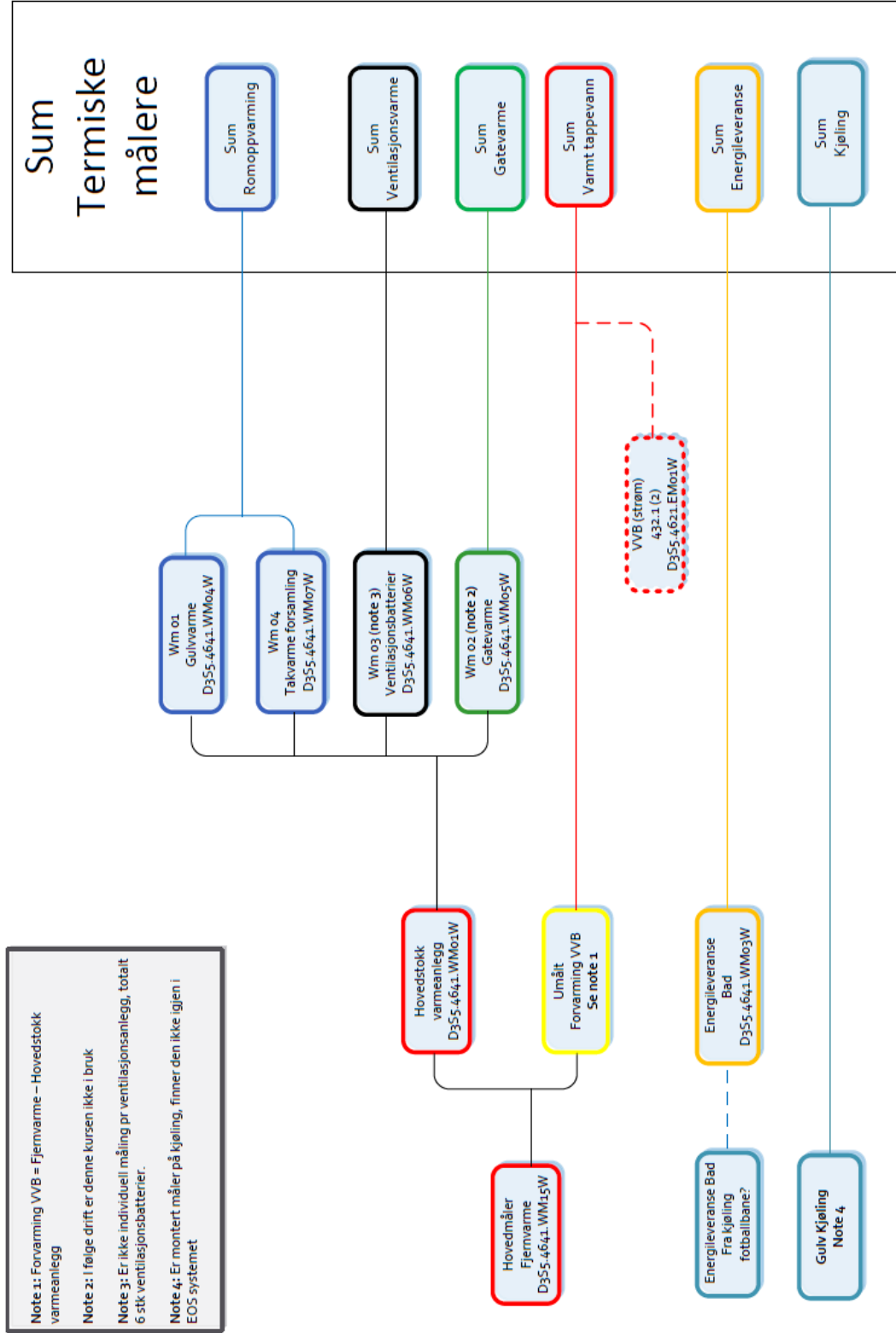
Energiflyt Elektro Marienlyst skole





Fra side 1





### **3. DIGITALT VEDLEGG: MODELL AV MARIENLYST SKOLE**

Modellen av Marienlyst skole laget i IDA ICE er vedlagt oppgaven som en digital fil på en minnepenn. Kopi av modellen kan fås hos veileder Hans Martin Mathisen ved Institutt for Energi- og Prosessteknikk.